

---

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE  
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



**Ecole Nationale Polytechnique**  
Département de Génie Civil  
Laboratoire de Génie Sismique & Dynamique  
des Structures



**Mémoire d'Ingéniorat**

*Présenté par :*

**Ali Haimoud Chouaib Yassine**

**Thème :**

Simulation numérique du comportement non-linéaire  
des chaussées souples à base de matériaux  
granulaires non-traités

*Proposé et Dirigé par :*

**B. TILIOUINE** Professeur, ENP

**K.SANDJAK** Maître-Assistant à l'université de Boumerdès

*Promotion: Juin 2012*

**Résumé:** Dans ce travail nous avons essayé de simuler le comportement mécanique non-linéaire des matériaux granulaires dans les chaussées souples, et pour ce faire on a développé un programme informatique basé sur le modèle de Yang H.HUANG qui divisait le demi espace en plusieurs couches et applique la théorie de Burmister pour déterminer les contraintes au milieu de chaque couche et calcule après les modules réversibles, puis itère jusqu'à avoir la convergence, les modèles utilisés sont  $K - \theta$ , Uzan et le Modified Universel. Une fois le programme est fait, on l'a utilisé pour l'analyse non-linéaire de quelques structures typique de chaussées souples, en comparant les résultats de simulations linéaire et non-linéaire on a conclu la nécessité d'introduire les modèles non-linéaires dans le calcul des chaussées souple.

**Mots clés :** Chaussées souples, modèles non-linéaire,  $K - \theta$ , Uzan, simulation, critères de dimensionnement, modèle de Burmister.

**Summary:** In this work we try simulate the non-linear mechanical behavior of the unbound granular materials in flexible pavement, for this purpose we developed a program based in the Yang H.HUANG model, which divide the half-space on several layers and use the Burmister theory to determinate the stress at each layer and calculate after the resilient moduli, then there is iteration until the convergence is obtained, the used model in this study are  $K - \theta$ , Uzan and the Modified Universel. Once the program is done, we use it for the non-linear analyze of some typical structure of flexible pavement, we compare the results of linear and non-linear simulations, after we conclude the need of the use the non-linear models in the calculus of flexible pavements.

**Key words:** Flexible pavements, non-linear,  $K - \theta$  model, Uzan model, simulation, critical responses, Burmister model.

**خلاصة :** في هذا العمل حاولنا محاكاة السلوك الميكانيكي الغير خطي للمواد الحبيبية في أرصفة مرنة، ولهذا قمنا بتطوير برنامج كمبيوتر استنادا إلى نموذج H.HUANG الذي يهدف إلى تقسيم الفضاء إلى طبقات عدة و تطبيق نظرية Burmister لتحديد الضغوط في منتصف كل طبقة وحسب الوحدات التالية عكسها، ثم يكرر حتى يكون التقارب، فإن النماذج المستخدمة هي  $K - \theta$ ، Uzan و Modified Universel. وبمجرد الانتهاء من البرنامج، وانه كان يستخدم لأغراض التحليل غير الخطية من بعض الهياكل الرصيف مرن نموذجي، في المقارنة بين نتائج المحاكاة الخطية وغير الخطية استنتجنا الحاجة إلى إدخال غير النماذج الخطية في حساب الرصيف مرنة.

**كلمات رئيسية :** الأرصفة المرنة، والنماذج الغير الخطية،  $K - \theta$ ، Uzan، والمحاكاة، ومعايير التصميم، و Burmister نموذج.

## *Remerciements*

*Tout d'abord, je tiens à remercier Allah, le clément et le miséricordieux de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.*

*Je voudrais exprimer mes vifs remerciements à mes promoteurs Pr.Tilliouine et Mr.Sandjak.*

*Nous voudrions aussi remercier tous les professeurs qui ont contribué à notre formation.*

*Que tous les membres du jury trouvent ici l'expression de mes profonds respects pour avoir pris la peine d'examiner ce modeste travail.*

*Mes remerciements vont également à tous ceux et celles qui de près ou de loin m'ont apporté aide et encouragement. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.*

# Chapitre I

I.1 Introduction .....	1
I.2 Objectif du mémoire .....	2
I.3 Plan général .....	3

# Chapitre II

II .1 Introduction .....	4
II.2 Méthodes de dimensionnement empiriques .....	5
II.3 Méthodes mécanistiques (analytiques) .....	6
II.4 Le modèle de calcul .....	7
II.4.1 LE MODELE DE BOUSSINESQ (1885) .....	7
II.4.2 Les modèles bicouches : .....	9
II.4.2.1 Modèles de Hogg .....	10
II.4.2.2 Modèle de Westergaard .....	11
II.4.3 Les modèles multicouches ( Burmister 1943) .....	11
II.4.4 Modèles éléments finis .....	13
II.5. Réponses critiques pour Chaussées Flexibles et Prédiction de vie ...	14

# Chapitre III

III.1 Introduction .....	17
III .2 Les matériaux bitumineux.....	17
III .3 Les matériaux granulaires.....	18
III.3.3.1 Evaluation des caractéristiques mécaniques des graves non traitées .....	18
III.4 Caractérisation des matériaux routiers.....	18
III.4.1 Détermination du module E des matériaux .....	19
III.4.2 Essai de compression simple .....	19
III.4.3 Essai de Plaque .....	19
III.4.5 Etudes de corrélations .....	20
III.4.6 Module de Young E (1807).....	20
III.5 Importance du module d'élasticité .....	21
III.6 Module réversible.....	21
III.6.1 Essai Triaxial Chargements Répété (T.C.R).....	22

III.6.2 Analogie de base .....	23
III.6.3 Principe de l'essai Triaxial à Chargement répété.....	24
III.7 Modélisation des graves non-traitées.....	26
III.8 Relation module réversible-contrainte .....	27
III.8.1 Modèle $K - \theta$ (matériaux à gros grains) .....	27
III.8.2 Modèle $K - \sigma_d$ (matériau à grains fins).....	28
III.8.3 Modèle d'Uzan etWitczac (1988).....	28
III.8.4 Modèle Modified Universel (NCHRP 2002).....	28
III.9 Modélisation du sol support.....	29
III.9.1 L'approche empirique .....	29
III.9.2 L'approche rationnelle .....	30

## Chapitre IV

IV.1 Introduction .....	31
IV. 2 Description de logiciel de base de notre programme .....	31
IV.3 L'analyse non linéaire en utilisant Kenlayer .....	32
IV. 4 Le programme développé .....	35
IV. 4.1 Les concepts de la programmation orienté objet .....	35
IV. 4.2 Organisation du programme .....	37
IV. 5 Simulations .....	42
Conclusion et recommandations .....	46
Annexe .....	47

## Liste des tableaux

Tab IV. 5.1. La structure de chaussée S1.....	42
Tab IV.5.2. Critères de dimensionnement calculés pour la structure S1.....	42
Tab IV.5.3. : La structure de chaussée S2.....	43
Tab IV.5.4. Critères de dimensionnement calculés pour la structure S2.....	43
Tab IV.5.5. : La structure de chaussée S3.....	44
Tab IV.5.6. : Critères de dimensionnement calculé pour la structure S3.....	44

## Liste des figures :

Fig II.4.1.1 Diffusion des pressions dans un massif de boussinesq.....	8
Fig II.4.2.1. Travail en flexion d'une couche liée.....	9
Fig II.4.2.2.1 Diffusion de la contrainte selon Westergaard.....	11
Fig. II.4.3.1. Modèle de Burmister.....	12
Fig.II.5.1.les réponses critiques pour une structure typique de chaussée.....	14
Fig.II.5.2.Diagramme qui illustre 2 types de mécanisme de rupture dans les chaussées.....	15
Fig III.4.2.1. Relation contrainte-déformation donnant le module E d'un matériau.....	19
Fig III.6.1. Définition de $E$ et $\nu$ .....	21
Fig.III.6.1 : définition des différents modules de déformation.....	22
Fig.III.6.1.1 : Cellule de l'appareil TCR.....	23
Fig.III.6.2.1 : sollicitation mécanique dues au passage d'une charge roulante.....	24
Fig.III.6.3.1 : principe de l'essai T.C.R.....	25
Fig.III.6.3.2.essai CLC et CLV.....	25
Fig.III.7.1 : déformation d'un matériau sous chargements cycliques.....	27
Fig.IV.3.1. les étapes de l'approximation itérative inclus dans KENLAYER.....	33
Fig.IV.3.2. Principe de l'approche itérative simplifiée utilisée dans KENLAYER.....	34
Fig.IV.5.1. variation de $M_r$ dans la structure S1.....	43
Fig.IV.5.2. variation de $M_r$ dans la structure S2.....	44
Fig.IV.5.3. variation $M_r$ dans la structure S3.....	45

## **Chapitre I :**

Les matériaux granulaires non traités sont généralement utilisés comme couches de base et couche de fondation dans les chaussées. Ils peuvent être certains matériaux naturels comme le gravier ou de pierre concassée, ou peuvent être des matériaux artificiels tels que laitier concassé ou de clinker obtenu par certains procédés industriels. Bien que les couches granulaires dans une chaussée souple jouent un rôle essentiel dans la performance globale structurelle de la chaussée, jusqu'à récemment, les matériaux granulaires non liés ont reçu moins d'intérêt de recherche que d'autres matériaux de revêtement à la construction routière. Parce que leur comportement réversible a été simplifié dans le passé par des résultats de recherche limités basés sur des tests classiques, de chargement de plaque à savoir, stabilomètre et les essais CBR in-situ. En Outre ces difficultés techniques posées par les tests de laboratoire des matériaux ayant des grandes tailles de particules, les chercheurs encouragés à se concentrer sur les études antérieures sur des matériaux similaires.

Toutefois, au cours des 30 dernières années, la situation a changé et un important effort de recherche a été entrepris en vue de la caractérisation des matériaux granulaires non traités. Parce qu'il est bien entendu que ces matériaux sont des éléments intermédiaires de la structure de la chaussée, le fonctionnement correct de la couche granulaire non traité est d'une importance vitale.

Un certain nombre de chercheurs ont étudié le comportement élastique des matériaux granulaire non traité de la base soumis à un chargement du trafic. Ils ont montré que les matériaux granulaires non traités ont un comportement réversible non-linaire dépendant de l'état de contrainte au moment de réponse à la charge, Et aussi le degré de cette la non-linéarité est une fonction de l'état de contrainte, la teneur en eau, la densité sèche, le niveau de charge et la granulométrie des matériaux granulaires non-traités .

Pour une meilleure compréhension du comportement non linéaire élastique, les tests de laboratoire qui simulent adéquatement le comportement des matériaux sous des conditions in-situ et des charges de trafic sont nécessaires. Au cours de sa durée de vie, une chaussée subit un grand nombre d'impulsions contraintes chacune est constitué par composantes de contrainte verticales, horizontales et de cisaillement. L'essai triaxial à charge répétée est un test de laboratoire des plus couramment utilisés pour la détermination du comportement dépendant de l'état de contrainte des

matériaux granulaires non liés. Le test peut être réalisé avec différentes contraintes, densités et teneurs en eau ce qui est représentatif pour des matériaux à l'intérieur de la structure de chaussées. Les plus importants paramètres évalués dans le test triaxial à charges répétées sont les caractéristiques liées à la rigidité du matériau ainsi que la capacité à résister à l'accumulation de permanente déformation pendant le chargement pulsé.

L'un des sujets de recherche actuels principales en génie routier est la méthode analytique de conception des structures de chaussées souples. Beaucoup de techniques populaires de conception des chaussées sont basées sur ces méthodes analytiques avec l'hypothèse que le rendement de la chaussée est directement lié aux réponses critiques sous le chargement du trafic. Par conséquent, l'exigence fondamentale pour une approche analytique vers une conception des chaussées est la bonne compréhension des propriétés mécaniques des matériaux constitutifs. Parce que la base granulaire et les couches de fondation dans une chaussée souple jouent un rôle essentiel dans la performance globale structurelle de la chaussée, leurs caractéristiques mécaniques complexes doivent être soigneusement étudiées.

### **Objectif de ce mémoire :**

Comme expliqué précédemment, les modèles analytiques multicouches sont encore couramment utilisés dans les phases de conception des chaussées par les ingénieurs. Par exemple, le règlement Français présente une méthode de conception des chaussées basée sur l'analyse mécanique des chaussées en utilisant le modèle multicouche élastique linéaire de Burmister (Burmister 1943). L'analyse effectuée par plusieurs chercheurs montre que cette approche donne des résultats relativement bons pour les réseaux à grosse circulation, avec une couche de base traitée en liant hydraulique (ciment) ou carboné (bitumineux) ce qui est le cas des réseaux principaux. [Voir le catalogue]

Toutefois, il est moins satisfaisante pour les chaussées souples à faible trafic, où l'épaisseur de la couche bitumineuse est limitée (moins d'environ 15 centimètres) ce qui est le cas des réseaux secondaires. Pour ce type de chaussées, le comportement non linéaire de matériaux granulaires non traités doit être pris en compte dans la modélisation pour obtenir des résultats réalistes.

Dans ce mémoire ce type de dimensionnement (Approche mécanistique) va être utilisé pour différents modèles de non linéarité en se basant sur le modèle analytique d'un système multicouche semi-infini linéaire et élastique de Burmister. Et puis en va comparer les résultats des simulations avec le calcul linéaire. Tous les travaux cités seront faits sur des structures de chaussées et des matériaux tirés de la littérature.

**Plan général :**

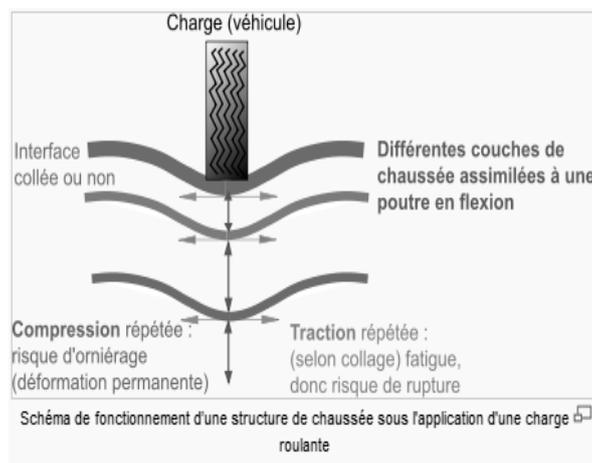
Le présent travail peut être devisé en 5 chapitres, le chapitre 1 est un chapitre introductif ou on pose le problème d'une manière générale, dans le chapitre 2 on décrit depuis la littérature comment se fait le dimensionnement des chaussée en illustrant quelque rappel théorique d'élasticité, le chapitre 3 est consacré à l'étude des matériaux utilisés généralement dans la construction routière et les essais de laboratoire qu'on fait sur ces matériaux notamment les graves non traitées et modèles de non linéarité mécanique , dans le 4<sup>ième</sup> chapitre on propose une méthode d'analyse des chaussées souple contenant des matériaux granulaires non traités tenant compte des non linéarité mécanique de ces matériaux et les différents modèles qu'il traite en parlant sur le programme développé en le validant et en donnant quelque exemples tiré de la littérature traitée avec ce programme, dans le dernier chapitre (conclusion) on va comparer les résultats obtenus par simulations avec programme développé dans le chapitre 4 (non linéaire) des structures type choisies avec celles calculées en supposant la linéarité des couches de base (graves non traitées) en tirant quelque conclusions .

## Chapitre II

### II .1 Introduction :

Le dimensionnement d'une structure de chaussée routière consiste à déterminer la nature et l'épaisseur des couches qui la constituent afin qu'elle puisse résister aux diverses agressions auxquelles elle sera soumise tout au long de sa vie.

La structure d'une chaussée routière doit résister à diverses sollicitations, notamment celles dues au trafic et elle doit assurer la diffusion des efforts induits par ce même trafic dans le sol de fondation. L'application d'une charge roulante induit ainsi une déformation en flexion des couches de la structure. Cette flexion entraîne des sollicitations en compression au droit de la charge et des sollicitations en traction à la base des couches d'enrobés.



Bien que ladémarchegénérale du dimensionnement d'une structure de chaussée ne soit pas foncièrement différente de celle du dimensionnement des autres structures du génie civil puisqu'il s'agit de déterminer les contraintes ou déformations des matériaux et de les comparer à des contraintes ou déformations admissibles, le dimensionnement des chaussées présente de nombreuses particularités, sur lesquelles cette introduction souhaite insister. Pour simplifier, on peut distinguer deux approches très différentes du dimensionnement des chaussées : celle qui relève de l'empirisme et celle qui relève de la théorie.

## II.2 Méthodes de dimensionnement empiriques :

Les méthodes empiriques de dimensionnement font appel exclusivement à des expériences comparant le comportement à long terme de diverses structures pour différentes conditions climatiques et de trafic. Des essais en vraie grandeur apportent également de nombreuses informations nécessaires pour la mise en place des règles empiriques de dimensionnement.

Dans cette approche, on observe le comportement sous trafic des chaussées réelles ou expérimentales. La démarche peut être décrite comme suivant : on se fixe d'abord un critère pour définir la fin de la vie d'une chaussée et on détermine, en utilisant ce critère, la durée de vie des sections observées. Sur cette population de sections expérimentales, on établit, en général par des méthodes statistiques de régression multiple, des relations entre cette durée de vie et les caractéristiques géométriques des structures (épaisseurs des couches) ainsi que les propriétés mécaniques des matériaux, ou bien entre la durée de vie et une mesure globale des propriétés mécaniques de la structure de chaussée et du sol de fondation.

Cette approche purement empirique présente un certain nombre d'inconvénients :

- pour connaître, par une telle voie, l'influence de paramètres nombreux comme les épaisseurs des différentes couches et les propriétés mécaniques des matériaux, il faut un nombre important de sections expérimentales et le coût est très élevé. C'est surtout la question de l'épaisseur des couches de chaussées qui est abordée par une telle méthode;
- le temps de réponse est très long car il n'y a pas d'effet d'accélération du trafic, et les extrapolations sont hasardeuses;
- enfin, les relations obtenues par cette voie d'analyse statistique par régression ne s'appliquent qu'aux matériaux étudiés, qu'aux conditions d'environnement de l'expérimentation, et qu'aux sols supports rencontrés, l'impossibilité de généraliser.

Un exemple très connu de l'établissement des lois empiriques est celle de l'AASHTO (American Association of State Highway Officials) les essais réalisés par cette association de 1957 à 1961 ont comporté l'étude de 240 sections de chaussées souples, de 271 sections de chaussées rigides et d'une cinquantaine de sections de chaussées souples avec couche de base stabilisée.

Chacune des sections a reçu l'application d'environ 1 million de charges roulantes, ce qui a permis notamment:

- de fixer des lois d'équivalence entre les charges de poids différents,
- de relier statistiquement les déflexions à la structure de la chaussée,
- de définir un indice de qualité de service des chaussées et d'étudier ses variations avec le trafic, en relation avec la structure de la chaussée.

### II.3 Méthodes mécaniques (analytiques) :

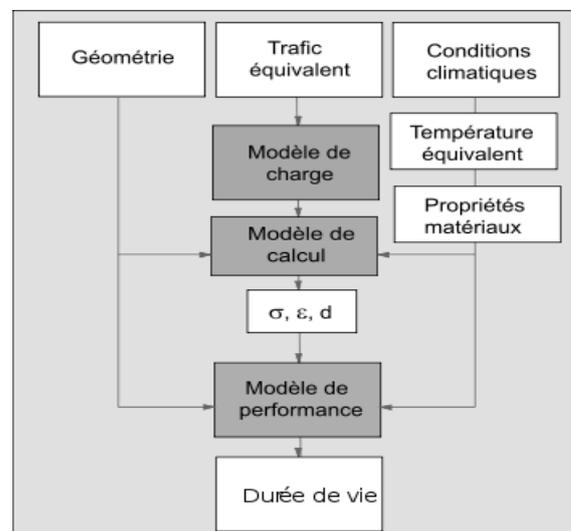
Dans cette approche, il faut établir un modèle de chaussée reproduisant le plus près possible le fonctionnement mécanique de la structure. A l'aide de ce modèle, on détermine les sollicitations que subissent les matériaux de chaussées et le sol-support sous l'effet du trafic. Ces sollicitations sont ensuite comparées aux sollicitations admissibles. Il s'agit donc d'une approche utilisant une branche particulière de la mécanique des milieux continus, dite « Mécanique des chaussées ».

Une première partie du modèle a pour but de déterminer les contraintes et les déformations dans les matériaux de chaussées et le sol-support, cela se fait à l'aide de modèles mathématiques, ou numérique qui ont fait de gros progrès au cours de ces dernières années avec le développement des moyens de calculs. Cependant, ces programmes ont peut-être trop attiré l'attention car ils ne constituent pas la partie la plus difficile et la plus importante du dimensionnement. La modélisation du comportement des matériaux de chaussée et du sol-support pose actuellement bien plus de problèmes, de même que celle des sollicitations mécaniques et des conditions d'environnement.

La vérification mécanique porte en fait sur deux points:

Une vérification vis-à-vis de la rupture par fatigue: on vérifie que la rupture par fatigue ne se produit pas avant la fin de la durée de vie souhaitée pour la chaussée, ou encore que, si la rupture par fatigue dans une couche donnée se produit, elle ne se manifestera pas en surface avant la fin de cette durée de vie.

Une vérification vis-à-vis des déformations permanentes a la surface de la chaussée, on vérifie que les déformations permanentes dans les matériaux de chaussées qui peuvent en présenter (matériaux non liés ou à liants hydrocarbonés) et dans le sol-support, ne conduisent pas à l'apparition en surface de déformations excessives, produisant des ornières ou des défauts d'uni inacceptables.



En réalité, ces deux approches, empirique et théorique, ne sont pas aussi disjointes puisqu'elles comportent toutes les deux une phase expérimentale et il existe des méthodes semi-empiriques, comme la méthode CBR. Par ailleurs, les méthodes que l'on qualifie de théoriques conservent une certaine part d'empirisme ou, en tous cas, nécessitent encore un « calage » par référence au comportement des chaussées réelles.

