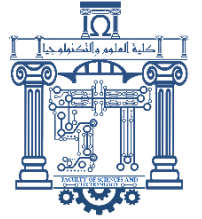




الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
Republique Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi Tébessi – Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil

## MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **Diplôme de Master Académique**

En : **Travaux Publics**

Spécialité : **Voies et Ouvrages d'Art**

Par : **BABAH MENABE**

**Sujet**

**Analyse d'une chaussée souple  
en utilisant le Logiciel KENPAVE  
Cas des systèmes multicouches élastiques non-linéaires**

Présenté et soutenu publiquement, le 13/06/2021, devant le jury composé de :

M ROULI AHMED  
M FARID MESSAOUD  
M NINOUEH TAREK  
...

Grade  
Grade  
Grade  
...

Président  
Rapporteur  
Examineur 1  
...

Promotion : 2020/2021

## Remerciements

*La réalisation de ce mémoire a été possible grâce aux efforts de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.*

*Je voudrais tout d'abord adresser toute ma reconnaissance à ma mère pour tous les sacrifices, l'amour, les encouragements permanents et le soutien moral qu'elle m'a donné au long de mes études.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur Dr. FARID MESSAOUD pour m'avoir guidé tout au long de ce travail.*

*Je le remercie vivement pour sa disponibilité de tous les instants et pour ses conseils avisés qui ont rendu ce travail possible.*

# Dédicace

*This work is dedicated to the most  
precious person of my life:  
my mother.*

## Liste des symboles

A : Aire de contact de la roue.

C : Facteur de conversion pour les roues à double ou à double tandem.

D : Conformité au fluage.

E : Contrainte de traction critique au bas de la couche 1.

E : Module d'élasticité.

$E_1$  : Module d'élasticité de la couche de roulement.

$E_2$  : Module d'élasticité de la couche de base.

$E_3$  : Module d'élasticité de la couche de fondation.

$E_4$  : Module d'élasticité de la couche de sol.

$F_e$  : Facteur de déformation.

$f_1, f_2$  et  $f_3$  : Constantes déterminées à partir d'essais de fatigue en laboratoire.

$f_4$  et  $f_5$  : Constantes déterminées à partir d'essais sur route ou de performances sur le terrain

H : Epaisseur de la couche.

$H_1$  : Epaisseur de la couche 1 ou couche de roulement en asphalte.

$H_2$  : Epaisseur de la couche 2 ou la couche base.

HMA : Enrobé à chaud.

K : Module de support de cheville.

$N_F$  : Nombre autorisé de répétitions de charge pour éviter les fissures de fatigue.

$N_d$  : Nombre maximal autorisé de répétitions de charge pour limiter la déformation permanente.

PR : Coefficient de poisson.

Q : Charge sur l'aire de contact.

$S_d$  : Double espacement.

$S_t$  : Facteur de pente.

V : Coefficient de poisson.

$\sigma_z$  : Contrainte vertical.

$\sigma_r$  : Contrainte radiale.

$\sigma_t$  : Contrainte tangentielle.

$\sigma_1$  : Contrainte majeure.

$\sigma_3$  : Contrainte mineure.

$\sigma_2$  : Intermédiaire.

$\theta$  : Contrainte globale.

$\tau_{rt}$  : Contraintes de cisaillement.

$\tau_{tr}$  : Contraintes de cisaillement.

$\tau_{rz}$  : Contraintes de cisaillement.

$\tau_z$  : Contraintes de cisaillement.

$\tau_z$  : Contraintes de cisaillement.

$\mathcal{E}_z$  : Déformation verticale.

$\mathcal{E}_r$  : Déformation radiale.

$\mathcal{E}_t$  : Déformation tangentielle.

$\mu$  : Paramètre de déformation permanente

## Liste des Tableaux

Tableau III. 1. Caractéristiques du véhicule, des essieux et des pneus.....	38
Tableau IV. 1. Constantes non linéaires $K_1$ et $K_2$ pour les matériaux granulaires .....	44
Tableau V. 1. Différents cas étudiés lors de l'analyse linéaire [Bouhrara S]	54
Tableau V. 2. Résultats de l'analyse linéaire [Bouhrara S]	55
Tableau V. 3. Résultats de l'analyse non-linéaire	56