Ces méthodes (mécanistique-empiriques) font partiellement appel à une approche analytique qui est complétée par des données empiriques. Il y a en général deux étapes :

- Détermination des sollicitations dans une superstructure sous l'effet d'une charge définie de trafic
- Mise en relation de ces sollicitations avec certaines dégradations des chaussées.

Le principe de fonctionnement des méthodes de dimensionnement mécanistiques empiriques est défini dans le schéma ci-contre.

Le modèle de charge est au centre du processus. Il consiste à donner une image aussi réaliste que possible de la charge induite par une roue dans une chaussée routière.

## **II.4 Le modèle de calcul :**

Les modèles de calcul permettent de définir les contraintes et déformations qui apparaissent au sein d'une chaussée, sous l'effet d'une charge et dans des conditions bien définies. Ils nécessitent la définition de paramètres pour décrire la structure (géométrie et lois de comportement) et les conditions de chargement (intensité de la charge, pression de contact, etc.). Ils fournissent des résultats théoriques correspondant aux hypothèses retenues pour la modélisation. Par souci de simplicité, la plupart des méthodes de calcul de la réponse mécanique de la chaussée sont basées sur des hypothèses simplificatrices :

- Charge idéalisée (généralement verticale, uniforme et circulaire)
- Comportement linéaire élastique des matériaux
- couches constituées de matériaux homogènes et isotropes.

### **II.4.1 LE MODELE DE BOUSSINESQ (1885) :**

La pression  $q$  (de l'ordre de 0,2 à 0,7 MPa) exercée par le pneumatique ne peut généralement pas être supportée par le sol naturel. Le Rôle de la chaussée est de répartir cette pression pour l'amener à un niveau compatible avec ce qui peut être supporté par le sol-support. Si la rigidité ( $E, \nu$ ) du corps de chaussée n'est pas trop différente du terrain naturel (corps granulaire par exemple), on peut raisonnablement supposer que la pression se répartit à travers le corps de la chaussée de la même manière que dans un sol. Ceci conduit à définir une méthode simpliste de dimensionnement:

- 1- La charge appliquée à la chaussée est schématisée par une pression  $q$  sur un cercle de rayon  $a$ .

- 2- Le sol-support est supposé élastique (module d'Young  $E_2$ , coefficient de Poisson  $\nu_2$ ). Il ne peut supporter sans se déformer exagérément qu'une contrainte verticale ( $\sigma_z$ ) admissible inférieure à la pression  $q$ .
- 3- On recherche à quelle profondeur  $H$  du sol la pression verticale a été suffisamment diffusée pour ne pas dépasser  $\sigma_z$  admissible.
- 4- On peut assimiler l'épaisseur  $H$  à l'épaisseur de chaussée ou bien lui faire correspondre une épaisseur de chaussée  $H' < H$  par une règle simple tenant compte du module  $E_1$  du corps granulaire et du module  $E_2$  du sol-support.  
Assimiler  $H'$  à  $H$  revient à assimiler  $E_1$  à  $E_2$ .

Encore faut-il pour réaliser ce dimensionnement, savoir précisément comment s'effectue la diffusion des pressions verticales, à l'intérieur du massif ( $E_2, \nu_2$ ).

Ce problème a été résolu par Boussinesq.

La contrainte verticale  $\sigma_z$  a été maximum au centre du cercle de charge. A la profondeur  $z$ , elle prend la valeur:

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

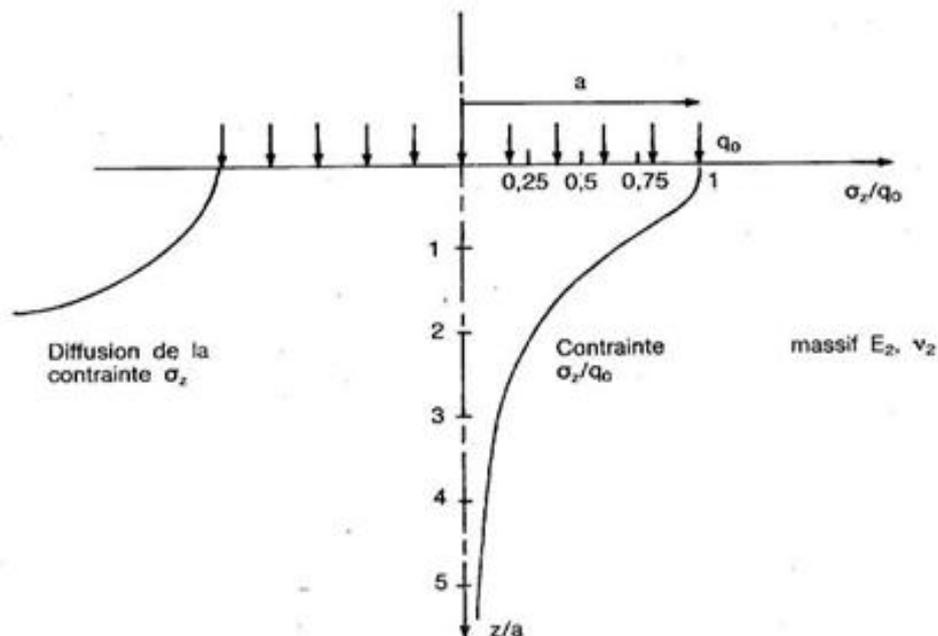


Fig II.4.1.1 Diffusion des pressions dans un massif de Boussinesq.

### II.4.2 Les modèles bicouches :

Lorsque la contrainte verticale sur le sol-support est limitée à une valeur très faible (1/10 ou 1/20 de la pression exercée en surface par exemple), il peut être coûteux de réaliser la répartition des pressions par l'intermédiaire d'un corps granulaire (l'épaisseur  $H$  est forte). Pour diminuer cette épaisseur, à contrainte sur le sol-support constante, il suffit d'augmenter le rapport de module entre la couche de chaussée ( $E_1$ ) et le sol-support ( $E_2$ ). Ce résultat peut être atteint à l'aide d'un liant hydraulique (ciment, laitier, etc.) ou hydrocarboné.

Si le module  $E_1$  de la couche de chaussée est élevé (20 000 MPa pour une assise traitée aux liants hydrauliques), on peut obtenir une faible pression sur le sol-support sans que l'épaisseur de chaussée soit importante. Cette épaisseur ne pourra néanmoins jamais être très faible : en augmentant le module de la couche de chaussée, on a complètement modifié son fonctionnement mécanique. La couche de chaussée fléchit sous la charge appliquée, ce fléchissement est accompagné de contraintes de traction par flexion à la base de la chaussée. Le dimensionnement de la chaussée consiste alors à vérifier deux critères qui conditionnent son comportement dans le temps :

- la contrainte verticale sur le sol-support doit être inférieure à une valeur limite fonction de la nature du sol-support et du nombre de chargements (cycles) envisagés.
- la contrainte de traction par flexion à la base de la couche de chaussée doit également être inférieure à une valeur limite fonction de la nature du matériau de chaussée et du nombre de cycles.

Avec des assises traitées aux liants hydrauliques, le premier critère du dimensionnement est généralement satisfait. Lorsque le deuxième l'est, il suffit donc de vérifier le deuxième.

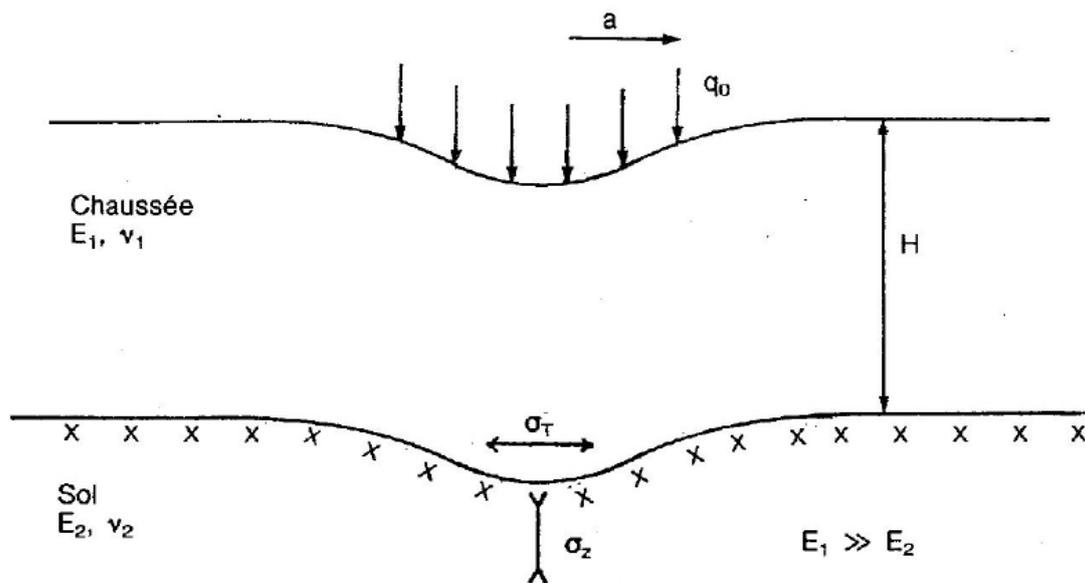


Fig II.4.2.1. Travail en flexion d'une couche liée.

### II.4.2.1 Modèles de Hogg :

Le modèle bicouche génère des contraintes verticales et des Déplacements que sont difficiles à résoudre. Pour les déterminer, Hogg assimile la chaussée à une plaque mince et utilise les hypothèses simplificatrices de Navier :

- le plan moyen est confondu avec la fibre neutre
- les sections planes restent planes pendant la déformation
- les contraintes suivant une direction transversale peuvent être négligées

Les Déplacements verticaux satisfont à l'équation de Lagrange qui fournit une première relation entre les deux inconnues  $w$  et  $\sigma_z$ .

$$D\nabla^2 w = p$$

$$D = \frac{E_1 H^3}{12(1 - \nu_1^2)}$$

$D$  : est un facteur de rigidité.

$p$  : La somme des pressions :  $p = \sigma_z - q_0$

$w$  : La déflexion

et

$$\nabla^2 w = \frac{\sigma_z - q_0}{D}$$

La deuxième relation est obtenue en assimilant les déplacements verticaux de la fibre neutre de la plaque aux déplacements verticaux du massif (dus aux contraintes sur le massif selon Boussinesq). De plus ; le glissement de la chaussée sur son support est supposé parfait.

Pour  $p = \pi \cdot q_0 \cdot a$  : charge par roue, la contrainte de traction est donnée par la formule de Hogg :

$$\sigma_T = \frac{1}{H} \cdot \frac{1 + \nu}{2} \cdot \frac{P}{\pi} F\left(\frac{E_1}{E_2} \cdot \frac{H^3}{a^3}\right)$$

On note  $D$  le facteur de rigidité et :  $D = \frac{1 + \nu}{2 \times \pi} \cdot F\left(\frac{E_1}{E_2} \cdot \frac{H^3}{a^3}\right)$

Le facteur de rigidité relative  $\frac{E_1}{E_2} \cdot \frac{H^3}{a^3}$

### II.4.2.2 Modèle de Westergaard :

Outre l'hypothèse de la plaque utilisée par Hogg, Westergaard considère le sol comme un assemblage de ressort dont le Déplacement vertical en un point est proportionnel à la pression verticale en ce point soit  $V = kw$  voir schéma du modèle de calcul.

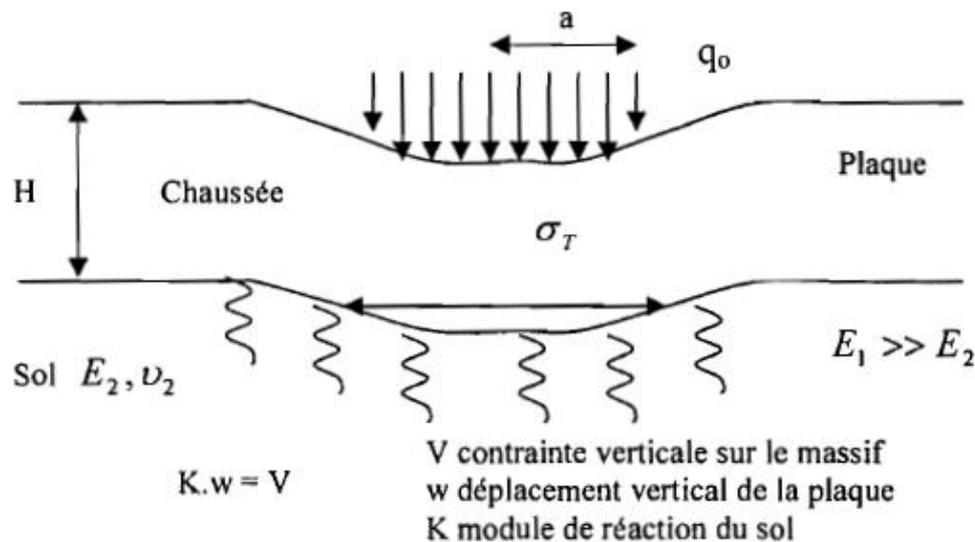


Fig II.4.2.2.1 Diffusion de la contrainte selon Westergaard.

Plus tard Lagrange a proposé la relation :  $\Delta^2 w(r) = \frac{V(r) - q_0}{D}$

C'est une équation différentielle du 4<sup>ème</sup> ordre pour laquelle les hypothèses simplificatrices de Hankel ont beaucoup aidé à la résolution.

### II.4.3 Les modèles multicouches (Burmister 1943) :

Après avoir étudié les bicouches et su apprécier le rôle de l'épaisseur, l'influence du rapport de module entre couche et l'influence du rayon de chargement.

Burmister a développé le cas de module à n couches. Il s'agit là d'un module assez puissant puisque :

- Les couches sont considérées comme des solides élastiques.
- Les interfaces entre couches peuvent être soit collées ou décollées.
- Le cas des charges multiples peut être appliqué en additionnant les effets de charges élémentaires.

Pour évaluer les contraintes et les déplacements dans les couches, Burmister a utilisé la théorie de l'élasticité et l'hypothèse de la symétrie de révolution du chargement qui a beaucoup facilité les calculs.

$$\Delta^2 \varphi(r, z) = 0, \quad \Delta^2 = \left( \frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} + \frac{d^2}{dz^2} \right)$$

Les transformations de Hankel ont facilité la résolution des équations du problème d'élasticité, en coordonnées cylindriques. Les formules sont généralisées pour  $n$  couches.

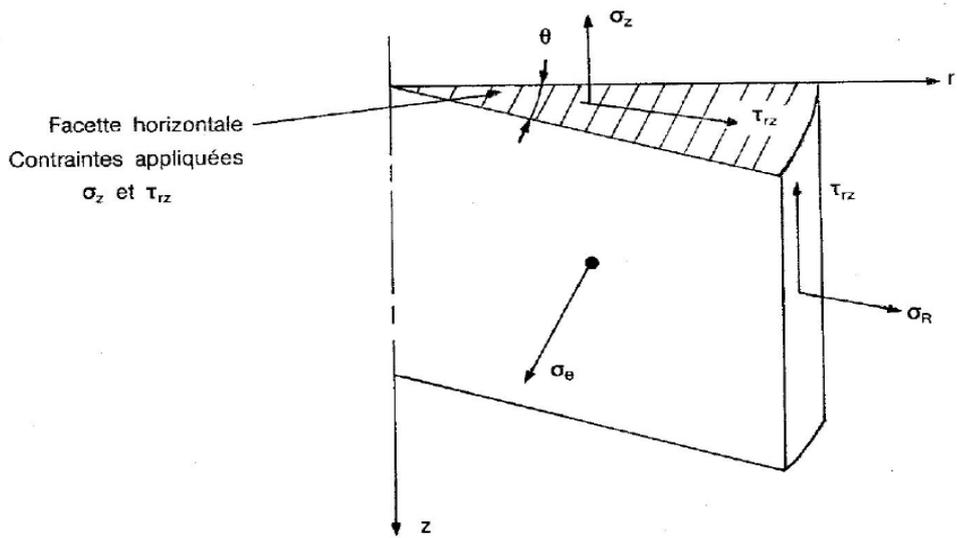
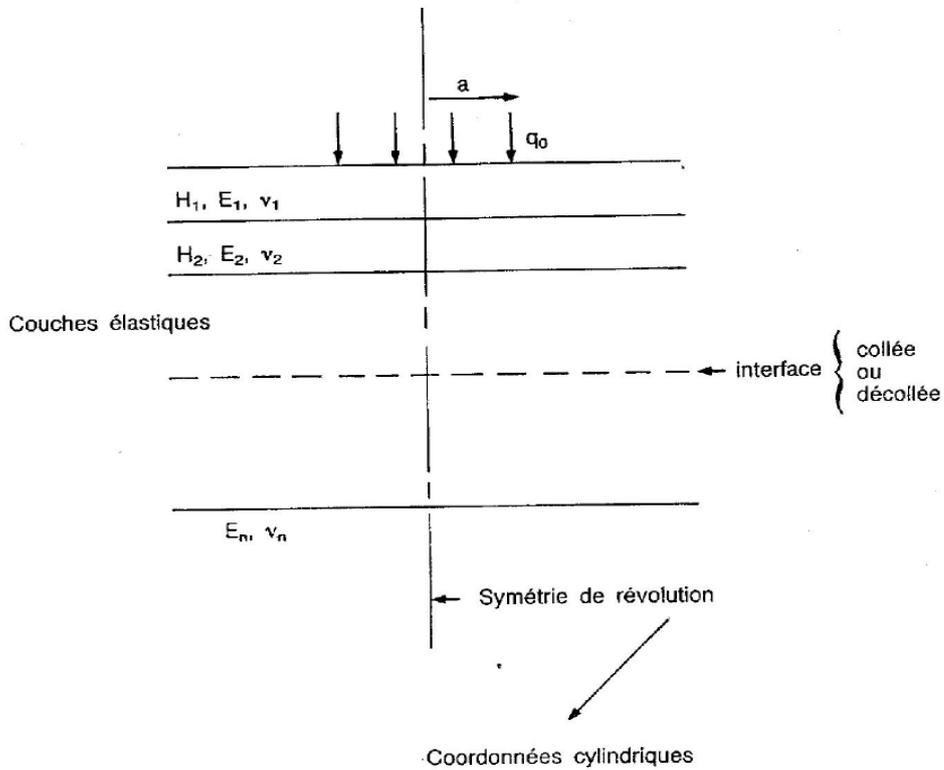


Fig. II.4.3.1. Modèle de Burmister.

Pour un point donné il faut  $4 \times n$  fonctions en ce point et on déduit les valeurs des contraintes ( $\sigma_z$ ), et des déformations ( $w_i$ ).

C'est avec le développement de l'outil informatique que ce modèle est maintenant plus accessible et est le plus utilisé. Les logiciels de calcul permettant de résoudre ce modèle sont :

Alize3 du LCPC, Ecoroute de l'ENPC, Bistro de Shell et Chev de Chevron.

Tous les résultats de calculs des contraintes et des déformations obtenus jusqu'ici étaient basés sur l'analyse des systèmes de couches linéaires élastiques. Le comportement élastique et linéaire a été l'hypothèse de base des équations de mécanique des chaussées.

Cependant d'après les recherches effectuées ces 30 dernières années, les matériaux granulaires utilisés en couches de chaussées ont révélé un comportement élastique non linéaire. Du moins le comportement linéaire est de courte durée lors de l'application de la charge. De ce fait la relation contrainte déformation n'est plus linéaire. Donc nous passons du module de Young  $E$  au concept de module réversible qui est fonction de la contrainte appliquée.

#### **II.4.4 Modèles éléments finis :**

Le développement des méthodes numériques et en particulier la méthode des éléments finis, a permis d'envisager l'utilisation de modèles encore plus réalistes. On peut ainsi prendre en compte la non linéarité des matériaux, les conditions complexes de contact entre les différentes couches, conditions complexes de chargement (forme de charge, les efforts horizontaux), viscoélasticité de la couche bitumineuse, les charges dynamiques, modélisation élasto-plastique. Les modèles éléments finis nous ont donné la possibilité de la modélisation tridimensionnelle des structures de chaussées, ce qui nous a permis d'utiliser des modèles de non linéarité tridimensionnelle (Classical-Universal, Modified-Universal, Couplé hyper-élastique de Taciroglu) même de faire des jumelages en cas de non linéarité de certaines couches.

De nos jours plusieurs codes de calcul sont utilisés dans le dimensionnement et l'analyse des structures de chaussées, on peut citer par exemple :

- Le programme PANCH développée au laboratoire de génie sismique et dynamique des structures LGSDS à l'école nationale polytechnique d'Algérie.
- Les programmes ALIZE 3 et CESAR du LCPC (Laboratoire Centrale des Ponts et chaussées - France).
- Le programme NOEL 8 de l'université de Nantes –France
- Le code de calcul FENLAP de l'université de Nottingham – Angleterre
- Le programme DIANA de l'université de Delft – Hollande

## II.5. Réponses critiques pour Chaussées Flexibles et Prédiction de vie

Pour plusieurs années, la méthode "analytique empirique"(ou "mécanistique-empirique") a été appliqué largement dans la conception des chaussées souples. Cette méthode de conception est basée sur la mécanique des matériaux qui relie une entrée, tel qu'une charge de la roue, à une sortie ou réponse de chaussée, telle que contrainte ou déformation. Cette approche consiste en deux parties; calculer la réponse des matériaux de chaussée au chargement appliqué et prédire performance de la chaussée depuis sa réponse.

Kerkhoven et Dormon (1953) en premier ont suggérés l'usage de la déformation de compression verticale sur la surface du sol support comme un critère de l'échec pour réduire la déformation permanent du sol support qui est la raison principale de l'orniérage du sol support. Après cela Saal et Pell (1960) ont recommandés l'usage de la déformation de tension horizontale au fond de la couche du béton bitumineux pour minimiser la fatigue par fissuration qui limite la vie de la fatigue de la chaussée. Dans la figure après, ces deux types de réponses critiques d'un système multicouche d'une chaussée souple est montré.

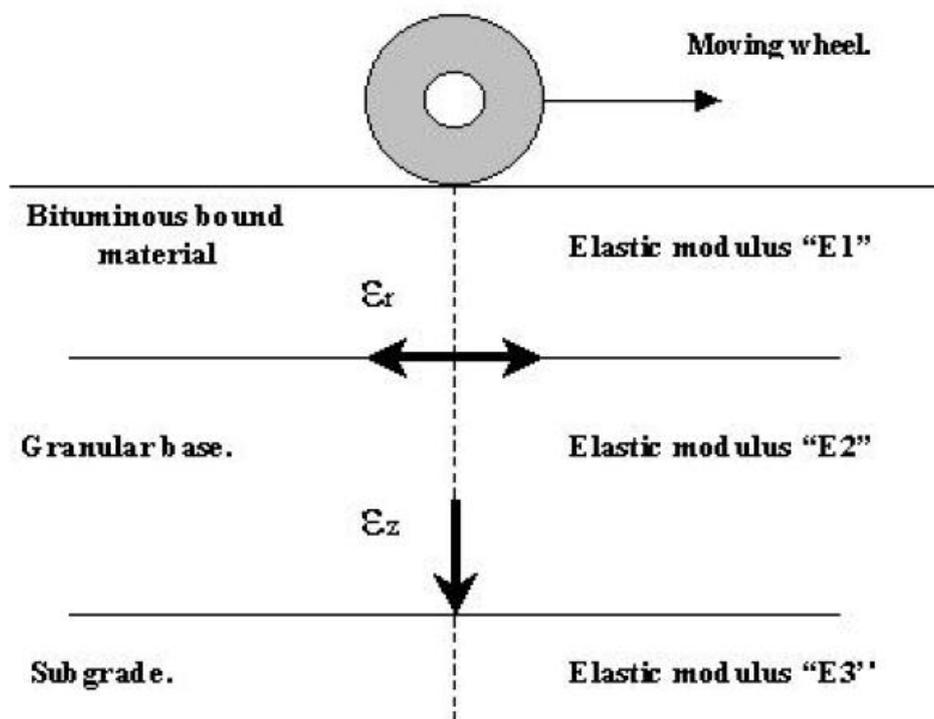


Fig.II.5.1.les réponses critiques pour une structure typique de chaussée.

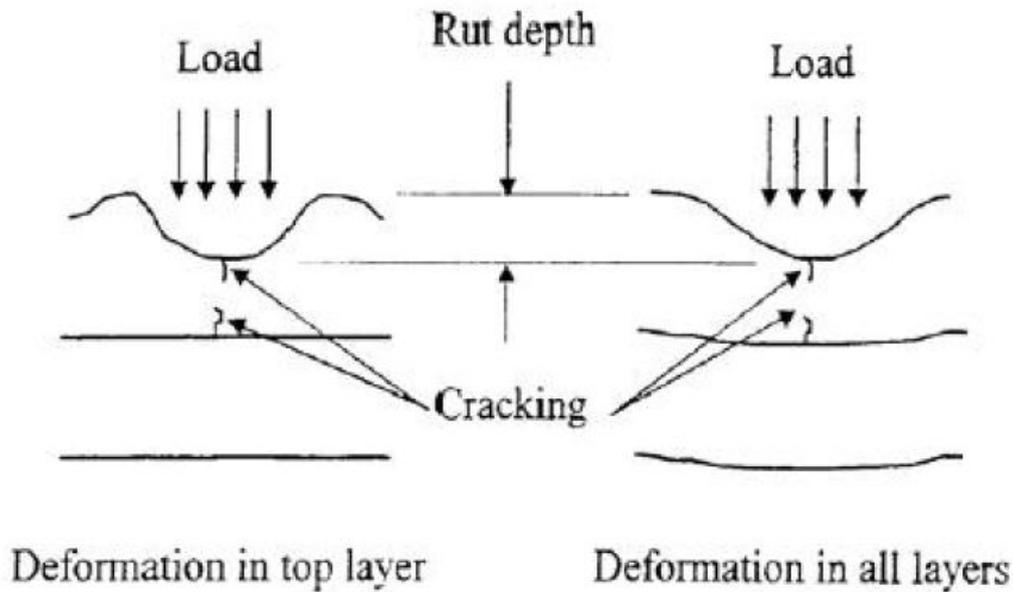


Fig.II.5.2. Diagramme qui illustre 2 types de mécanisme de rupture dans les chaussées.

Deux mécanismes de l'échec structurels principaux pour les chaussées flexibles qui sont la fatigue qui fissure de la couche du béton bitumineux, et la déformation permanente du sol support (orniérage) est aussi montré dans la figure.

L'usage de la déformation de compression vertical pour contrôler la déformation permanente est basé sur le fait que les déformations plastiques sont proportionnelles aux déformations élastiques dans le matériau de chaussée et leurs nombre de répétition (courbe de Whooler). Pour cette raison, en limitant les déformations élastiques sur le sol support, les déformations élastiques dans les autres composants de la chaussée au-dessus du sol support seront aussi contrôlées, d'où, la magnitude de déformation permanente sur la surface de chaussée sera contrôlée dans son tour. Ces deux critères ont été adoptés par Shell Petroleum International et Asphalt Institute dans leurs méthodes mécanistes empiriques de conception.

Le critère de l'échec pour la fatigue par est exprimés généralement sous forme

$$Nf = f_1(\varepsilon_t)^{-f_2}(E_1)^{-f_3}$$

Dans laquelle  $Nf$  est le nombre admissible de répétitions de la charge pour prévenir de la fatigue par fissuration.  $\varepsilon_t$  Est la déformation de traction au fond de la couche bitumineuse.  $E_1$  est le module élastique de couche bitumé.  $f_1$ ,  $f_2$  et  $f_3$  sont constantes déterminées des tests de fatigue du laboratoire.

Le critère de rupture pour la déformation permanente est exprimé comme suit :

$$Nd = f_4(\varepsilon_c)^{-f_5}$$

Dans lequel  $Nd$  est le nombre admissible maximal de répétitions de la charge pour limiter la déformation permanente.  $\varepsilon_c$  est la déformation de compression sur le sommet du sol support.  $f_4$  et  $f_5$  sont des constantes déterminées par des essais sur les routes.

## Chapitre III

### III.1 Introduction :

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

Le dimensionnement des chaussées nécessite la connaissance des propriétés mécaniques des matériaux utilisées et leur comportement rhéologique. Ces matériaux peuvent être classés en général en deux types :

- matériaux traités (cas des matériaux bitumineux, grave-ciment, etc...)
- matériaux non-traités (graves non-traitées et sols)

Ces deux types de matériaux sont complexes : leur comportement est en général hétérogène, anisotrope, non-linéaire, et leurs propriétés dépendent parfois du temps, de la température, de leurs états hydriques, etc... Ceci montre la difficulté de l'étude rhéologique de ces matériaux, plus particulièrement pour la loi de comportement reliant les déformations aux contraintes.

Dans le but d'analyser ces structures de chaussées, on utilise des modèles avec des degrés de sophistication variant. L'approche simple, la plus souvent utilisée est l'analyse élastique de systèmes multicouches nécessitant la connaissance des paramètres de rigidité, tels que le module de Young et le coefficient de Poisson. Par ailleurs avec l'introduction de plus en plus de la méthode des éléments finis pour le traitement de la non-linéarité, on est amené à caractériser avec plus de précision cette rigidité, en tenant compte de l'effet des nombreux paramètres qui peuvent l'affecter ; comme l'état de contrainte, la température, ou les conditions hydriques pour les sols.

### III .2 Les matériaux bitumineux

Dans l'analyse d'une chaussée une couche bitumineuse, on utilise la relation contraintes-déformations qui dépend souvent de la température et du temps. Ainsi pour un chargement rapide et une température faible, la rigidité est quasi élastique, contrairement au cas de chargement lent et des températures élevées le comportement est viscoélastique.

La plupart des méthodes de dimensionnement tiennent compte de la température et de la vitesse d'application de la charge dans la détermination d'une rigidité élastique équivalente. Cette rigidité est le facteur le plus important pour la détermination de l'épaisseur de la couche bitumineuse. Par exemple une grande rigidité améliore la dissipation de la charge et de ce fait réduit les déformations dans les couches granulaires sous-jacentes et sur le sol support, mais réduit aussi le potentiel de fatigue de cette couche. Dans ce cas la rigidité doit être déterminée sous des conditions reproduisant raisonnablement celles attendues quand le matériau forme une part de la structure de chaussée sous les conditions réelles de service.

### **III .3 Les matériaux granulaires**

Malgré la large utilisation de la théorie de l'élasticité linéaire dans l'analyse des structures de chaussées, il est reconnu que les matériaux granulaires non liés ont un comportement élastique non-linéaire, leur rigidité étant fonction de l'état de contrainte.

Dans la dernière décennie, la plupart des recherches de caractérisation des couches de base granulaires, ont demandé le développement d'essais triaxiaux chargements répétés et l'application de modèles non-linéaires.

#### **III.3.3.1 Evaluation des caractéristiques mécaniques des graves non traitées**

La performance structurale d'une chaussée s'évalue principalement par l'étude de la réaction de la chaussée sous charge, ce qui est l'évaluation du comportement mécanique des matériaux qui la composent.

Pour le dimensionnement structural d'une chaussée, la propriété majeure considérée est la rigidité du matériau (relation contrainte-déformation). La loi de comportement d'un matériau relie l'état de contrainte à l'état de déformation. De ce point de vue, le comportement d'un sol et des matériaux d'assises peuvent être analysés en laboratoire (essais de compression simple, essais triaxiaux) ou directement sur le terrain (essai de plaque).

### **III.4 Caractérisation des matériaux routiers**

Comme précédemment annoncé, un véhicule impose à la chaussée une charge, qui est génératrice de contraintes et de déformations dans toute l'épaisseur de la structure. La caractéristique majeure qui permet d'évaluer ces contraintes est le module d'élasticité exprimé en MPa. Il caractérise la rigidité des matériaux de chaussée. Dans ce chapitre nous traiterons le module de Young qui définit la constante de proportionnalité entre la contrainte et la déformation dans l'approximation linéaire et le module réversible dans le cas non linéaire.

### III.4.1 Détermination du module E des matériaux

En mécanique des sols, le module E d'un matériau peut être déterminé à l'aide d'un certain nombre d'essais dont: l'essai de compression simple, l'essai de Plaque; nous avons aussi des études de corrélations pour l'évaluation du module.

### III.4.2 Essai de compression simple

On utilise une éprouvette cylindrique normalisée qu'on écrase dans le sens longitudinal au moyen d'une pression agissant à vitesse constante. Deux disques de mêmes diamètres que l'éprouvette, sont placés à 2 extrémités. A l'aide d'un piston relié à un anneau dynamométrique, on exerce à vitesse constante une charge par l'intermédiaire d'une bille en acier logé dans un trou pratiqué sur le disque supérieur, on note à des intervalles de temps réguliers la valeur des contraintes et des déformations et ce, jusqu'à la rupture. Les valeurs expérimentales portées sur un graphique donnent l'allure suivante:

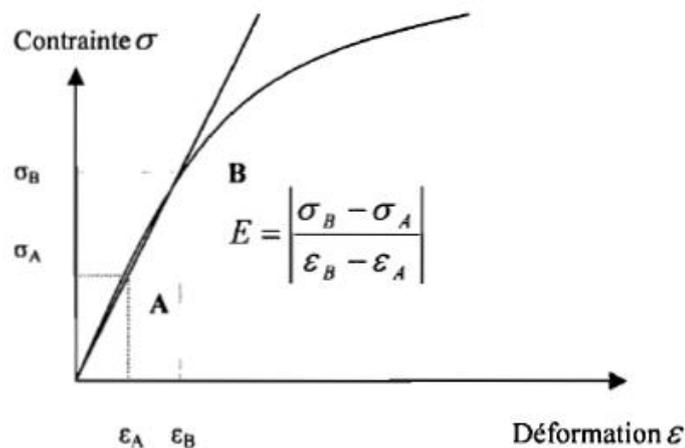


Fig III.4.2.1. Relation contrainte-déformation donnant le module E d'un matériau

### III.4.3 Essai de Plaque

C'est un essai qui permet de mesurer le module de réaction d'un sol à partir de chargement statique (étude de la déformabilité d'une plate-forme). On l'utilise pour contrôler le compactage des remblais et assises de chaussées. L'essai de plaque est réalisé sur le terrain et nécessite la présence d'un camion de 15 tonnes, 6 roues avec châssis long. On utilise une plaque de 40 cm de diamètre. On réalise deux mises en charge (2.5 bars et 2 bars). On mesure les déflexions  $w_1$  et  $w_2$  correspondantes à partir desquelles on calcule les modules des déformations  $E v_2$  et  $E v_1$ .

Le terme  $E\nu$  est donné par la formule de Boussinesq :

$$E\nu = \frac{\pi}{2} (1 - \nu^2) \frac{\sigma \cdot r}{e}$$

Ou :

$r$  : Rayon de la plaque rigide

$e$  : L'enfoncement

$\sigma$  : Contrainte appliquée

$\nu$  : Coefficient de poisson

Le rapport  $k = \frac{E \cdot \nu_2}{E \cdot \nu_1}$  donne la compacité et doit être inférieur à 2.

Dans la pratique le module de la couche de grave devrait être proportionnel à celui du sol avec un coefficient pouvant varier de 2 à 4. Ceci dans le but de modérer les contraintes transmises.

$0 < E\nu_2 < 5$ MPa	sol très déformable (portance 0)
$5 < E\nu_2 < 20$ MPa	sol déformable (portance 1)
$20 < E\nu_2 < 35$ MPa	sol déformable (portance 2)
$35 < E\nu_2 < 50$ MPa	sol peu déformable (portance 3)
$E\nu_2 > 50$ MPa	sol très peu déformable (portance 4)

### III.4.5 Etudes de corrélations

A partir de l'indice CBR, plusieurs auteurs ont proposés diverses formules pour l'évaluation de la rigidité.

Ainsi nous avons pour les matériaux non traités:

$E = 6,5 \text{ CBR}^{0,65}$ en MPa	G Jeuffroy
$E = 10 \text{ CBR}$ en MPa	Laboratoire Shell d'Amsterdam
$E = 0,85 \text{ CBR}^{0,825}$	C. Régis (1972)

### III.4.6 Module de Young E (1807)

Le module de rigidité ou encore module de déformation d'un matériau est la caractéristique principale qui permet de connaître ses caractéristiques de contraintes et de déformations en élasticité linéaire. Le module E et le coefficient de poisson  $\nu$  peuvent être représenté par:

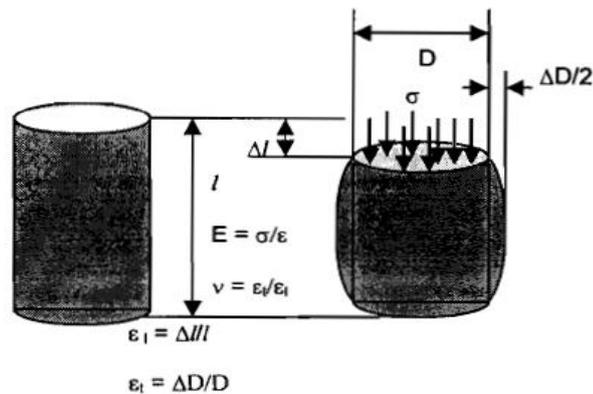


Fig III.6.1. Définition de  $E$  et  $\nu$

### III.5 Importance du module d'élasticité

En général, lorsque les contraintes appliquées sur un matériau entraînent des déformations permanentes, on peut dire sans se tromper que la limite d'élasticité du matériau est dépassée. Ainsi, connaissant la limite d'élasticité, on pourra prévoir la valeur de la contrainte à prendre en compte pour éviter les déformations irréversibles.

**Note :** L'utilisation du module  $E$  se fait sur la base d'hypothèses simplificatrices qui sont l'approximation d'un comportement élastique linéaire de la relation contrainte-déformation et la détermination de sa valeur par des corrélations. Cependant des études récentes sur les matériaux granulaires utilisés en couches de chaussées ont révélé un comportement élastique non linéaire. Ceci nous amène à aborder le concept de module réversible pour caractériser le mieux possible l'état de sollicitation des matériaux routiers.

### III.6 Module réversible

**Définition et utilisation du module réversible :** Le module réversible MR est une mesure des propriétés élastiques des matériaux utilisés dans l'analyse mécanistique des systèmes multicouches pour prédire le mécanisme de dégradation des chaussées (fissuration, orniérage ...).

C'est une simplification abusive mais commode de rechercher un module d'élasticité. On peut voir sur la figure qu'un essai triaxial permet de définir quatre modules distincts:

- le module tangent à l'origine,  $E_0$
- le module tangent pour une valeur intermédiaire de la déformation,  $E_t$ ;
- le module sécant :  $E_S = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\epsilon}$

- le module réversible :  $M_r = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\epsilon_r}$

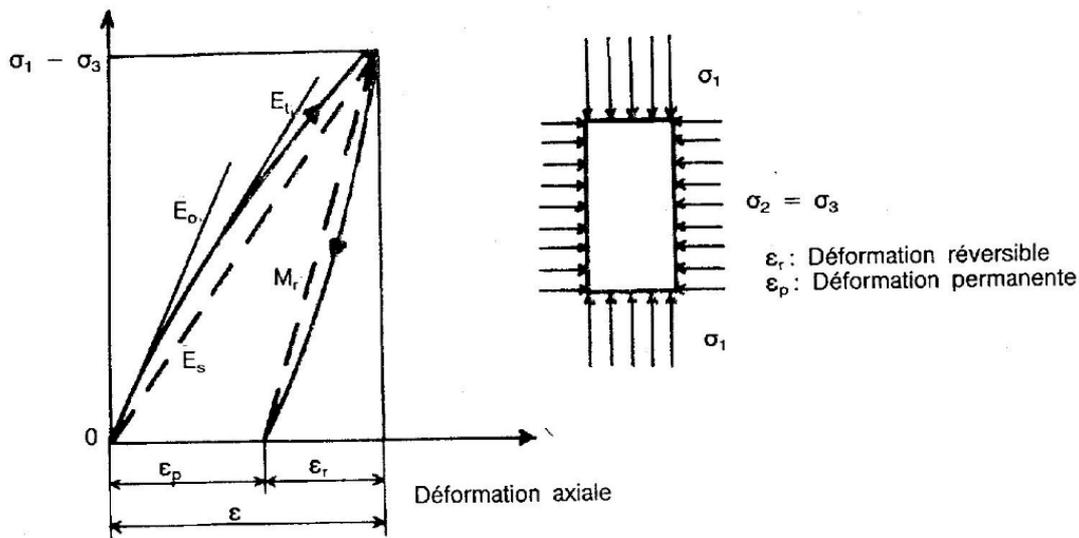


Fig.III.6.1 : définition des différents modules de déformation

Tous ces valeurs peuvent elles-mêmes varier en fonction de l'état de contrainte.

Le module réversible d'un matériau granulaire mise en place peut être évalué par la modélisation selon les modes de déflectométrie effectuée sur la chaussée ou selon les modèles établis en laboratoire avec les résultats d'essais de l'appareil triaxial à chargements répétés.

### III.6.1 Essai Triaxial Chargements Répété (T.C.R)

L'essai C.B.R. été souvent considère comme le seul essai permettant d'estimer la qualité mécanique d'une couche de matériaux (sol ou G.N.T), cependant, son caractère empirique ne permet pas d'améliorer ou d'étudier rationnellement le dimensionnement des chaussées souples. L'équipement triaxial (T.C.R) a été développe en premier lieu en 1974 a l'Université de Nottingham par Brown et son équipe, et à partir de 1980 en France par l'équipe de Paute du L.C.P.C. de st Briec. Cet essai est apparu comme l'outil adéquat pour l'étude du comportement des graves non-traitées de par la similitude qu'il présente par rapport aux contraintes induites par le trafic, surtout en simulant la répartition des charges



*Fig.III.6.1.1* : Cellule de l'appareil TCR.

Les résultats expérimentaux issus des essais triaxiaux ont beaucoup aidé au développement des modèles de comportement théoriques dans le cas réversible non-linéaire et pour les déformations permanentes des matériaux granulaires. Ces modèles ont été utilisés dans des calculs par éléments finis pour prédire la réponse des structures de chaussée. D'autres études ont considéré plus particulièrement le cas des sols et l'influence de leur état hydrique.

### **III.6.2 Analogie de base**

La contrainte induite dans un élément de sol varie en fonction de la position  $x$  de la roue (chargement). Soient  $\sigma_z$ ,  $\sigma_h$  et  $\tau$  les contraintes verticale, horizontale et de cisaillement respectivement.

L'approche expérimentale globale, incluant l'ensemble de la structure de chaussée, simplifiée au cas bidimensionnel, reste difficile à simuler localement au niveau du matériau par une application simultanée de contraintes normales et de cisaillements. Néanmoins, l'essai triaxial reste une bonne approche du problème, surtout sur l'axe de la charge ( $x = 0$ ) où les contraintes sont principales.

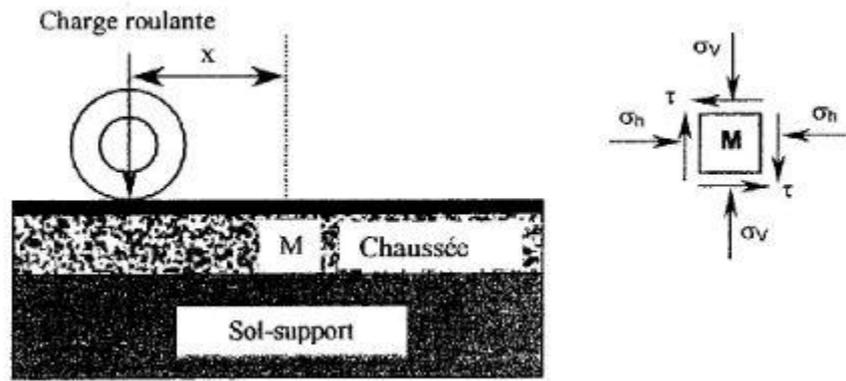
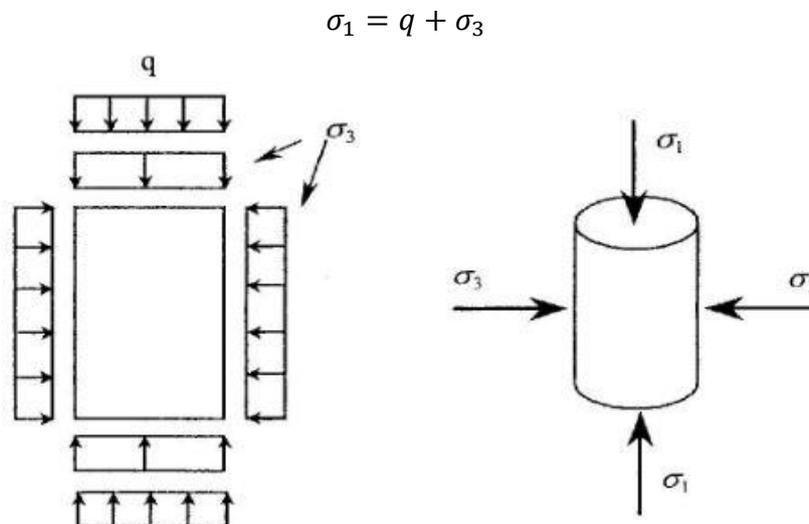


Fig.III.6.2.1 : sollicitation mécanique dues au passage d'une charge roulante.

### III.6.3 Principe de l'essai Triaxial à Chargement répété

Cet essai consiste appliquer une éprouvette une pression de confinement (obtenue par l'air comprime) et un déviateur (délivre par un vérin pneumatique) durant un grand nombre de cycles de chargement. La contrainte latérale  $\sigma_3$  (contrainte principale minimale) est obtenue par la pression du fluide de la cellule. La contrainte principale maximale  $\sigma_1$  est la somme de la pression du fluide et de la contrainte de chargement axiale



La procédure de l'essai du module réversible suit les étapes suivantes:

- L'échantillon est placé dans une membrane à l'intérieur d'un moule de façon à obtenir la densité voulue,

- Le chargement consiste en une impulsion de charge de 0,1 sec et une période de repos de 0,9 sec;
- Des séquences de 200 chargements sont appliquées à différents niveaux de contrainte pour conditionner l'échantillon;
- Une séquence de 200 chargements est ensuite appliquée à l'échantillon pour chacune des conditions suivantes:

Pression de Confinement  $\sigma_3$  (KPa) Déviateur  $\sigma_d$ (kPa)

138	69, 138, 207 et 276
103	69, 138, 207 et 276
69	34, 69, 138 et 207
34	34,69 et 103

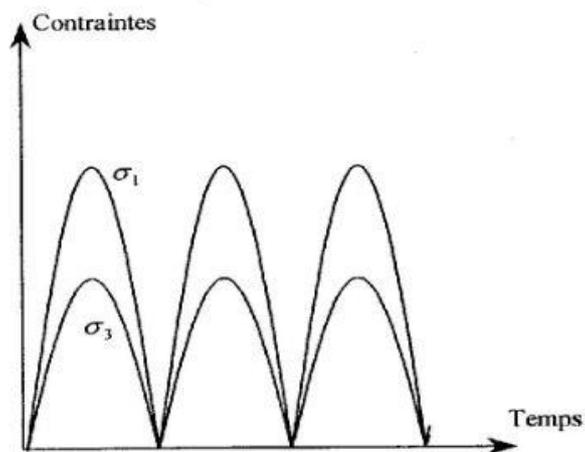


Fig.III.6.3.1 : principe de l'essai T.C.R

On distingue deux méthodes dans la pratique de l'essai triaxial a chargement répètes

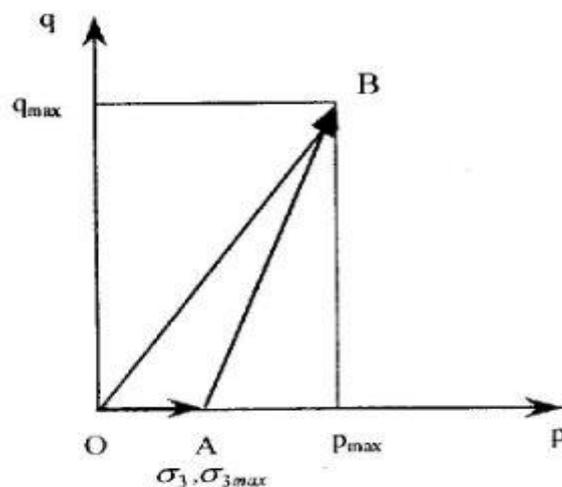


Fig.III.6.3.2.essai CLC et CLV

**Essai CLC :**

Pour l'essai effectué à contrainte latérale constante (CLC), on applique une pression de confinement  $\sigma_3$  constante (vecteur OA), et par suite le déviateur des contraintes  $q = \sigma_1 - \sigma_3$  variant cycliquement entre 0 et une valeur maximale (vecteur AB).

L'essai CLC est un cas particulier de chargement réel à condition que  $\sigma_3$  reste au plus égale à 15 kpa à la base de la couche de fondation, ce qui correspond à la contrainte due au poids propre de la chaussée.

On note que :

$$p = \frac{(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{3} = q/3 + \sigma_3$$

Ce qui donne :

$$p_{max} = q_{max}/3 + \sigma_{3\ max}$$

D'où une pente égale à 1/3 pour le vecteur AB.

**Essai CLV :**

Pour l'essai effectué à contrainte latérale variable (CLV), la pression de confinement  $\sigma_3$  varie cycliquement de 0 à  $\sigma_{3\ max}$  en phase avec le déviateur des contraintes  $q$ , qui lui varie toujours entre 0 et  $q_{max}$ . (vecteur OB)

L'essai CLV correspond le mieux au chargement appliqué sur une chaussée réelle.

**III.7 Modélisation des graves non-traitées**

Le comportement des sols et des matériaux granulaires soumis à un chargement répété est complexe. Chaque application de la charge provoque une certaine déformation du matériau qui est partiellement réversible lors de la suppression de la charge. La déformation réversible après chaque application de la charge est à peu près constante et est assimilée une déformation élastique, tandis que la déformation non-réversible s'accumule

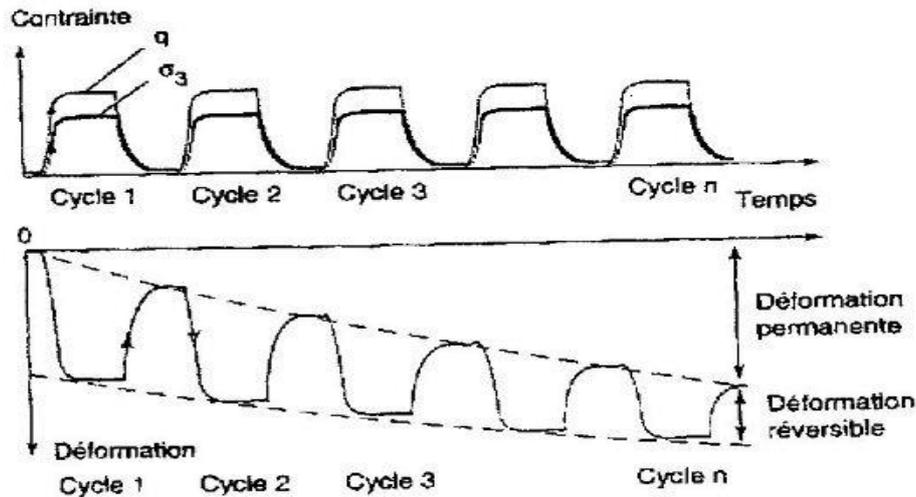


Fig.III.7.1 : déformation d'un matériau sous chargements cycliques.

Il y a trois processus qui peuvent contribuer à la déformation d'un matériau granulaire:

- les déformations des particules autour des points de contact.
- Le glissement des particules aux points de contact.
- l'écrasement des particules aux points de contact.

Toutefois, on considère que seules les déformations des particules sont responsables des déformations élastiques, car l'écrasement, processus irréversible, est éliminé, ainsi que le glissement des particules puisqu'il correspond à une certaine dissipation d'énergie.

### III.8 Relation module réversible-contrainte

L'essai triaxial permet de déterminer une relation entre le module réversible et la contrainte appliquée pour donner des modèles. Il permet aussi de reproduire les cheminements de contraintes les plus complexes susceptibles de se retrouver sur le terrain.

Plusieurs modèles sont développés pour le calcul du module réversible des sols de plates-formes et des matériaux granulaires utilisés pour couches d'assises. Ainsi nous avons:

#### III.8.1 Modèle $K - \theta$ (matériaux à gros grains) :

Ce modèle est le plus fréquemment utilisé, et surtout pour les matériaux à gros grains

$$M_r = k_1 \times \theta^{k_2}$$

$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_1 + 2 * \sigma_3$  en Kpa , somme de contraintes .

$\sigma_1$  est la contrainte majeure verticale,  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$  contrainte horizontale moyenne et contrainte mineure de confinement en laboratoire.

$k1, k2$  coefficients élastiques non linéaires déterminés expérimentalement.

Le coefficient de Poisson est considéré constant et est généralement pris égal à 0,3.

### III.8.2 Modèle $K - \sigma_d$ (matériau à grains fins)

$$Mr = k1 \times \sigma_d^{k2}$$

$Mr$  est le module réversible en kPa

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$  Contrainte déviatorique en KPa.

$k1, k2$  coefficients élastiques non linéaires déterminés expérimentalement.

### III.8.3 Modèle d'Uzan et Witczak (1988)

C'est le modèle le plus représentatif des matériaux granulaires car il tient compte des effets de la résistance au cisaillement des matériaux.

$$Mr = k1 \times \theta^{k2} \times \sigma_d^{k3}$$

$Mr$  est le module réversible en kPa

$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_1 + 2 * \sigma_3$  en Kpa , somme de contraintes

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$  Contrainte déviatorique en kPa.

$k1, k2, k3$  coefficients élastiques non linéaires déterminés expérimentalement.

Le coefficient de Poisson est aussi pris constant égal à 0.3.

### III.8.4 Modèle Modified Universel (NCHRP 2002)

Comme partie de développement du nouveau guide de conception des chaussées ASSHTO 2002 Andrei et al. (2004) ont examinés un nombre de différents formulations Log-Log et semi-Log de 2 paramètres à 5 paramètre et on conclut que la meilleur représentation de  $Mr$  on terme d'exactitude, implémentation et stabilité numérique était le modèle que l'on nomme modified universel ou modified ASSHTO est donné par la formule :

$$Mr = k1 \times Pa \times \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{k2} \times \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{k3}$$

Ou  $Mr$  est le module réversible en kPa

$Pa$  est la pression atmosphérique.

$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$  en Kpa , somme de contraintes

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}$$

Dans un cas axisymétrique

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_d$$

Et  $k_1, k_2, k_3$  coefficients élastiques non linéaires déterminés expérimentalement.

[Morgan (1966)] et [Hick et Monismith (1971)] ont réalisé des essais avec mesure de déformations radiales. Le coefficient de Poisson du comportement résilient peut être aussi calculé ( $\nu = -\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1}$ ). Il a été montré expérimentalement que le coefficient de Poisson dépend du rapport de contrainte  $q/p$ . D'autre part, des valeurs supérieures à 0.5 ont été observées et il a été suggéré que ceci est dû à l'anisotropie.

La détermination des paramètres des modèles se fait par différentes techniques de régressions linéaires, multi-linéaire, non-linéaire, non-linéaire multiple et des techniques de minimisation avec poids. Cette opération est appelée calage de modèle.

### III.9 Modélisation du sol support

Le sol support peut être considéré comme un matériau granulaire particulier avec une granulométrie plus étendue. Sa réponse aux chargements peut être très dépendante d'une certaine manière des conditions hydriques, de son histoire, etc... Le matériau sol a un comportement non-linéaire, qui se complique lors du dimensionnement par ses variations dans le profit en long de la chaussée et dans son état hydrique suivant les saisons.

L'utilisation d'une théorie élastique linéaire requière la connaissance de la valeur du module réversible, valeur qui affecte clairement le dimensionnement. Pour cela existe, comme pour les graves non-traitées, deux approches : rapproche empirique utilisant la notion d'indice de portance CBR et l'approche rationnelle qui caractérise cette rigidité l'aide des essais à chargements répétés.

#### III.9.1 L'approche empirique

Le sol support est le seul matériau dans la structure de chaussée qui est imposé, et de ce fait, il est le point de départ dans le processus de dimensionnement. L'approche la plus largement utilisée dans ce cas pour évaluer la rigidité  $E_r$  du sol est de la relier à l'indice de portance  $C.B.R.$  sous la forme générale suivante :

$$E_r = K \times CBR \quad (\text{MPa})$$

Dans certains cas, la valeur de la constante  $K$  est elle-même fonction du CBR, mais la relation la plus utilisée reste celle proposée par Heukelom et Klomp basée sur la corrélation des essais CBR avec des essais dynamiques in situ :

$$E_r = 10 \times CBR \quad (\text{MPa})$$

Il y a plusieurs objections à cette simple procédure. D'abord, l'essai CBR est un essai de pénétration sur une petite surface de sol chargée jusqu'à la rupture et ne présente pas les conditions de chargement dues au trafic on le niveau de contraintes répétées est bien inférieur à la contrainte de rupture. D'autre part, cet essai ne mesure pas la courbe caractéristique contraintes-déformations et les résultats sont beaucoup influencés par les conditions hydriques. Ainsi, la relation précédente est loin d'être satisfaisante, mais son grand avantage est sa simplicité.

### III.9.2 L'approche rationnelle

De façon similaire aux graves non-traitées, la caractérisation de la rigidité du sol requière des essais triaxiaux à chargements répétés sous des conditions appropriées. Fondamentalement, les mêmes principes du comportement non-linéaire s'appliquent au matériau sol considéré comme un cas particulier des matériaux granulaires.

Comme pour les graves non-traitées, une approche utilisant un module du type K-G semble être la plus prometteuse pour caractériser avec précision les propriétés réversibles du sol support.

Brown a montré que le module réversible non-linéaire  $M_r$ , d'un sol cohérent est relié aux contraintes par la relation :

$$M_r = \frac{K}{(q_r/p_0)^n}$$

Où  $K$  et  $n$  sont les constantes du sol,  $q$  le déviateur répété des contraintes du au trafic et  $p_0$  la contrainte effective moyenne dans le sol due au poids propre.

A partir de l'étude des modèles de comportement de graves et de sols, ressort que pour une modélisation rationnelle de la structure de chaussée, il est nécessaire de tenir compte des propriétés intrinsèques des matériaux qui la composent. Ainsi, on a été amené à choisir, entre les modèles de comportements discutés précédemment, nous avons opté pour les modèles K-O, ce choix a été motivé par la considération suivante : la compatibilité de ce modèle avec les lois de la Mécanique (existence d'un potentiel élastique). Il donne de bonnes corrélations avec les résultats expérimentaux effectués au triaxial chargements répétés, pour les graves non-traitées.

## Chapitre IV :

### IV.1 Introduction :

Plusieurs codes ont été développés pour étudier la non-linéarité des couches granulaires, la plupart de ces codes ont été basés sur la méthode des éléments finis. Cette méthode est très puissante en termes de précision et de temps de calcul, mais sa programmation dans le cas non linéaire un peu fastidieuse. Alors plusieurs chercheurs ont adopté d'autres méthodes telles que la méthode de Yang H.HUANG (1968).

Pour étudier l'effet de la non linéarité des matériaux granulaires sur les contraintes, les déformations verticales et les déflexions, Yang H.HUANG divisait le demi espace en plusieurs couches et applique la théorie de Burmister pour déterminer les contraintes au milieu de chaque couche. Une fois les contraintes obtenues le module de chaque couche est déterminé selon le modèle de non-linéarité utilisé.

Au début un module élastique est supposé pour chaque couche et les contraintes sont obtenues par la théorie des couches. En se basant sur ces contraintes nous pouvons calculer le nouveau module par l'équation des modèles de non linéarité et une nouvelle série de contraintes est ensuite calculée. Le procédé est répété jusqu'à ce que le module entre deux itérations consécutives convergentes à une tolérance spécifiée. Il existe un logiciel que permet le calcul des chaussées avec couches non linéaire, c'est le programme KENLAYER développé par Yang H.HUANG.

### IV. 2 Description de logiciel de base de notre programme

KENLAYER est un programme informatique développé à Université de Kentucky et utilisé pour la solution d'un système élastique multicouches sous une région circulaire chargée. Le principe du calcul de ce logiciel est basé sur la théorie de Burmister d'un system multicouches élastique comme d'autres programmes basés sur la méthode analytique.

Les solutions sont superposées pour les chargements multiples comme double roues (essieu) ou double tandem. La supériorité de KENLAYER sur les autres programmes utilisant la théorie multicouche élastique de Burmister est sa capacité de résoudre des systèmes linéaires élastiques, non-linéaires-élastiques ou viscoélastique. le Programme exécute aussi l'analyse du dégât pour évaluer la durée de vie de conception étant donné le dégât causé par fatigue par fissuration ou les déformations

permanentes en utilisant des expressions de base données par des modèles de performance tel que celle données par Asphalt Institute.

Dans son dimension présente, il peut être appliqué à un maximum de 19 couches avec sortie à 25 coordonnées radiales différentes et 19 coordonnées verticales différentes, ou un total de 475 points. Pour faciliter l'entrée et édition des données, un programme nommé LAYERINP (distribué dans le même package) est utilisé. Le programme utilise des menus et des formes pour l'entrée des données dans l'ordre pour créer et éditer le fichier des données (input file). Bien que le grand nombre de paramètres d'entrée paraisse par défaut et sont fournies à beaucoup d'eux, mais il y a un nombre limité d'entrées sera exigé à fournir.

### **IV.3 L'analyse non linéaire en utilisant Kenlayer**

Il est bien connu que les matériaux granulaires sont modélisés par un comportement non-linéaire réversible qui varie avec l'état de contrainte. Le module réversible des matériaux granulaires augmente avec l'augmentation de l'intensité de contrainte. Si le rapport entre le module réversible et l'état de chargement est donné, une méthode d'approximations successives peut être utilisée.

Un inconvénient majeur de la théorie élastique multi couches est la supposition que chacune des couches est homogène avec les mêmes propriétés partout dans la couche. Cette supposition rend l'analyse des systèmes posés en couches et composé de matériaux non-linéaire difficile.

Pour considérer ce comportement des matériaux granulaires dans cette phase d'analyse, les développeurs de KENLAYER ont inclus le module de l'analyse non-linéaire pour les matériaux non linéaire. Cette approche peut être expliquée brièvement par cet organigramme simple.

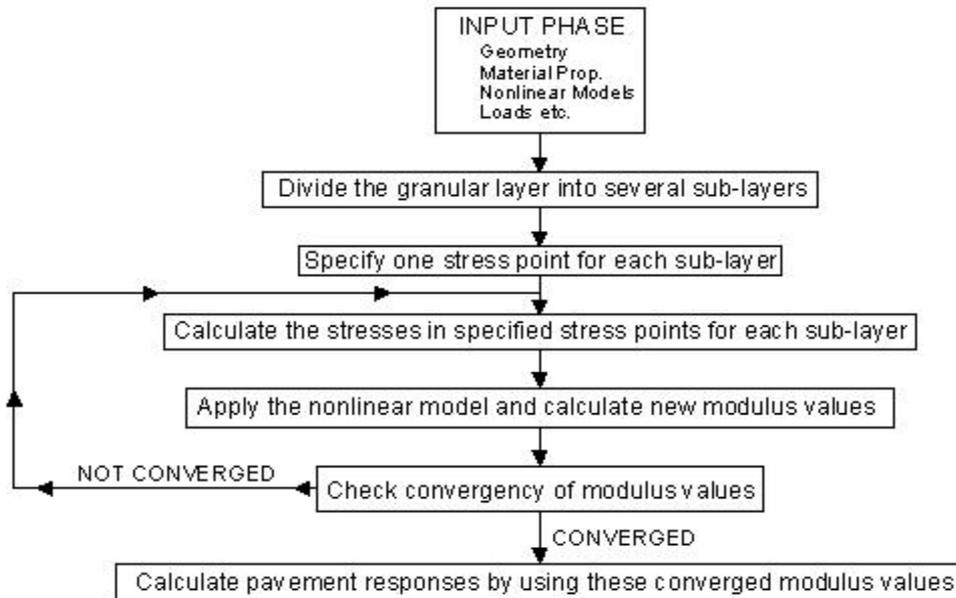


Fig.IV.3.1. les étapes de l'approximation itérative inclus dans KENLAYER

Le modèle de non linéarité mécanique employé dans KENLAYER est le modèle K-O k1 et k2 étant des paramètres de modèle sont définis dans l'étape de l'entrée pour chaque sous couche. L'utilisateur peut définir au maximum 12 couches non-linéaires dans KENLAYER. Comme expliqué avant, le module élastique de chaque couche non-linéaire est déterminé depuis un point désigné. Alors, la question qui survient : "Quel point dans la couche non linéaire devrait être sélectionnée pour représenter la couche entière?". Comme est habituellement dans la conception de chaussée, un point près de l'axe de la charge appliquée peut être raisonnablement sélectionné. Dans ce qui suit, parce que les réponses sont calculées sous une seule charge de roue, les points juste à les mi- profondeurs de chaque sous couche le long du axe du chargement circulaire sont sélectionnés comme points du contrainte (calcul de module réversible). La figure est une représentation graphique de ce type d'analyse.

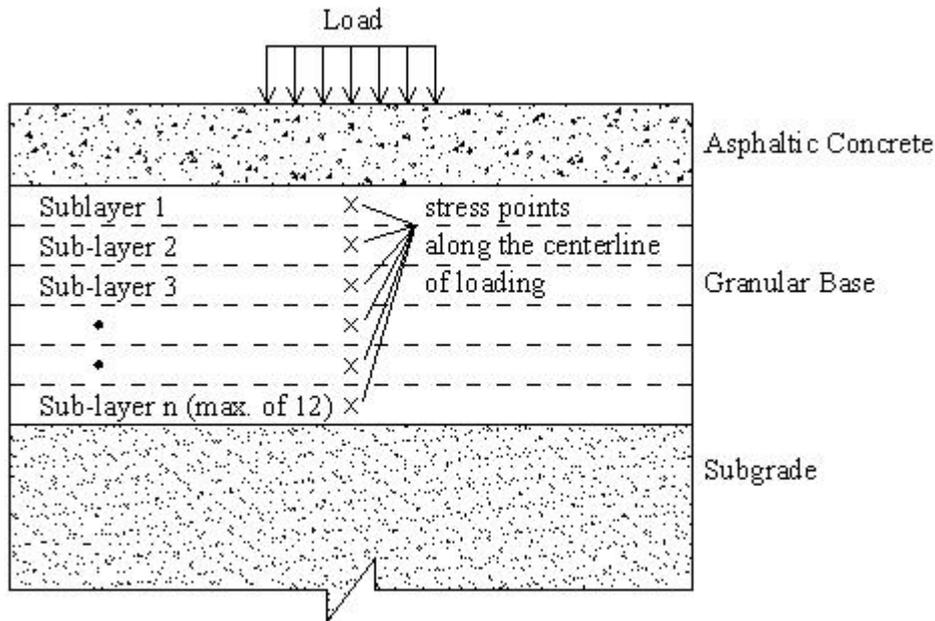


Fig.IV.3.2. Principe de l'approche itérative simplifiée utilisée dans KENLAYER

Cette approche simplifiée pour la modélisation des caractéristiques dépendantes de la contrainte des matériaux granulaires ne représente pas réellement le comportement in-situ du matériau. Puisque KENLAYER est un programme basé sur la théorie élastique multicouche, les valeurs des modules de chaque sous couche sont encore supposé être constant horizontalement, mais dans la réalité, le module réversible varie d'un point à un autre avec l'état de contrainte dans une même couche granulaire.

Par conséquent pour représenter le comportement réel des matériaux granulaires sous condition de la charge, la variation du module réversible le long de la direction radiale devraient aussi être prises en considération en plus de variation le long de la direction verticale. Comme expliqué plus tôt, ce type d'analyse peut être performé en utilisant la technique des éléments finis où les paramètres du matériau peuvent être définis séparément pour chaque élément.

C'est bien connu que les matériaux granulaires n'ont pas une résistance à la traction. Mais quand ils sont utilisés comme base ou couches de forme sur un sol support plus faible, les contraintes horizontales dues aux charges appliquées sont très probablement en tension. Cependant, ces matériaux peuvent prendre encore la tension si la tension est plus petit que la précompression causé par la géostatique ou autre contraintes in-situ. Le module résistant d'un matériau granulaire ne dépend pas de la contrainte due au chargement seulement mais dépend d'une combinaison de contrainte due au chargement et précompression. La combinaison des contraintes horizontales ne peut pas devenir négatif, (KENLAYER utilise les conventions de la mécanique des sols : signe positif pour la compression et négatif pour la traction)

parce que, quand il est réduit à zéro, les particules se séparent et aucune des contraintes existera.

Par conséquent, après que la couche granulaire soit subdivisée en plusieurs couches et les contraintes à la mi profondeur de chaque couche sont calculées, si la contrainte horizontale compris les contraintes géostatiques est négatif ou en traction, il est mis à zéro. Cette modification de la contrainte est nécessaire à éviter des  $\theta$  négatifs. Par conséquent l'invariant de contrainte défini précédemment comme la somme de trois contraintes normales devrait être modifié en prenant compte du poids propre des couches de system. Cela donne :

$$\theta = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z + \gamma z (1+2 K_0)$$

$$K_0 = \frac{\mu}{\mu-1}$$

#### IV. 4 Le programme développé

Avec la même méthode que le programme KENLAYER traite les couches non-linéaire avec le modèle K-O on a travaillé, mais avec d'autres modèles de non-linéarité mécanique. Le programme est développé en utilisant le langage informatique C# (2002) pour vaincre quelque limitation du programme informatique KENLAYER. On parle des limitations :

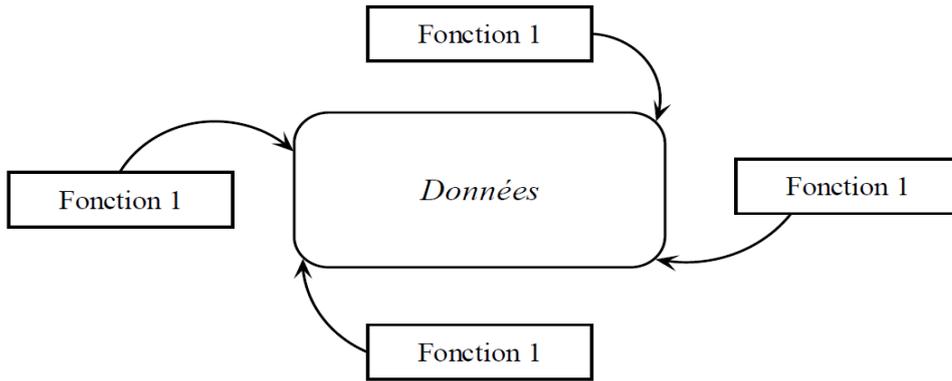
- Sur le nombre de couches non-linéaire.
- Les modèles de non-linéarité des matériaux granulaires utilisés dans les couches de base.

La première limitation n'engendre pas de grandes erreurs, mais concernant la deuxième, on trouve dans la littérature plusieurs modèles de non-linéarité mécanique qui ont un support théorique très puissant (modèles de Boyce, Coulibaly ...) et que donnent des bons résultats par les régressions (modèles K-O, Uzan, Modified AASHTO, Dresden ...)

Le langage qu'on développe le logiciel avec, est un langage orienté objet, et pour qu'on puisse suivre on donnera une petite introduction sur les langages orienté objet.

##### IV. 4.1 Les concepts de la programmation orienté objet :

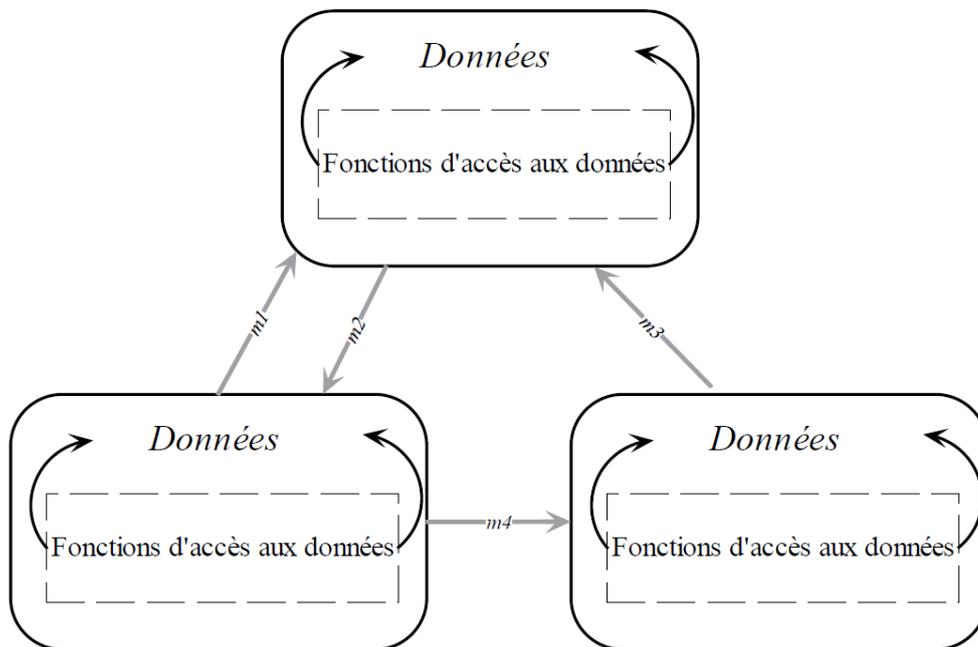
**Différence à la programmation procédurale :** La programmation procédurale (C, Fortran, Pascal, Basic, ...) est constituée d'une suite d'instructions (souvent réunies en fonctions ou procédures (subroutine) exécutées par une machine. Ces instructions ont pour but d'agir sur des données pour produire un effet quelconque.



Les fonctions, procédures et autres suites d'instructions accèdent à une zone où sont stockées les données. Il y a donc une dissociation entre les données et les fonctions ce qui pose des difficultés lorsque l'on désire changer les structures de données.

Dans les langages procéduraux, les procédures s'appellent entre elles et peuvent donc agir sur les mêmes données provoquant ainsi des effets de bord. De ces problèmes sont issus une autre manière de programmer : la programmation par objet.

**Les objets :** Un programme est vu comme un ensemble d'entités, une société d'entités. Au cours de son exécution, ces entités collaborent en s'envoient des messages dans un but commun.



Nous avons dans ce schéma un lien fort entre les données et les fonctions qui y accèdent (tant pour les consulter que pour les créer).

Un objet représente une entité du monde réel, ou de monde virtuel dans le cas d'objets immatériels, qui se caractérisent par une identité, des états significatifs et par un

comportement. L'identité d'un objet permet de distinguer les objets les uns par rapport aux autres. Son état correspond aux valeurs de tous les attributs à un instant donné. Ces propriétés sont définies dans la classe d'appartenance de l'objet. Enfin, le comportement d'un objet se définit par l'ensemble des opérations qu'il peut exécuter en réaction aux messages envoyés (un message = demande d'exécution d'une opération) par les autres objets. Ces opérations sont définies dans la classe d'appartenance de l'objet.

Les avantages des propriétés ci-dessus sont multiples :

- meilleure modularité. Les communications entre objets sont réalisées par le biais d'opérations d'interface.
- meilleure sécurité. Le code de chaque méthode ne s'applique que sur les données de l'objet. Certaines parties de l'objet ne sont pas accessibles pour certains (et n'ont pas d'ailleurs à être connues).
- meilleure conception. Les données et les méthodes sont spécifiées en même temps.
- meilleure lisibilité. Les données et les méthodes sont décrites au même endroit.
- meilleure portabilité. Les parties masquées pourront être modifiées sans que l'utilisateur n'ait à changer son code puisqu'il n'a pas directement accès à celles-ci. C'est ici que l'on pourra mettre des points dépendant des machines.

Un langage est orienté objet s'il possède les mécanismes supportant le style de programmation orienté objet, c'est à dire, s'il autorise les facilités inhérentes à ce type de programmation, on peut citer par exemple : C++, JAVA, C# et les dernières versions de Fortran.

#### **IV. 4.2 Organisation du programme :**

Le programme est devisé en 3 classes principales :

- La classe Keninp qui s'occupe de la lecture, écriture et manipulation des fichiers d'entrée du programme KENLYER.
- La classe Kenout qui s'occupe de la lecture de la manipulation des fichiers de sortie du programme KENLAYER.
- La classe Program qui s'occupe du reste du travail (faire l'analyse linéaire par le programme KENLAYER, calcul des erreurs, calcul des nouveaux modules réversibles)

Nous allons maintenant détailler les propriétés et le fonctionnement de chaque méthode des classes citées :

- La classe Keninp : cette class dispose des propriétés suivantes :

- NL : nombre des couches du system analysé.

- NZ : nombre des points verticaux pour le calcul des contraintes.
- NR : nombre des points radiaux pour le calcul des contraintes.
- TH : c'est un vecteur de NL-1 valeur qui contient les épaisseurs des couches, l'épaisseur de la NL<sup>ième</sup> couche étant d'épaisseur infinie.
- PR : c'est un vecteur de NL valeur qui contient les coefficients de Poisson pour chaque couche
- E : c'est un vecteur de NL valeur qui contient les module élastique (ou réversible en cas des couches non-linéaires) pour chaque couche
- ZC : c'est un vecteur de NZ valeur qui contient les coordonnées verticales de chaque point d'analyse.
- RC : c'est un vecteur de NR valeur qui contient les coordonnées radiales de chaque point d'analyse.
- CR : la valeur du rayon de chargement.
- RC : la valeur de l'intensité de chargement.

Pour la manipulation de ces données cette classe dispose des méthodes suivantes :

- La méthode `Read` : cette méthode est responsable de la lecture d'un fichier « \*.dat » dont la structure est celle d'un fichier input du programme KENLAYER puis elle enregistre les valeurs des variables dans les propriétés citées avant sous forme de valeurs numériques. Elle a comme argument le nom du fichier à lire.
- La méthode `Print` : cette méthode est responsable de la l'écriture des propriétés citées avant dans un fichier « \*.dat » dont la structure est celle d'un fichier input du programme KENLAYER. Elle a comme argument le nom du fichier à écrire.
- La méthode `AddLayer` : cette méthode s'occupe de l'ajout d'une couche en variant les propriétés citées avant.
- La méthode `RemoveLayer` : cette méthode s'occupe de l'ajout d'une couche en variant les propriétés citées avant.
- La méthode `DivideLayer` : cette méthode s'occupe de la division d'une couche en variant les propriétés citées avant.

Après que le programme KENLAYER fait l'analyse linéaire d'un fichier input, il va enregistrer un autre fichier output ou-il mit les résultats d'analyse (contraintes, déformations, déplacement verticaux) dans les points spécifiés dans le fichier input. Pour manipuler ces fichiers on a conçu la classe Kenout

- La classe Kenout : cette class dispose des propriétés suivantes :

- **VSTRS** : c'est un vecteur de  $NZ \times NR$  de valeurs qui contient les valeurs des contraintes normales verticales dans les points analysés.
- **VSTRN** : c'est un vecteur de  $NZ \times NR$  de valeurs qui contient les valeurs des déformations normales verticales dans les points analysés.
- **VDISP** : c'est un vecteur de  $NZ \times NR$  de valeurs qui contient les valeurs des déplacements verticales dans les points analysés.
- **RSTRS** : c'est un vecteur de  $NZ \times NR$  de valeurs qui contient les valeurs des contraintes normales radiales dans les points analysés.
- **RSTRN** : c'est un vecteur de  $NZ \times NR$  de valeurs qui contient les valeurs des déformations normales radiales dans les points analysés.
- **SSTRS** : c'est un vecteur de  $NZ \times NR$  de valeurs qui contient les valeurs des contraintes normales verticales dans les points analysés.
- **SSTRN** : c'est la valeur de la déformation tangentielle dans le point analysé.

Pour la manipulation de ces données cette classe dispose des méthodes suivantes :

- La méthode **Read** : cette méthode est responsable de la lecture d'un fichier « \*.txt » dont la structure est celle d'un fichier output du programme KENLAYER puis elle enregistre les valeurs des variables dans les propriétés citées avant sous forme de valeurs numériques. Elle a comme argument le nom du fichier à lire.

Malgré que les classes citées jusqu'ici ne sont pas la partie principale du programme, mais leur conception était nécessaire pour manipuler les fichiers.

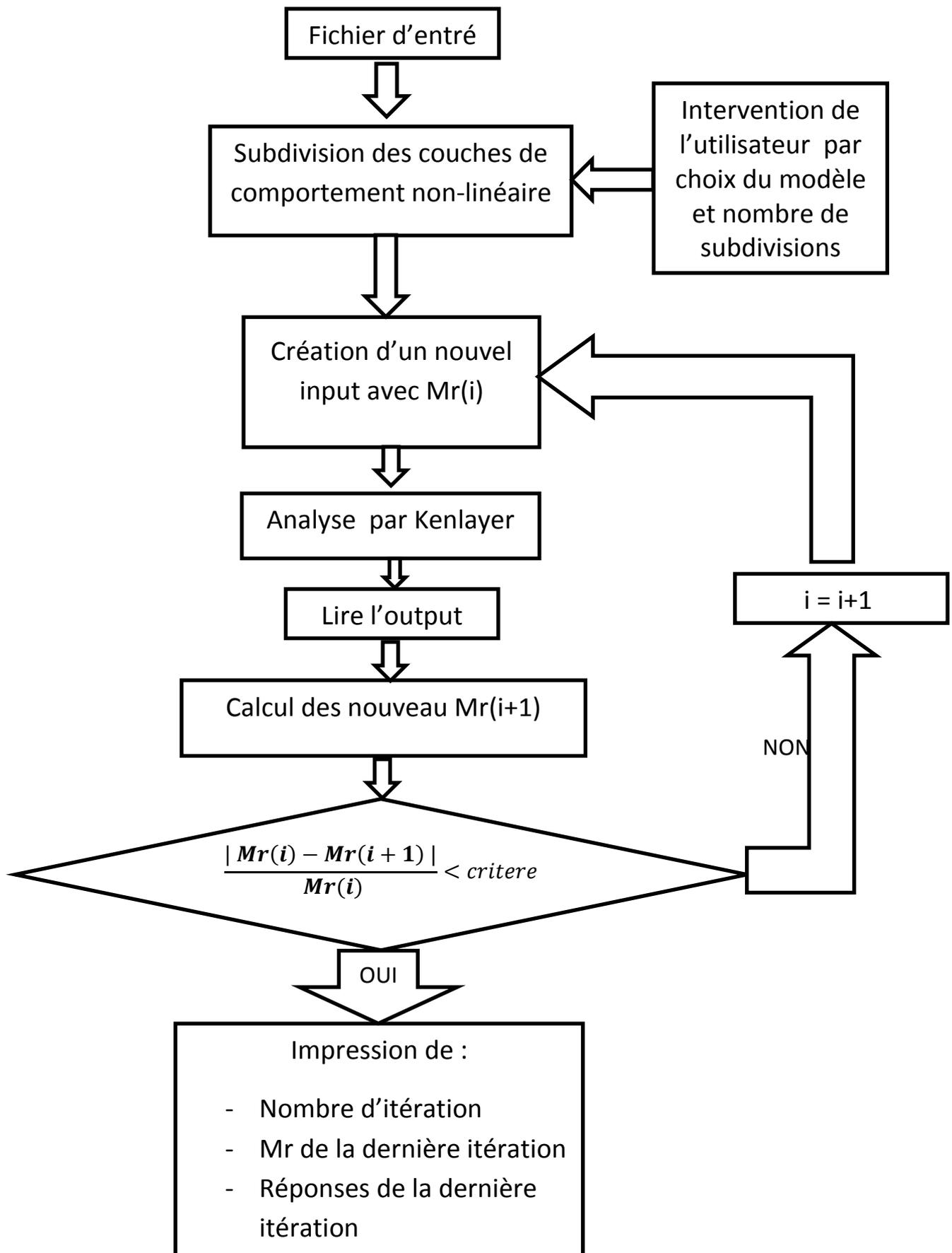
- La class qui suit est la classe principale du notre programme. Elle dispose des propriétés suivantes :
  - **K1** : c'est un vecteur dont le nombre des éléments est choisis par l'utilisateur, il contient les valeurs de k1 pour paramètre de non-linéarité mécanique pour les modèles K-O,Uzan , Modified Universel.
  - **K2** : c'est un vecteur dont le nombre des éléments est choisis par l'utilisateur, il contient les valeurs de k2 pour paramètre de non-linéarité mécanique pour les modèles K-O,Uzan et Modified Universel.
  - **K3** : c'est un vecteur dont le nombre des éléments est choisis par l'utilisateur, il contient les valeurs de k3 pour paramètre de non-linéarité mécanique pour les modèles Uzan ,Modified Universel.

- `Model` : c'est un vecteur dont le nombre des éléments est choisis par l'utilisateur, il contient les valeurs {1, 2, 3} qui signifie {K-O, Uzan, Modified Universel}
- `Devisions` : c'est un vecteur dont le nombre des éléments est choisis par l'utilisateur, il contient le nombre de devisions des couches non-linéaires.
- `In` : c'est un objet de la classe `Keninp` qu'on va manipuler.
- `Outt` : c'est un objet de la class `Kenout` qu'on va manipuler.
- `Proc` : c'est un objet de la class `System.Process` pour la gestion des processus externes dans notre cas le programme `KENLAYER`.

Pour la manipulation de ces données cette classe dispose des méthodes suivantes :

- `CalculError` : cette méthode calcule les erreurs relatives sur les modules réversibles des couches non-linéaires selon une norme donnée. elle a comme argument deux vecteurs que sont les anciens modules réversibles et les nouveaux modules réversibles
- `CalculMr` : cette méthode calcule les nouveaux modules réversibles depuis les anciens modules réversibles selon les modèles choisissés. Elle a comme argument les anciens modules réversibles, les paramètres des modèles, les types des modèles.
- `Main1` : cette méthode est la méthode principale, elle contient une boucle qui contient comme paramètre de test l'erreur calculés par la méthode `CalculError`. Et à chaque itération elle crée un objet `In` de type (classe) `Keninp` puis utiliser la méthode `Print` pour créer un fichier « \*.dat » et en utilisant l'objet `Proc` en fait un appelle `Windows` du programme `KENLAYER` pour qu'il fait une analyse linéaire du fichier « \*.dat » , ce programme vas créer un fichier output « \*.txt » .en utilisant l'objet `Outt` de la class `Kenout` et sa méthode `Read` en peut obtenir l'état de contrainte des points analysé et comme ça on utilisant la méthode `CalculMr` on peut obtenir les nouveaux modules réversibles el les erreurs avec `CalculError` .ces nouveaux modules réversibles vont être réutilisé dans un nouveau objet `In` alors un nouvelle analyse et vice versa jusqu'à obtenir le seuil d'erreur définis comme critère de convergence .

Tous ce qu'était dit peut être résumé dans l'organigramme suivant :



**Remarque** : l'organigramme et les classes avec leurs propriétés et leurs méthodes est une simplification du programme réel, car le programme réel contient d'autres classes et d'autres méthodes et propriétés liées à la programmation Windows et le graphisme.

#### IV. 5 Simulations :

Pour valider le programme conçu, on a utilisé des structures de la littérature et on va l'analyser avec le module de traitement de non-linéarité de KENLAYER et avec le programme développé selon le model K-O et Uzan (voir l'annexe)

Pour tous ce qui vas suivre on considère un charge règlementaire de 65KN distribué sur un disque de diamètre de 35 Cm (pression de 675.6 KPa).

Structure S1	Epaisseurs Cm	Modules MPa	Coeff Poisson	Modèle K-O		Model Uzan		
				K1	K2	K1	K2	K3
B.bitumineux	6	3500	0.35	-	-	-	-	-
G.N.T	15	240	0.33	420	0.29	425	0.22	0.07
Sol support	$\infty$	50	0.45	-	-	-	-	-

Tab IV.5.1. La structure de chaussée S1

Les résultats d'analyse (les critères de dimensionnement) sont :

Structure S1	W (mm)	$\varepsilon_t (10^{-6})$	$\varepsilon_v (10^{-6})$
Linéaire élastique	1.6558	466.5	2732
K-O par kenlayer	1.8440	606.0	3062
K-O par le programme développé	1.8427	611.2	3067
Uzan par le programme développé	1.8044	579.6	3017

Tab IV.5.2. Critères de dimensionnement calculés pour la structure S1

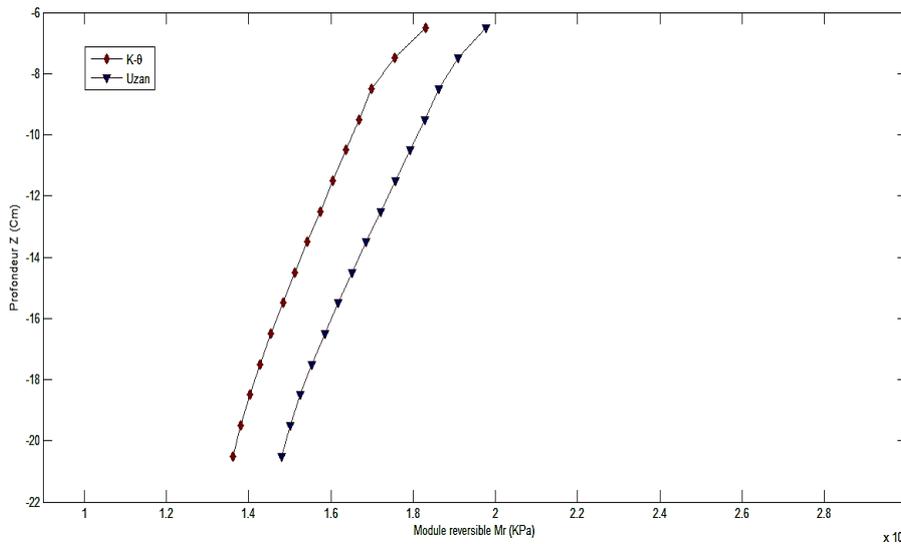


Fig.IV.5.1. variation de Mr dans la structure S1

La 2<sup>ème</sup> structure est la structure S2. Elle est décrite comme suit :

Structure S2	Epaisseurs Cm	Modules MPa	Coeff Poisson	Modèle K-O		Model Uzan		
				K1	K2	K1	K2	K3
B.bitumineux	12	3500	0.35	-	-	-	-	-
G.N.T	30	240	0.33	420	0.29	425	0.22	0.07
Sol support	∞	50	0.45	-	-	-	-	-

Tab IV.5.3. : La structure de chaussée S2

Les résultats d’analyse (les critères de dimensionnement) sont :

Structure S2	W (mm)	$\epsilon_t (10^{-6})$	$\epsilon_v (10^{-6})$
Linéaire élastique	0.975	322.5	894
K-O par kenlayer	1.1355	429.0	1031
K-O par le programme développé	1.1701	430.6	1032
Uzan par le programme développé	1.1439	415.5	1024

Tab IV.5.4. Critères de dimensionnement calculés pour la structure S2

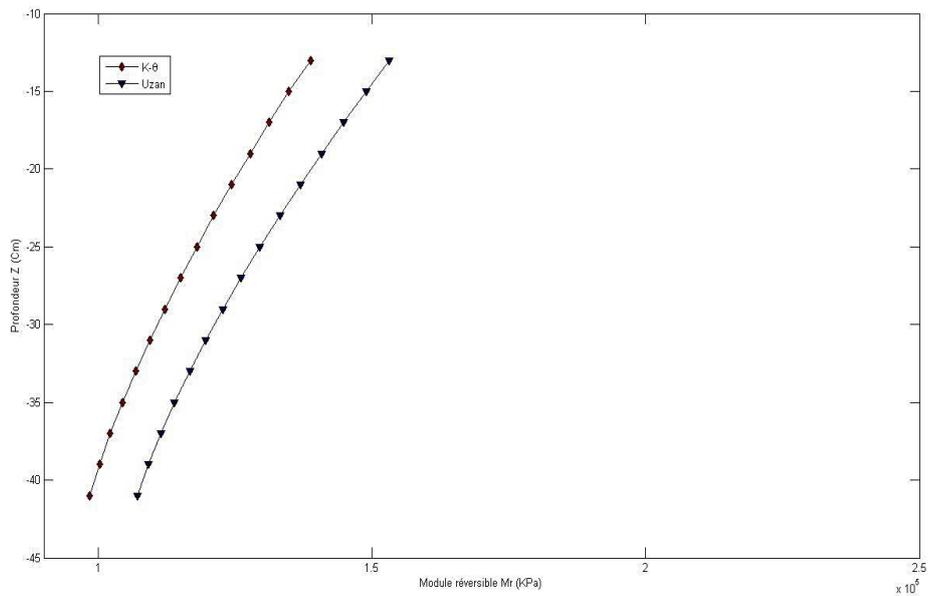


Fig.IV.5.2. variation de Mr dans la structure S2

La 3<sup>ième</sup> structure est la structure S3. Elle est décrite comme suit :

Structure S3	Epaisseurs Cm	Modules MPa	Coeff Poisson	Modèle K-O		Model Uzan		
				K1	K2	K1	K2	K3
B.bitumineux	20	3500	0.35	-	-	-	-	-
G.N.T	60	240	0.33	420	0.29	425	0.22	0.07
Sol support	∞	50	0.45	-	-	-	-	-

Tab IV.5.5. : La structure de chaussée S3

Les résultats d'analyse (les critères de dimensionnement) sont :

Structure S3	W (mm)	$\epsilon_t (10^{-6})$	$\epsilon_v (10^{-6})$
Linéaire élastique	0.6025	189.6	287.1
K-O par kenlayer	0.7615	256.9	343.9
K-O par le programme développé	0.7963	257.4	344.1
Uzan par le programme développé	0.7765	250.6	343.3

Tab Tab IV.5.6. : Critères de dimensionnement calculé pour la structure S3

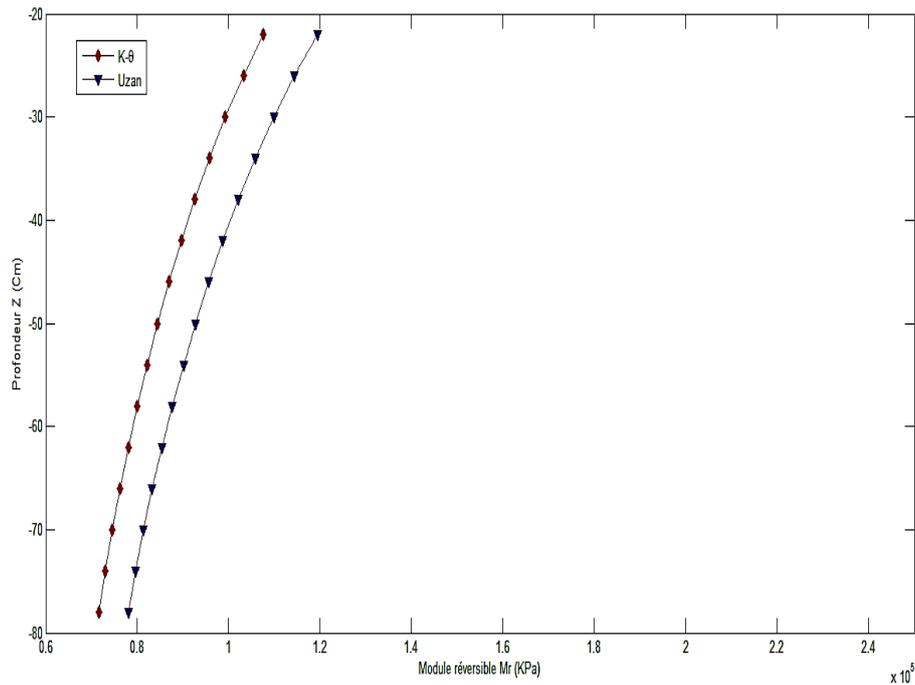


Fig.IV.5.3. variation Mr dans la structure S3

On voit des figures précédentes que les graves non-traités ont un comportement non-linéaire, cette non linéarité varie d'un cas à un autre. Elle est forte dans les structures ayant de minces couches de couches de surface (béton-bitumineux), elle est moyenne dans les structures de chaussées ayant des couches de béton bitumineux d'épaisseur moyenne et elle est faible pour les structures dont l'épaisseur de la couche bitumineuse est importante.

### Conclusion et recommandations :

Pour tous les structures étudiées on a constaté que le calcul linéaire donne des résultats favorables par rapport au calcul non linéaire, car il sous-estime tous les critères de dimensionnement ( $w$ ,  $\varepsilon_t$ ,  $\varepsilon_v$ ) alors il surestime les durées de vie de chaussées.

La deuxième remarque est que les graves non-traitées ont une forte non-linéarité dans les structures ayant des couches bitumineuse mince ce qui est le cas des structures des chaussées du réseau secondaire.

La troisième remarque est que les modèles de K-O et d'Uzan donnent des résultats de critères de dimensionnement proches, mais avec quelques légères différences, quand ces différences vont être injectées dans des modèles de performance, il se peut qu'elles vont donner des différences agréables. Mais le travail avec n'importe quel modèle de non-linéarité mécanique donnent des résultats satisfaisants et acceptables.

Après ce travail comparatif entre les résultats de calcul linéaire et les résultats de calcul non-linéaire avec différent modèles on recommande de prendre en considération l'effet de non-linéarité des graves non-traités surtout dans les chaussées à faible épaisseur de couche bitumineuse car l'utilisation de la méthode de dimensionnement linéaire dans le dimensionnement de ce type de chaussées donne des résultats loin de la réalité.

## Annexe

Dans cette annexe on va donner les résultats détaillés des simulations faites dans le chapitre 04.

Les résultats d'analyse de la structure de chaussée S1 en calcul linéaire :

```

/*****
INPUT FILE NAME -E:\matériaux\01\Linear.DAT
NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1
TITLE -structure elastique collé 1 1
MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED
NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1
NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0.0001
NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 3
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 3
LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80
COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9
SYSTEM OF UNITS (NUNIT)-----= 1
Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa
unit weight in kN/m^3, and temperature in C
THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 6 15
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.35 0.33 0.45
VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0 5.9999 21.0001
ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED
FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 3.500E+06 2 2.400E+05
3 5.000E+04
LOAD GROUP NO. 1 HAS 1 CONTACT AREA

```

# Annexe

CONTACT RADIUS (CR)----- = 17.5  
CONTACT PRESSURE (CP)----- = 675.6  
RADIAL COORDINATES OF 1 POINT(S) (RC) ARE : 0  
PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

RADIAL COORDINATE	VERTICAL COORDINATE	VERTICAL DISPLACEMENT	VERTICAL STRESS (STRAIN)	RADIAL STRESS (STRAIN)	TANGENTIAL STRESS (STRAIN)	SHEAR STRESS (STRAIN)
0.00000	0.00000	0.16558	675.600 -5.723E-04	3826.415 6.431E-04	3826.415 6.431E-04	0.000 .000E+00
0.00000	5.99990	0.16553	467.323 5.856E-04	-2260.339 -4.665E-04	-2260.339 -4.665E-04	0.000 .000E+00
0.00000	21.00010	0.14249	152.310 2.732E-03	17.482 -1.178E-03	17.482 -1.178E-03	0.000 .000E+00

/\*\*\*\*\*/

Les résultats d'analyse de la structure de chaussée S1 en calcul non-linaires K-O par le module intégrée en KENLAYER :

/\*\*\*\*\*/

INPUT FILE NAME -E:\matériaux\01\UNTITLED.DAT  
NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1  
TITLE -nl 1  
MATL = 2 FOR NONLINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM  
NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED  
NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1  
NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1  
TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0.001  
NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 12  
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 3  
LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80  
COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9  
SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 1  
Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa  
unit weight in kN/m<sup>3</sup>, and temperature in C  
THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 6 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5  
1.5 1.5 1.5

# Annexe

POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.35 0.33 0.33 0.33 0.33 0.33

0.33 0.33 0.33 0.33 0.33 0.45

VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0 5.99 21.0001

ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 3.500E+06 2 2.400E+05

3 2.400E+05 4 2.400E+05 5 2.400E+05 6 2.400E+05 7 2.400E+05

8 2.400E+05 9 2.400E+05 10 2.400E+05 11 2.400E+05 12 5.000E+04

LOAD GROUP NO. 1 HAS 1 CONTACT AREA

CONTACT RADIUS (CR)----- = 17.5

CONTACT PRESSURE (CP)----- = 675.6

RADIAL COORDINATES OF 1 POINT(S) (RC) ARE : 0

NUMBER OF NONLINEAR LAYERS (NOLAY)----- = 10

MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS FOR NONLINEAR ANALYSIS (ITENOL) = 20

LAYER NUMBER (LAYNO) AND SOIL TYPE (NCLAY) ARE: 2 0 3 0 4 0 5 0 6 0

7 0 8 0 9 0 10 0 11 0

Z COORDINATES (ZCNOL) FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ARE: 6.75 8.25 9.75 11.25

12.75 14.25 15.75 17.25 18.75 20.25

R COORDINATE (RCNOL) FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ----- = 0

X COORDINATE (XPTNOL) FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ----- = 0

Y COORDINATE (YPTNOL) FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ----- = 0

SLOPE OF LOAD DISTRIBUTION (SLD) ----- = 0

TOLERANCE (DELNOL) FOR NONLINEAR ANALYSIS ----- = 0.01

RELAXATION FACTORS (RELAX) FOR NONLINEAR ANALYSIS OF EACH PERIOD ARE: 0.5

UNIT WEIGHT OF LAYERS (GAM) ARE: 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

LAYER NO. = 2 NCLAY = 0 K2 = 0.29 K0 = 0

LAYER NO. = 3 NCLAY = 0 K2 = 0.29 K0 = 0

LAYER NO. = 4 NCLAY = 0 K2 = 0.29 K0 = 0

LAYER NO. = 5 NCLAY = 0 K2 = 0.29 K0 = 0

LAYER NO. = 6 NCLAY = 0 K2 = 0.29 K0 = 0

LAYER NO. = 7 NCLAY = 0 K2 = 0.29 K0 = 0

LAYER NO. = 8 NCLAY = 0 K2 = 0.29 K0 = 0

LAYER NO. = 9 NCLAY = 0 K2 = 0.29 K0 = 0

LAYER NO. = 10 NCLAY = 0 K2 = 0.29 K0 = 0

LAYER NO. = 11 NCLAY = 0 K2 = 0.29 K0 = 0

# Annexe

LAYER NUMBER AND GEOSTATIC STRESS (GEOS) ARE:

2 0.00000 3 0.00000 4 0.00000 5 0.00000 6 0.00000  
7 0.00000 8 0.00000 9 0.00000 10 0.00000 11 0.00000

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 2 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 30541

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 3 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 30541

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 4 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 30541

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 5 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 30541

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 6 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 30541

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 7 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 30541

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 8 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 30541

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 9 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 30541

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 10 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 30541

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 11 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 30541

FOR LOAD GROUP 1 LAYER NO. AND R COORDINATE FOR COMPUTING MODULUS ARE:

2 0 3 0 4 0 5 0 6 0 7 0 8 0 9 0 10 0 11 0

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

AT ITERATION 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 2.400E+05 3 2.400E+05

4 2.400E+05 5 2.400E+05 6 2.400E+05 7 2.400E+05 8 2.400E+05 9  
2.400E+05 10 2.400E+05 11 2.400E+05

AT ITERATION 2 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 2.142E+05 3 2.073E+05

4 2.044E+05 5 2.016E+05 6 1.988E+05 7 1.959E+05 8 1.931E+05 9  
1.905E+05 10 1.881E+05 11 1.862E+05

AT ITERATION 3 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 1.994E+05 3 1.900E+05

4 1.860E+05 5 1.820E+05 6 1.780E+05 7 1.739E+05 8 1.700E+05 9  
1.663E+05 10 1.630E+05 11 1.603E+05

AT ITERATION 4 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 1.910E+05 3 1.808E+05

4 1.764E+05 5 1.719E+05 6 1.674E+05 7 1.630E+05 8 1.586E+05 9  
1.545E+05 10 1.509E+05 11 1.479E+05

AT ITERATION 5 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 1.864E+05 3 1.760E+05

4 1.714E+05 5 1.668E+05 6 1.621E+05 7 1.575E+05 8 1.530E+05 9  
1.488E+05 10 1.451E+05 11 1.420E+05

AT ITERATION 6 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 1.839E+05 3 1.735E+05

4 1.688E+05 5 1.641E+05 6 1.594E+05 7 1.547E+05 8 1.502E+05 9  
1.460E+05 10 1.423E+05 11 1.392E+05

AT ITERATION 7 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 1.825E+05 3 1.721E+05

4 1.675E+05 5 1.628E+05 6 1.580E+05 7 1.534E+05 8 1.489E+05 9  
1.447E+05 10 1.409E+05 11 1.378E+05

LAYER NUMBER AND THREE NORMAL STRESSES INCLUDING GEOSTATIC STRESSES

## Annexe

2	413.981	25.086	25.086	3	378.306	-2.827	-2.827
4	343.886	-30.618	-30.618	5	311.342	-54.772	-54.772
6	281.047	-76.221	-76.221	7	253.230	-95.817	-95.817
8	228.470	-114.655	-114.655	9	206.896	-133.617	-133.617
10	188.813	-153.781	-153.781	11	174.569	-176.419	-176.419

LAYER NUMBER AND ADJUSTED THREE NORMAL STRESSES INCLUDING GEOSTATIC

STRESSES FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ARE:

2	413.981	25.086	25.086	3	378.306	0.000	0.000
4	343.886	0.000	0.000	5	311.342	0.000	0.000
6	281.047	0.000	0.000	7	253.230	0.000	0.000
8	228.470	0.000	0.000	9	206.896	0.000	0.000
10	188.813	0.000	0.000	11	174.569	0.000	0.000

RADIAL COORDINATE	VERTICAL COORDINATE	VERTICAL DISPLACEMENT	VERTICAL STRESS (STRAIN)	RADIAL STRESS (STRAIN)	TANGENTIAL STRESS (STRAIN)	SHEAR STRESS (STRAIN)
0.00000	0.00000	0.18440	675.600	4702.051	4702.051	0.000
(STRAIN)			-6.900E-04	7.856E-04	7.856E-04	.000E+00
0.00000	5.99000	0.18376	431.634	-3030.552	-3030.552	0.000
(STRAIN)			7.294E-04	-6.060E-04	-6.060E-04	.000E+00
0.00000	21.00010	0.15215	169.359	18.045	18.045	0.000
(STRAIN)			3.062E-03	-1.326E-03	-1.326E-03	.000E+00

/\*  
/

Les résultats d'analyse de la structure de chaussée S1 en calcul non-linéaires K-O par le programme développé basé sur KENLAYER en calcul linéaire (dernière itération) :

/\*  
/

```

INPUT FILE NAME -5.DAT

NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1

TITLE -Chouaib-Yassine. Ali-Haimoud <=====> aataha Katla

MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM

NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED

NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1

NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
    
```

# Annexe

```

TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0.0001

NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 17

NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 18

LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80

COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9

SYSTEM OF UNITS (NUNIT)-----= 1

Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa

unit weight in kN/m^3, and temperature in C

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 6 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

1

POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.35 0.33 0.33 0.33 0.33 0.33

0.33 0.33 0.33 0.33 0.33 0.33 0.33 0.33 0.33 0.33 0.33 0.45

VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0 5.9999 21.0001 6.5 7.5

8.5 9.5 10.5 11.5 12.5 13.5 14.5 15.5 16.5 17.5 18.5 19.5

20.5

ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 3.500E+06 2 1.830E+05

3 1.756E+05 4 1.699E+05 5 1.668E+05 6 1.637E+05 7 1.606E+05

8 1.574E+05 9 1.543E+05 10 1.513E+05 11 1.483E+05 12 1.455E+05

13 1.428E+05 14 1.403E+05 15 1.381E+05 16 1.362E+05 17 5.000E+04

LOAD GROUP NO. 1 HAS 1 CONTACT AREA

CONTACT RADIUS (CR)----- = 17.5

CONTACT PRESSURE (CP)----- = 675.6

RADIAL COORDINATES OF 1 POINT(S) (RC) ARE : 0

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

RADIAL VERTICAL VERTICAL VERTICAL RADIAL TANGENTIAL SHEAR
COORDINATE COORDINATE DISPLACEMENT STRESS STRESS STRESS STRESS
(STRAIN) (STRAIN) (STRAIN) (STRAIN) (STRAIN) (STRAIN)
0.00000 0.00000 0.18427 675.600 4391.681 4391.681 0.000
(STRAIN) -6.853E-04 7.480E-04 7.480E-04 .000E+00
0.00000 5.99990 0.18412 430.696 -3059.122 -3059.122 0.000
(STRAIN) 7.349E-04 -6.112E-04 -6.112E-04 .000E+00
0.00000 21.00010 0.15232 169.657 18.106 18.106 0.000
(STRAIN) 3.067E-03 -1.328E-03 -1.328E-03 .000E+00

```

# Annexe

0.00000	6.50000	0.18303	418.679	30.484	30.484	0.000
(STRAIN)			2.178E-03	-6.435E-04	-6.435E-04	.000E+00
0.00000	7.50000	0.18083	394.871	10.613	10.613	0.000
(STRAIN)			2.209E-03	-7.015E-04	-7.015E-04	.000E+00
0.00000	8.50000	0.17862	371.510	-7.193	-7.193	0.000
(STRAIN)			2.215E-03	-7.500E-04	-7.500E-04	.000E+00
0.00000	9.50000	0.17641	348.759	-25.440	-25.440	0.000
(STRAIN)			2.191E-03	-7.921E-04	-7.921E-04	.000E+00
0.00000	10.50000	0.17424	326.785	-41.977	-41.977	0.000
(STRAIN)			2.166E-03	-8.306E-04	-8.306E-04	.000E+00
0.00000	11.50000	0.17208	305.712	-57.097	-57.097	0.000
(STRAIN)			2.139E-03	-8.666E-04	-8.666E-04	.000E+00
0.00000	12.50000	0.16996	285.671	-71.095	-71.095	0.000
(STRAIN)			2.113E-03	-9.014E-04	-9.014E-04	.000E+00
0.00000	13.50000	0.16786	266.757	-84.241	-84.241	0.000
(STRAIN)			2.089E-03	-9.361E-04	-9.361E-04	.000E+00
0.00000	14.50000	0.16578	249.070	-96.816	-96.816	0.000
(STRAIN)			2.069E-03	-9.720E-04	-9.720E-04	.000E+00
0.00000	15.50000	0.16372	232.677	-109.079	-109.079	0.000
(STRAIN)			2.054E-03	-1.010E-03	-1.010E-03	.000E+00
0.00000	16.50000	0.16167	217.667	-121.314	-121.314	0.000
(STRAIN)			2.046E-03	-1.052E-03	-1.052E-03	.000E+00
0.00000	17.50000	0.15962	204.125	-133.817	-133.817	0.000
(STRAIN)			2.048E-03	-1.099E-03	-1.099E-03	.000E+00
0.00000	18.50000	0.15757	192.133	-146.902	-146.902	0.000
(STRAIN)			2.060E-03	-1.153E-03	-1.153E-03	.000E+00
0.00000	19.50000	0.15550	181.797	-160.930	-160.930	0.000
(STRAIN)			2.086E-03	-1.215E-03	-1.215E-03	.000E+00
0.00000	20.50000	0.15339	173.231	-176.304	-176.304	0.000
(STRAIN)			2.127E-03	-1.287E-03	-1.287E-03	.000E+00

/\*\*\*\*\*/

## Annexe

Les résultats d'analyse de la structure de chaussée S1 en calcul non-linéaires Uzan par le programme développé basé sur KENLAYER en calcul linéaire (dernière itération) :

```

/*****
INPUT FILE NAME   -4.DAT

NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED =  1

TITLE -Chouaib-Yassine. Ali-Haimoud <=====> aataha Katla

MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM

NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED

NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) =  1

NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) =  1

TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- =  0.0001

NUMBER OF LAYERS (NL)----- =  17

NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- =  18

LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- =  80

COMPUTING CODE (NSTD)----- =  9

SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- =  1

Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa

unit weight in kN/m^3, and temperature in C

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 6  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1

1

POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.35  0.33  0.33  0.33  0.33  0.33

0.33  0.33  0.33  0.33  0.33  0.33  0.33  0.33  0.33  0.33  0.45

VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0  5.9999  21.0001  6.5  7.5

8.5  9.5  10.5  11.5  12.5  13.5  14.5  15.5  16.5  17.5  18.5  19.5

20.5

ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE :   1  3.500E+06   2  1.977E+05

   3  1.910E+05   4  1.863E+05   5  1.828E+05   6  1.793E+05   7  1.757E+05

   8  1.721E+05   9  1.686E+05  10  1.651E+05  11  1.617E+05  12  1.585E+05

  13  1.554E+05  14  1.526E+05  15  1.501E+05  16  1.480E+05  17  5.000E+04

LOAD GROUP NO. 1 HAS 1 CONTACT AREA

CONTACT RADIUS (CR)----- =  17.5

CONTACT PRESSURE (CP)----- =  675.6

```

# Annexe

RADIAL COORDINATES OF 1 POINT(S) (RC) ARE : 0

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

RADIAL COORDINATE	VERTICAL COORDINATE	VERTICAL DISPLACEMENT	VERTICAL STRESS (STRAIN)	RADIAL STRESS (STRAIN)	TANGENTIAL STRESS (STRAIN)	SHEAR STRESS (STRAIN)
0.00000	0.00000	0.18044	675.600	4272.115	4272.115	0.000
(STRAIN)			-6.614E-04	7.258E-04	7.258E-04	.000E+00
0.00000	5.99990	0.18031	437.928	-2885.205	-2885.205	0.000
(STRAIN)			7.022E-04	-5.796E-04	-5.796E-04	.000E+00
0.00000	21.00010	0.15046	166.315	17.183	17.183	0.000
(STRAIN)			3.017E-03	-1.308E-03	-1.308E-03	.000E+00
0.00000	6.50000	0.17928	425.362	29.486	29.486	0.000
(STRAIN)			2.053E-03	-6.101E-04	-6.101E-04	.000E+00
0.00000	7.50000	0.17722	400.436	7.554	7.554	0.000
(STRAIN)			2.070E-03	-6.654E-04	-6.654E-04	.000E+00
0.00000	8.50000	0.17515	375.972	-13.026	-13.026	0.000
(STRAIN)			2.064E-03	-7.128E-04	-7.128E-04	.000E+00
0.00000	9.50000	0.17309	352.148	-32.565	-32.565	0.000
(STRAIN)			2.044E-03	-7.551E-04	-7.551E-04	.000E+00
0.00000	10.50000	0.17106	329.145	-50.301	-50.301	0.000
(STRAIN)			2.021E-03	-7.940E-04	-7.940E-04	.000E+00
0.00000	11.50000	0.16905	307.096	-66.541	-66.541	0.000
(STRAIN)			1.998E-03	-8.306E-04	-8.306E-04	.000E+00
0.00000	12.50000	0.16706	286.145	-81.597	-81.597	0.000
(STRAIN)			1.975E-03	-8.662E-04	-8.662E-04	.000E+00
0.00000	13.50000	0.16510	266.393	-95.759	-95.759	0.000
(STRAIN)			1.955E-03	-9.020E-04	-9.020E-04	.000E+00
0.00000	14.50000	0.16315	247.953	-109.326	-109.326	0.000
(STRAIN)			1.939E-03	-9.392E-04	-9.392E-04	.000E+00
0.00000	15.50000	0.16122	230.896	-122.579	-122.579	0.000
(STRAIN)			1.928E-03	-9.789E-04	-9.789E-04	.000E+00
0.00000	16.50000	0.15929	215.324	-135.831	-135.831	0.000
(STRAIN)			1.924E-03	-1.023E-03	-1.023E-03	.000E+00
0.00000	17.50000	0.15737	201.330	-149.408	-149.408	0.000

## Annexe

```
(STRAIN)                1.930E-03 -1.071E-03 -1.071E-03  .000E+00
0.00000    18.50000      0.15543    189.007    -163.664    -163.664     0.000
(STRAIN)                1.946E-03 -1.127E-03 -1.127E-03  .000E+00
0.00000    19.50000      0.15347    178.472    -179.009    -179.009     0.000
(STRAIN)                1.976E-03 -1.191E-03 -1.191E-03  .000E+00
0.00000    20.50000      0.15147    169.854    -195.909    -195.909     0.000
(STRAIN)                2.022E-03 -1.266E-03 -1.266E-03  .000E+00
```

/\*\*\*\*\*/

Les résultats d'analyse de la structure de chaussée S2 en calcul linéaire :

/\*\*\*\*\*/

```
INPUT FILE NAME  -E:\matériaux\02\Linear.DAT
NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED =  1
TITLE -structure elastique collé 1 1
MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED
NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) =  1
NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) =  1
TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- =  0.0001
NUMBER OF LAYERS (NL)----- =  3
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- =  3
LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- =  80
COMPUTING CODE (NSTD)----- =  9
SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- =  1
Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa
unit weight in kN/m^3, and temperature in C
THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 12  30
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.35  0.33  0.45
VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE:  0  11.9999  42.0001
ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED
FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE :   1  3.500E+06   2  2.400E+05
        3  5.000E+04
LOAD GROUP NO. 1 HAS 1 CONTACT AREA
```

# Annexe

CONTACT RADIUS (CR)----- = 17.5  
CONTACT PRESSURE (CP)----- = 675.6  
RADIAL COORDINATES OF 1 POINT(S) (RC) ARE : 0  
PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

RADIAL COORDINATE	VERTICAL COORDINATE	VERTICAL DISPLACEMENT	VERTICAL STRESS (STRAIN)	RADIAL STRESS (STRAIN)	TANGENTIAL STRESS (STRAIN)	SHEAR STRESS (STRAIN)
0.00000	0.00000	0.09750	675.600 -2.355E-04	2531.382 3.753E-04	2531.382 3.753E-04	0.000 .000E+00
0.00000	11.99990	0.09604	255.345 3.928E-04	-1599.194 -3.225E-04	-1599.194 -3.225E-04	0.000 .000E+00
0.00000	42.00010	0.07662	47.345 8.940E-04	2.936 -3.938E-04	2.936 -3.938E-04	0.000 .000E+00

/\*\*\*\*\*/

Les résultats d'analyse de la structure de chaussée S2 en calcul non-linaires K-O par le module intégrée en KENLAYER :

/\*\*\*\*\*/

INPUT FILE NAME -E:\matériaux\02\UNTITLED.DAT  
NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1  
TITLE -nl 1  
MATL = 2 FOR NONLINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM  
NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED  
NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1  
NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1  
TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0.001  
NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 12  
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 3  
LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80  
COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9  
SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 1  
Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa  
unit weight in kN/m<sup>3</sup>, and temperature in C

# Annexe

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 12 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3

POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.35 0.33 0.33 0.33 0.33 0.33 0.33

0.33 0.33 0.33 0.33 0.33 0.45

VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0 11.99 42.0001

ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 3.500E+06 2 2.400E+05

3 2.400E+05 4 2.400E+05 5 2.400E+05 6 2.400E+05 7 2.400E+05

8 2.400E+05 9 2.400E+05 10 2.400E+05 11 2.400E+05 12 5.000E+04

LOAD GROUP NO. 1 HAS 1 CONTACT AREA

CONTACT RADIUS (CR)----- = 17.5

CONTACT PRESSURE (CP)----- = 675.6

RADIAL COORDINATES OF 1 POINT(S) (RC) ARE : 0

NUMBER OF NONLINEAR LAYERS (NOLAY)----- = 10

MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS FOR NONLINEAR ANALYSIS (ITENOL) = 20

LAYER NUMBER (LAYNO) AND SOIL TYPE (NCLAY) ARE: 2 0 3 0 4 0 5 0 6 0

7 0 8 0 9 0 10 0 11 0

Z COORDINATES (ZCNOL) FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ARE: 13.5 16.5 19.5 22.5

25.5 28.5 31.5 34.5 37.5 40.5

R COORDINATE (RCNOL) FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ----- = 0

X COORDINATE (XPTNOL) FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ----- = 0

Y COORDINATE (YPTNOL) FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ----- = 0

SLOPE OF LOAD DISTRIBUTION (SLD) ----- = 0

TOLERANCE (DELNOL) FOR NONLINEAR ANALYSIS ----- = 0.01

RELAXATION FACTORS (RELAX) FOR NONLINEAR ANALYSIS OF EACH PERIOD ARE: 0.5

UNIT WEIGHT OF LAYERS (GAM) ARE: 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

LAYER NO. = 2 NCLAY = 0 K2 = 0.29 K0 = 0

LAYER NO. = 3 NCLAY = 0 K2 = 0.29 K0 = 0

LAYER NO. = 4 NCLAY = 0 K2 = 0.29 K0 = 0

LAYER NO. = 5 NCLAY = 0 K2 = 0.29 K0 = 0

LAYER NO. = 6 NCLAY = 0 K2 = 0.29 K0 = 0

LAYER NO. = 7 NCLAY = 0 K2 = 0.29 K0 = 0

LAYER NO. = 8 NCLAY = 0 K2 = 0.29 K0 = 0

LAYER NO. = 9 NCLAY = 0 K2 = 0.29 K0 = 0

LAYER NO. = 10 NCLAY = 0 K2 = 0.29 K0 = 0

# Annexe

LAYER NO. = 11 NCLAY = 0 K2 = 0.29 K0 = 0

LAYER NUMBER AND GEOSTATIC STRESS (GEOS) ARE:

2 0.00000 3 0.00000 4 0.00000 5 0.00000 6 0.00000  
7 0.00000 8 0.00000 9 0.00000 10 0.00000 11 0.00000

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 2 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 30541

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 3 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 30541

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 4 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 30541

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 5 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 30541

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 6 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 30541

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 7 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 30541

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 8 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 30541

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 9 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 30541

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 10 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 30541

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 11 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 30541

FOR LOAD GROUP 1 LAYER NO. AND R COORDINATE FOR COMPUTING MODULUS ARE:

2 0 3 0 4 0 5 0 6 0 7 0 8 0 9 0 10 0 11 0

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

AT ITERATION 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 2.400E+05 3 2.400E+05

4 2.400E+05 5 2.400E+05 6 2.400E+05 7 2.400E+05 8 2.400E+05 9  
2.400E+05 10 2.400E+05 11 2.400E+05

AT ITERATION 2 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 1.950E+05 3 1.912E+05

4 1.879E+05 5 1.845E+05 6 1.813E+05 7 1.781E+05 8 1.750E+05 9  
1.721E+05 10 1.695E+05 11 1.674E+05

AT ITERATION 3 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 1.698E+05 3 1.647E+05

4 1.600E+05 5 1.553E+05 6 1.508E+05 7 1.464E+05 8 1.422E+05 9  
1.383E+05 10 1.348E+05 11 1.321E+05

AT ITERATION 4 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 1.557E+05 3 1.502E+05

4 1.449E+05 5 1.398E+05 6 1.349E+05 7 1.301E+05 8 1.257E+05 9  
1.215E+05 10 1.179E+05 11 1.149E+05

AT ITERATION 5 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 1.477E+05 3 1.421E+05

4 1.367E+05 5 1.315E+05 6 1.265E+05 7 1.217E+05 8 1.173E+05 9  
1.132E+05 10 1.096E+05 11 1.066E+05

AT ITERATION 6 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 1.433E+05 3 1.377E+05

4 1.322E+05 5 1.270E+05 6 1.221E+05 7 1.174E+05 8 1.131E+05 9  
1.091E+05 10 1.055E+05 11 1.026E+05

AT ITERATION 7 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 1.407E+05 3 1.352E+05

4 1.298E+05 5 1.246E+05 6 1.198E+05 7 1.152E+05 8 1.109E+05 9  
1.070E+05 10 1.035E+05 11 1.006E+05



# Annexe

NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1

TITLE -Chouaib-Yassine. Ali-Haimoud <=====> aataha Katla

MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM

NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED

NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1

NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1

TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0.0001

NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 17

NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 18

LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80

COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9

SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 1

Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa

unit weight in kN/m<sup>3</sup>, and temperature in C

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 12 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2

2

POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.35 0.33 0.33 0.33 0.33 0.33

0.33 0.33 0.33 0.33 0.33 0.33 0.33 0.33 0.33 0.33 0.45

VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0 11.9999 42.0001 13 15 17

19 21 23 25 27 29 31 33 35 37 39 41

ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE :

1	3.500E+06	2	1.388E+05
3	1.348E+05	4	1.312E+05
5	1.277E+05	6	1.243E+05
7	1.211E+05	8	1.179E+05
9	1.149E+05	10	1.121E+05
11	1.093E+05	12	1.068E+05
13	1.044E+05	14	1.022E+05
15	1.002E+05	16	9.845E+04
17	5.000E+04		

LOAD GROUP NO. 1 HAS 1 CONTACT AREA

CONTACT RADIUS (CR)----- = 17.5

CONTACT PRESSURE (CP)----- = 675.6

RADIAL COORDINATES OF 1 POINT(S) (RC) ARE : 0

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

RADIAL	VERTICAL	VERTICAL	VERTICAL	RADIAL	TANGENTIAL	SHEAR
COORDINATE	COORDINATE	DISPLACEMENT	STRESS	STRESS	STRESS	STRESS
			(STRAIN)	(STRAIN)	(STRAIN)	(STRAIN)

## Annexe

---

0.00000	0.00000	0.11701	675.600	2985.711	2985.711	0.000
(STRAIN)			-3.264E-04	4.597E-04	4.597E-04	.000E+00
0.00000	11.99990	0.11548	192.147	-2214.935	-2214.935	0.000
(STRAIN)			4.979E-04	-4.306E-04	-4.306E-04	.000E+00
0.00000	42.00010	0.08523	55.132	3.950	3.950	0.000
(STRAIN)			1.032E-03	-4.527E-04	-4.527E-04	.000E+00
0.00000	13.00000	0.11414	183.586	0.845	0.845	0.000
(STRAIN)			1.319E-03	-4.325E-04	-4.325E-04	.000E+00
0.00000	15.00000	0.11156	167.392	-4.828	-4.828	0.000
(STRAIN)			1.265E-03	-4.337E-04	-4.337E-04	.000E+00
0.00000	17.00000	0.10908	152.506	-9.355	-9.355	0.000
(STRAIN)			1.209E-03	-4.313E-04	-4.313E-04	.000E+00
0.00000	19.00000	0.10672	138.940	-12.942	-12.942	0.000
(STRAIN)			1.155E-03	-4.269E-04	-4.269E-04	.000E+00
0.00000	21.00000	0.10446	126.646	-15.849	-15.849	0.000
(STRAIN)			1.103E-03	-4.215E-04	-4.215E-04	.000E+00
0.00000	23.00000	0.10231	115.548	-18.275	-18.275	0.000
(STRAIN)			1.054E-03	-4.161E-04	-4.161E-04	.000E+00
0.00000	25.00000	0.10025	105.555	-20.370	-20.370	0.000
(STRAIN)			1.009E-03	-4.111E-04	-4.111E-04	.000E+00
0.00000	27.00000	0.09827	96.577	-22.258	-22.258	0.000
(STRAIN)			9.681E-04	-4.071E-04	-4.071E-04	.000E+00
0.00000	29.00000	0.09637	88.529	-24.036	-24.036	0.000
(STRAIN)			9.315E-04	-4.044E-04	-4.044E-04	.000E+00
0.00000	31.00000	0.09454	81.336	-25.791	-25.791	0.000
(STRAIN)			8.995E-04	-4.035E-04	-4.035E-04	.000E+00
0.00000	33.00000	0.09277	74.938	-27.604	-27.604	0.000
(STRAIN)			8.724E-04	-4.048E-04	-4.048E-04	.000E+00
0.00000	35.00000	0.09105	69.289	-29.555	-29.555	0.000
(STRAIN)			8.507E-04	-4.087E-04	-4.087E-04	.000E+00
0.00000	37.00000	0.08936	64.357	-31.729	-31.729	0.000
(STRAIN)			8.348E-04	-4.159E-04	-4.159E-04	.000E+00
0.00000	39.00000	0.08770	60.130	-34.228	-34.228	0.000
(STRAIN)			8.257E-04	-4.270E-04	-4.270E-04	.000E+00

# Annexe

```
0.00000 41.00000 0.08605 56.614 -37.168 -37.168 0.000
(STRAIN) 8.243E-04 -4.427E-04 -4.427E-04 .000E+00
```

/\*\*\*\*\*/

Les résultats d'analyse de la structure de chaussée S2 en calcul non-linéaires Uzan par le programme développé basé sur KENLAYER en calcul linéaire (dernière itération) :

/\*\*\*\*\*/

```
INPUT FILE NAME -4.DAT
NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1
TITLE -Chouaib-Yassine. Ali-Haimoud <=====> aataha Katla
MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED
NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1
NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0.0001
NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 17
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 18
LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80
COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9
SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 1
Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa
unit weight in kN/m^3, and temperature in C
THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 12 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
2
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.35 0.33 0.33 0.33 0.33 0.33
0.33 0.33 0.33 0.33 0.33 0.33 0.33 0.33 0.33 0.33 0.45
VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0 11.9999 42.0001 13 15 17
19 21 23 25 27 29 31 33 35 37 39 41
ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED
FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 3.500E+06 2 1.047E+05
3 1.017E+05 4 9.898E+04 5 9.720E+04 6 9.546E+04 7 9.378E+04
8 9.215E+04 9 9.059E+04 10 8.908E+04 11 8.765E+04 12 8.628E+04
13 8.499E+04 14 8.378E+04 15 8.266E+04 16 8.167E+04 17 5.000E+04
```

# Annexe

LOAD GROUP NO. 1 HAS 1 CONTACT AREA

CONTACT RADIUS (CR) ----- = 17.5

CONTACT PRESSURE (CP)----- = 675.6

RADIAL COORDINATES OF 1 POINT(S) (RC) ARE : 0

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

RADIAL COORDINATE	VERTICAL COORDINATE	VERTICAL DISPLACEMENT	VERTICAL STRESS (STRAIN)	RADIAL STRESS (STRAIN)	TANGENTIAL STRESS (STRAIN)	SHEAR STRESS (STRAIN)
0.00000	0.00000	0.12401	675.600	3146.298	3146.298	0.000
(STRAIN)			-3.585E-04	4.895E-04	4.895E-04	.000E+00
0.00000	11.99990	0.12245	172.066	-2437.213	-2437.213	0.000
(STRAIN)			5.366E-04	-4.698E-04	-4.698E-04	.000E+00
0.00000	42.00010	0.08749	56.958	5.533	5.533	0.000
(STRAIN)			1.040E-03	-4.518E-04	-4.518E-04	.000E+00
0.00000	13.00000	0.12089	165.161	7.595	7.595	0.000
(STRAIN)			1.530E-03	-4.722E-04	-4.722E-04	.000E+00
0.00000	15.00000	0.11789	152.059	3.114	3.114	0.000
(STRAIN)			1.475E-03	-4.731E-04	-4.731E-04	.000E+00
0.00000	17.00000	0.11500	139.956	-0.345	-0.345	0.000
(STRAIN)			1.416E-03	-4.690E-04	-4.690E-04	.000E+00
0.00000	19.00000	0.11223	128.854	-3.576	-3.576	0.000
(STRAIN)			1.350E-03	-4.621E-04	-4.621E-04	.000E+00
0.00000	21.00000	0.10959	118.721	-6.264	-6.264	0.000
(STRAIN)			1.287E-03	-4.544E-04	-4.544E-04	.000E+00
0.00000	23.00000	0.10708	109.506	-8.556	-8.556	0.000
(STRAIN)			1.228E-03	-4.465E-04	-4.465E-04	.000E+00
0.00000	25.00000	0.10468	101.144	-10.568	-10.568	0.000
(STRAIN)			1.173E-03	-4.390E-04	-4.390E-04	.000E+00
0.00000	27.00000	0.10238	93.569	-12.392	-12.392	0.000
(STRAIN)			1.123E-03	-4.325E-04	-4.325E-04	.000E+00
0.00000	29.00000	0.10018	86.718	-14.102	-14.102	0.000
(STRAIN)			1.078E-03	-4.273E-04	-4.273E-04	.000E+00
0.00000	31.00000	0.09807	80.535	-15.764	-15.764	0.000
(STRAIN)			1.038E-03	-4.237E-04	-4.237E-04	.000E+00

## Annexe

0.00000	33.00000	0.09603	74.975	-17.436	-17.436	0.000
(STRAIN)			1.002E-03	-4.222E-04	-4.222E-04	.000E+00
0.00000	35.00000	0.09405	70.001	-19.175	-19.175	0.000
(STRAIN)			9.726E-04	-4.230E-04	-4.230E-04	.000E+00
0.00000	37.00000	0.09213	65.588	-21.041	-21.041	0.000
(STRAIN)			9.487E-04	-4.266E-04	-4.266E-04	.000E+00
0.00000	39.00000	0.09026	61.723	-23.096	-23.096	0.000
(STRAIN)			9.311E-04	-4.336E-04	-4.336E-04	.000E+00
0.00000	41.00000	0.08841	58.406	-25.415	-25.415	0.000
(STRAIN)			9.206E-04	-4.445E-04	-4.445E-04	.000E+00

/\*\*\*\*\*/

Les résultats d'analyse de la structure de chaussée S3 en calcul linéaire :

/\*\*\*\*\*/

```
INPUT FILE NAME -E:\matériaux\03\Linear.DAT
NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1
TITLE -structure elastique collé 1 1
MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED
NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1
NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0.0001
NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 3
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 3
LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80
COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9
SYSTEM OF UNITS (NUNIT)-----= 1

Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa
unit weight in kN/m^3, and temperature in C
THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 20 60
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.35 0.33 0.45
VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0 19.9999 80.0001
```

# Annexe

ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 3.500E+06 2 2.400E+05  
3 5.000E+04

LOAD GROUP NO. 1 HAS 1 CONTACT AREA

CONTACT RADIUS (CR)----- = 17.5

CONTACT PRESSURE (CP)----- = 675.6

RADIAL COORDINATES OF 1 POINT(S) (RC) ARE : 0

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

RADIAL	VERTICAL	VERTICAL	VERTICAL	RADIAL	TANGENTIAL	SHEAR
COORDINATE	COORDINATE	DISPLACEMENT	STRESS	STRESS	STRESS	STRESS
			(STRAIN)	(STRAIN)	(STRAIN)	(STRAIN)
0.00000	0.00000	0.06025	675.600	1605.330	1605.330	0.000
(STRAIN)			-5.029E-05	2.034E-04	2.034E-04	.000E+00
0.00000	19.99990	0.05793	137.287	-947.088	-947.088	0.000
(STRAIN)			2.286E-04	-1.896E-04	-1.896E-04	.000E+00
0.00000	80.00010	0.04217	14.888	0.591	0.591	0.000
(STRAIN)			2.871E-04	-1.275E-04	-1.275E-04	.000E+00

/\*\*\*\*\*/

Les résultats d'analyse de la structure de chaussée S3 en calcul non-linaires K-O par le module intégrée en KENLAYER :

/\*\*\*\*\*/

INPUT FILE NAME -E:\matériaux\03\UNTITLED.DAT  
NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1  
TITLE -nl 1  
MATL = 2 FOR NONLINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM  
NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED  
NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1  
NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1  
TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0.001  
NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 12  
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 3  
LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80  
COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9  
SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 1

# Annexe

Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa

unit weight in kN/m<sup>3</sup>, and temperature in C

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 20 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6

POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.35 0.33 0.33 0.33 0.33 0.33 0.33

0.33 0.33 0.33 0.33 0.33 0.45

VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0 19.99 80.0001

ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 3.500E+06 2 2.400E+05

3 2.400E+05 4 2.400E+05 5 2.400E+05 6 2.400E+05 7 2.400E+05

8 2.400E+05 9 2.400E+05 10 2.400E+05 11 2.400E+05 12 5.000E+04

LOAD GROUP NO. 1 HAS 1 CONTACT AREA

CONTACT RADIUS (CR)----- = 17.5

CONTACT PRESSURE (CP)----- = 675.6

RADIAL COORDINATES OF 1 POINT(S) (RC) ARE : 0

NUMBER OF NONLINEAR LAYERS (NOLAY)----- = 10

MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS FOR NONLINEAR ANALYSIS (ITENOL) = 20

LAYER NUMBER (LAYNO) AND SOIL TYPE (NCLAY) ARE: 2 0 3 0 4 0 5 0 6 0

7 0 8 0 9 0 10 0 11 0

Z COORDINATES (ZCNOL) FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ARE: 23 29 35 41 47 53

69 65 71 77

R COORDINATE (RCNOL) FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ----- = 0

X COORDINATE (XPTNOL) FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ----- = 0

Y COORDINATE (YPTNOL) FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ----- = 0

SLOPE OF LOAD DISTRIBUTION (SLD) ----- = 0

TOLERANCE (DELNOL) FOR NONLINEAR ANALYSIS ----- = 0.01

RELAXATION FACTORS (RELAX) FOR NONLINEAR ANALYSIS OF EACH PERIOD ARE: 0.5

UNIT WEIGHT OF LAYERS (GAM) ARE: 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

LAYER NO. = 2 NCLAY = 0 K2 = 0.29 K0 = 0

LAYER NO. = 3 NCLAY = 0 K2 = 0.29 K0 = 0

LAYER NO. = 4 NCLAY = 0 K2 = 0.29 K0 = 0

LAYER NO. = 5 NCLAY = 0 K2 = 0.29 K0 = 0

LAYER NO. = 6 NCLAY = 0 K2 = 0.29 K0 = 0

LAYER NO. = 7 NCLAY = 0 K2 = 0.29 K0 = 0

LAYER NO. = 8 NCLAY = 0 K2 = 0.29 K0 = 0

# Annexe

LAYER NO. = 9      NCLAY = 0      K2 = 0.29      K0 = 0  
LAYER NO. = 10      NCLAY = 0      K2 = 0.29      K0 = 0  
LAYER NO. = 11      NCLAY = 0      K2 = 0.29      K0 = 0

LAYER NUMBER AND GEOSTATIC STRESS (GEOS) ARE:

2    0.00000    3    0.00000    4    0.00000    5    0.00000    6    0.00000  
7    0.00000    8    0.00000    9    0.00000    10    0.00000    11    0.00000

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 2 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 30541  
FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 3 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 30541  
FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 4 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 30541  
FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 5 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 30541  
FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 6 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 30541  
FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 7 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 30541  
FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 8 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 30541  
FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 9 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 30541  
FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 10 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 30541  
FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 11 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 30541

FOR LOAD GROUP 1 LAYER NO. AND R COORDINATE FOR COMPUTING MODULUS ARE:

2 0 3 0 4 0 5 0 6 0 7 0 8 0 9 0 10 0 11 0

PERIOD NO. 1    LOAD GROUP NO. 1

AT ITERATION 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE :      2    2.400E+05    3    2.400E+05  
4    2.400E+05    5    2.400E+05    6    2.400E+05    7    2.400E+05    8    2.400E+05    9  
2.400E+05    10    2.400E+05    11    2.400E+05

AT ITERATION 2 LAYER NO. AND MODULUS ARE :      2    1.813E+05    3    1.771E+05  
4    1.733E+05    5    1.699E+05    6    1.667E+05    7    1.638E+05    8    1.566E+05    9  
1.583E+05    10    1.559E+05    11    1.540E+05

AT ITERATION 3 LAYER NO. AND MODULUS ARE :      2    1.491E+05    3    1.431E+05  
4    1.378E+05    5    1.331E+05    6    1.287E+05    7    1.247E+05    8    1.154E+05    9  
1.175E+05    10    1.144E+05    11    1.120E+05

AT ITERATION 4 LAYER NO. AND MODULUS ARE :      2    1.309E+05    3    1.243E+05  
4    1.185E+05    5    1.134E+05    6    1.088E+05    7    1.046E+05    8    9.500E+04    9  
9.714E+04    10    9.400E+04    11    9.146E+04

AT ITERATION 5 LAYER NO. AND MODULUS ARE :      2    1.205E+05    3    1.138E+05  
4    1.079E+05    5    1.028E+05    6    9.823E+04    7    9.410E+04    8    8.490E+04    9  
8.695E+04    10    8.394E+04    11    8.147E+04

AT ITERATION 6 LAYER NO. AND MODULUS ARE :      2    1.145E+05    3    1.078E+05  
4    1.021E+05    5    9.707E+04    6    9.262E+04    7    8.864E+04    8    7.989E+04    9  
8.184E+04    10    7.898E+04    11    7.660E+04



# Annexe

Les résultats d'analyse de la structure de chaussée S3 en calcul non-linéaires K-O par le programme développé basé sur KENLAYER en calcul linéaire (dernière itération) :

```

/*****/
INPUT FILE NAME  -4.DAT
NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED =  1
TITLE -Chouaib-Yassine. Ali-Haimoud <=====> aataha Katla
MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED
NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) =  1
NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) =  1
TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- =  0.0001
NUMBER OF LAYERS (NL)----- =  17
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- =  18
LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- =  80
COMPUTING CODE (NSTD)----- =  9
SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- =  1
Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa
unit weight in kN/m^3, and temperature in C
THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 20  4  4  4  4  4  4  4  4  4  4  4  4  4  4
4
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.35  0.33  0.33  0.33  0.33  0.33
0.33  0.33  0.33  0.33  0.33  0.33  0.33  0.33  0.33  0.33  0.45
VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE:  0  19.9999  80.0001  22  26  30
34  38  42  46  50  54  58  62  66  70  74  78
ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED
FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE :   1  3.500E+06   2  1.076E+05
3  1.033E+05   4  9.932E+04   5  9.578E+04   6  9.257E+04   7  8.964E+04
8  8.696E+04   9  8.448E+04  10  8.219E+04  11  8.006E+04  12  7.809E+04
13  7.626E+04  14  7.458E+04  15  7.305E+04  16  7.168E+04  17  5.000E+04
LOAD GROUP NO. 1 HAS 1 CONTACT AREA
CONTACT RADIUS (CR)----- =  17.5
CONTACT PRESSURE (CP)----- =  675.6
RADIAL COORDINATES OF 1 POINT(S) (RC) ARE :  0
PERIOD NO. 1   LOAD GROUP NO. 1

```

## Annexe

RADIAL COORDINATE	VERTICAL COORDINATE	VERTICAL DISPLACEMENT	VERTICAL STRESS (STRAIN)	RADIAL STRESS (STRAIN)	TANGENTIAL STRESS (STRAIN)	SHEAR STRESS (STRAIN)
0.00000	0.00000	0.07963	675.600	1894.235	1894.235	0.000
(STRAIN)			-1.081E-04	2.570E-04	2.570E-04	.000E+00
0.00000	19.99990	0.07732	83.030	-1341.033	-1341.033	0.000
(STRAIN)			2.919E-04	-2.574E-04	-2.574E-04	.000E+00
0.00000	80.00010	0.04929	18.394	1.322	1.322	0.000
(STRAIN)			3.441E-04	-1.510E-04	-1.510E-04	.000E+00
0.00000	22.00000	0.07582	77.012	-1.893	-1.893	0.000
(STRAIN)			7.270E-04	-2.479E-04	-2.479E-04	.000E+00
0.00000	26.00000	0.07304	66.722	-2.824	-2.824	0.000
(STRAIN)			6.642E-04	-2.316E-04	-2.316E-04	.000E+00
0.00000	30.00000	0.07049	58.355	-3.434	-3.434	0.000
(STRAIN)			6.104E-04	-2.171E-04	-2.171E-04	.000E+00
0.00000	34.00000	0.06815	51.486	-3.863	-3.863	0.000
(STRAIN)			5.642E-04	-2.044E-04	-2.044E-04	.000E+00
0.00000	38.00000	0.06597	45.778	-4.180	-4.180	0.000
(STRAIN)			5.243E-04	-1.934E-04	-1.934E-04	.000E+00
0.00000	42.00000	0.06394	40.978	-4.428	-4.428	0.000
(STRAIN)			4.897E-04	-1.839E-04	-1.839E-04	.000E+00
0.00000	46.00000	0.06205	36.897	-4.634	-4.634	0.000
(STRAIN)			4.595E-04	-1.757E-04	-1.757E-04	.000E+00
0.00000	50.00000	0.06026	33.398	-4.817	-4.817	0.000
(STRAIN)			4.330E-04	-1.687E-04	-1.687E-04	.000E+00
0.00000	54.00000	0.05858	30.374	-4.992	-4.992	0.000
(STRAIN)			4.097E-04	-1.627E-04	-1.627E-04	.000E+00
0.00000	58.00000	0.05698	27.748	-5.175	-5.175	0.000
(STRAIN)			3.892E-04	-1.577E-04	-1.577E-04	.000E+00
0.00000	62.00000	0.05546	25.459	-5.377	-5.377	0.000
(STRAIN)			3.715E-04	-1.537E-04	-1.537E-04	.000E+00
0.00000	66.00000	0.05401	23.462	-5.612	-5.612	0.000
(STRAIN)			3.562E-04	-1.508E-04	-1.508E-04	.000E+00
0.00000	70.00000	0.05261	21.726	-5.897	-5.897	0.000

# Annexe

```
(STRAIN) 3.435E-04 -1.491E-04 -1.491E-04 .000E+00
0.00000 74.00000 0.05126 20.226 -6.248 -6.248 0.000
(STRAIN) 3.334E-04 -1.487E-04 -1.487E-04 .000E+00
0.00000 78.00000 0.04994 18.950 -6.689 -6.689 0.000
(STRAIN) 3.260E-04 -1.498E-04 -1.498E-04 .000E+00
```

/\*\*\*\*\*/

Les résultats d'analyse de la structure de chaussée S3 en calcul non-linéaires Uzan par le programme développé basé sur KENLAYER en calcul linéaire (dernière itération) :

/\*\*\*\*\*/

```
INPUT FILE NAME -4.DAT
NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1
TITLE -Chouaib-Yassine. Ali-Haimoud <=====> aataha Katla
MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED
NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1
NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0.0001
NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 17
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 18
LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80
COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9
SYSTEM OF UNITS (NUNIT)-----= 1
Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa
unit weight in kN/m^3, and temperature in C
THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 20 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4
4
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.35 0.33 0.33 0.33 0.33 0.33
0.33 0.33 0.33 0.33 0.33 0.33 0.33 0.33 0.33 0.33 0.45
VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0 19.9999 80.0001 22 26 30
34 38 42 46 50 54 58 62 66 70 74 78
ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED
FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 3.500E+06 2 1.194E+05
3 1.144E+05 4 1.099E+05 5 1.058E+05 6 1.021E+05 7 9.876E+04
8 9.566E+04 9 9.280E+04 10 9.015E+04 11 8.769E+04 12 8.541E+04
```

# Annexe

```

13 8.330E+04 14 8.137E+04 15 7.962E+04 16 7.807E+04 17 5.000E+04

LOAD GROUP NO. 1 HAS 1 CONTACT AREA

CONTACT RADIUS (CR)----- = 17.5

CONTACT PRESSURE (CP)----- = 675.6

RADIAL COORDINATES OF 1 POINT(S) (RC) ARE : 0

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

      RADIAL      VERTICAL      VERTICAL      VERTICAL      RADIAL      TANGENTIAL      SHEAR
COORDINATE  COORDINATE  DISPLACEMENT  STRESS        STRESS        STRESS        STRESS
                                (STRAIN)      (STRAIN)      (STRAIN)      (STRAIN)

0.00000    0.00000    0.07765    675.600    1866.080    1866.080    0.000
(STRAIN)                                -1.024E-04  2.518E-04  2.518E-04  .000E+00

0.00000    19.99990    0.07534    87.741    -1302.133    -1302.133    0.000
(STRAIN)                                2.855E-04  -2.506E-04  -2.506E-04  .000E+00

0.00000    80.00010    0.04877    18.175     1.125        1.125        0.000
(STRAIN)                                3.433E-04  -1.512E-04  -1.512E-04  .000E+00

0.00000    22.00000    0.07390    81.183     -3.002       -3.002       0.000
(STRAIN)                                6.962E-04  -2.411E-04  -2.411E-04  .000E+00

0.00000    26.00000    0.07124    69.987     -3.932       -3.932       0.000
(STRAIN)                                6.344E-04  -2.249E-04  -2.249E-04  .000E+00

0.00000    30.00000    0.06881    60.906     -4.528       -4.528       0.000
(STRAIN)                                5.814E-04  -2.105E-04  -2.105E-04  .000E+00

0.00000    34.00000    0.06658    53.470     -4.940       -4.940       0.000
(STRAIN)                                5.361E-04  -1.980E-04  -1.980E-04  .000E+00

0.00000    38.00000    0.06451    47.305     -5.245       -5.245       0.000
(STRAIN)                                4.971E-04  -1.873E-04  -1.873E-04  .000E+00

0.00000    42.00000    0.06259    42.135     -5.486       -5.486       0.000
(STRAIN)                                4.633E-04  -1.780E-04  -1.780E-04  .000E+00

0.00000    46.00000    0.06080    37.752     -5.692       -5.692       0.000
(STRAIN)                                4.339E-04  -1.701E-04  -1.701E-04  .000E+00

0.00000    50.00000    0.05912    34.002     -5.882       -5.882       0.000
(STRAIN)                                4.082E-04  -1.634E-04  -1.634E-04  .000E+00

0.00000    54.00000    0.05753    30.771     -6.074       -6.074       0.000
(STRAIN)                                3.858E-04  -1.578E-04  -1.578E-04  .000E+00

0.00000    58.00000    0.05603    27.973     -6.283       -6.283       0.000

```

## Annexe

---

(STRAIN)			3.663E-04	-1.533E-04	-1.533E-04	.000E+00
0.00000	62.00000	0.05460	25.543	-6.523	-6.523	0.000
(STRAIN)			3.495E-04	-1.499E-04	-1.499E-04	.000E+00
0.00000	66.00000	0.05323	23.434	-6.811	-6.811	0.000
(STRAIN)			3.353E-04	-1.476E-04	-1.476E-04	.000E+00
0.00000	70.00000	0.05191	21.610	-7.166	-7.166	0.000
(STRAIN)			3.237E-04	-1.466E-04	-1.466E-04	.000E+00
0.00000	74.00000	0.05063	20.049	-7.610	-7.610	0.000
(STRAIN)			3.149E-04	-1.471E-04	-1.471E-04	.000E+00
0.00000	78.00000	0.04939	18.738	-8.172	-8.172	0.000
(STRAIN)			3.091E-04	-1.493E-04	-1.493E-04	.000E+00

/\*\*\*\*\*/

## Références bibliographique :

- 1- Jeuffroy : « *dimensionnement des chaussées* »
- 2- Cem Karagöz : « *Analysis of flexible pavements incorporating nonlinear resilient behavior of unbound granular layers* »
- 3- B. Tiliouine and K. Sandjak : « *Mechanical Behaviour Simulation of Unbound Aggregates Used in Algerian Pavements* »
- 4- Tacirouglu : « *Constitutive modeling of the resilient response of granular solids* »
- 5- HABIBALLAH Taha El Mokhtar : « *Modélisation des déformations permanentes des graves non traitées* »
- 6- CTTTP-Direction des Routes : « *Catalogue de Dimensionnement des Chaussées Neuves, Algerie* »
- 7- Y. H. Huang : « *Pavement Design and Analysis* »
- 8- Asphalt Institute : « *Research and Development of the Asphalt Institute Thickness Design Manual (MS-1)* »
- 9- S.A. Sadrnejad : « *Evaluation of three constitutive models to characterize Granular Base for Pavement Analysis using Finite Element Method* »
- 10- H.M.A. Salem : « *Effect of excess axle weights on pavement life* »
- 11- J. Wang « *Three-dimensional finite element analysis of flexible pavements* »
- 12- F. Lekarp « *Resilient response of unbound aggregates* »
- 13- S. TRIAW « *Dimensionnement mécanistique-empirique des structures de chaussée* »
- 14- B.D. Steven « *The development and verification of a pavement response and performance model for unbound granular pavements* »
- 15- R Gudishala « *Development of resilient modulus prediction Models for base and subgrade pavement layers From in situ devices test results* »

- 16- K. Sandjak « *modélisation numérique de comportement mécanique des graves non-traitées : application au calcul des non-linéarité des chaussées souples* »
- 17- P.Jouve ,M.Elhannani « *Application des modèles non-linaire au calcul des chaussées souples* »