## Liste des Figures

Figure I. 1. Coupe type d'une chaussée souple .....	1
Figure I. 2. Coupe d'une chaussée semi-rigide .....	2
Figure I. 3. Coupe d'une chaussée rigide .....	3
Figure II. 1. Schéma de principe illustrant les agressivités respectives vis-à-vis de la chaussée d'un véhicule léger et d'un poids lourds .....	6
Figure II. 2. Coupe d'une chaussée souple .....	7
Figure II. 3. Coupe transversale d'une chaussée souple .....	9
Figure II. 4. Diffusion des pressions dans un massif de Boussinesq .....	16
Figure II. 5. Modèle bicouche .....	17
Figure II. 6. Diffusion des contraintes selon Hogg .....	18
Figure II. 7. Diffusion de la contrainte selon Westergaard .....	19
Figure II. 8. Diffusion des contraintes selon Busmister .....	19
Figure II. 9. Ornière à faible rayon .....	20
Figure II. 10. Ornière à grand rayon .....	21
Figure II. 11. Affaissements .....	21
Figure II. 12. Fissures transversals .....	22
Figure II. 13. Fissures longitudinales .....	22
Figure II. 14. Fissures anarchiques .....	23
Figure II. 15. Faiençage .....	23
Figure II. 16. Arrachements .....	24
Figure II. 17. Dégradations .....	25
Figure III. 1. Composante des contraintes sous charge asymétrique .....	28
Figure III. 2. Déformation d'un corps de chaussée sous une charge de roue .....	28
Figure III. 3. Division du demi-espace en un système à sept couches .....	30
Figure III. 4. Demi-espace homogène soumis à deux charges circulaires .....	31
Figure III. 5. Analyse linéaire-élastique réalisée à l'aide de Kenlayer .....	31
Figure III. 6. Subdivision de la couche .....	33
Figure III. 7. Distribution verticale des contraintes dans un système à deux couches .....	34
Figure III. 8. Déflexion verticale de l'interface d'un système à deux couches .....	35
Figure III. 9. Contraintes aux interfaces dans un système à couches .....	36
Figure IV. 1. Écran du Logiciel KENPAVE .....	40
Figure IV. 2. Exemple d'une analyse non linéaire .....	43
Figure IV. 3. Relation générale entre le module résilient et la contrainte de déviation pour les sols à grains fins .....	45
Figure IV. 4. Relation entre module résilient, déviateur et contrainte pour quatre types de plate-forme .....	46
Figure IV. 5. Vue en plan de plusieurs roues .....	47

Figure IV. 6. Ajustement de la contrainte horizontale au point de contrainte. ....	49
Figure V. 1. Système multicouche élastique non-linéaire d'une chaussée souple.....	52
Figure V. 2. Information générale sur le système multicouche de la chaussée souple .....	53
Figure V. 3. Déflexion de surface $w_0$ .....	57
Figure V. 4. Déformation radiale de traction $\epsilon_r$ .....	58
Figure V. 5. Déformation verticale de compression $\epsilon_z$ .....	58
Figure V. 6. Déflexion de surface $w_0$ (Cas de la pression de contact élevée).....	59
Figure V. 7. Déformation de traction radiale (Cas de la pression de contact élevée).....	60
Figure V. 8. Déformation de compression verticale (Cas de la pression de contact élevée) ...	60
Figure V. 9. Déflexion de surface $w_0$ (Cas du sol support rigide) .....	61
Figure V. 10. Déformation de traction radiale (Cas du sol support rigide) .....	62
Figure V. 11. Déformation de compression verticale (Cas du sol support rigide) .....	62
Figure V. 12. Contrainte verticale (Cas linéaire) .....	63
Figure V. 13. Contrainte verticale (Cas non-linéaire).....	64



## Résumé

L'étude de la réponse d'une chaussée souple nécessite une évaluation précise des contraintes et des déformations dues aux charges des roues et des essieux. Dans notre étude on a utilisé le logiciel KENPAVE pour analyser un système élastique multicouche non-linéaire sous une zone circulaire chargée et calculer les contraintes et les déformations en variant les paramètres de la chaussée et évaluer le type de réponse (Déflexions de surface, Contraintes radiale et verticale, Déformations radiale et verticale) correspondant. A cet effet, une chaussée souple, composée de quatre couches a été considérée pour l'analyse non-linéaire. Ainsi trois cas sont étudiés, le premier cas où la pression de contact est standard, le deuxième cas où la pression de contact est élevée et le troisième cas où le sol support est rigide. Les résultats de l'analyse non linéaire indiquent que le module du sol support n'est pas affecté de manière significative par les modules de la couche de base et de fondation, mais les modules de la couche de base et de fondation dépendent fortement du module du sol support. Le moyen le plus efficace pour diminuer la contrainte de traction au bas de la couche de surface (asphalte) est d'augmenter l'épaisseur de HMA ou le module de la couche de base ; le moyen le plus efficace de réduire la contrainte de compression sur le haut de la couche du sol support est d'augmenter l'épaisseur de la couche granulaire de base et de fondation ou le module du sol support.

**Mot clés :** KENLAYER, Contrainte, Déformation, Déflexion, Pression de Contact, Module d'élasticité.

## **Abstract**

The study of the response of a flexible pavement requires an accurate evaluation of the stresses and strains due to wheel and axle loads. In our study we used the KENPAVE software to analyze a nonlinear multilayer elastic system under a circular loaded area and calculate the stresses and strains by varying the pavement parameters and evaluate the corresponding type of response (surface deflections, radial and vertical stresses, radial and vertical strains). For this purpose, a flexible pavement, composed of four layers was considered for the non-linear analysis. Thus three cases are studied, the first case where the contact pressure is standard, the second case where the contact pressure is high and the third case where the support soil is rigid. The result of the nonlinear analysis indicates that the modulus of the subgrade is not significantly affected by the moduli of the base and subgrade, but the moduli of the base and subgrade are strongly dependent on the modulus of the subgrade. The most effective way to decrease the tensile stress on the bottom of the surface (asphalt) layer is to increase the thickness of HMA or the modulus of the base layer; the most effective way to decrease the compressive stress on the top of the subgrade layer is to increase the thickness of the granular base and subgrade layer or the modulus of the subgrade.

**Key words:** KENLAYER, Stress, Deformation, Deflection, Contact pressure, Modulus of elasticity.

## ملخص

تتطلب دراسة استجابة الطريق المرن تقييماً دقيقاً للإجهادات والتشوهات الناتجة عن أحمال العجلة والمحاور. استخدمنا في دراستنا برنامج كين-بايف (KENPAVE) لتحليل نظام مرن غير خطي متعدد الطبقات تحت منطقة دائرية محملة وحساب الإجهادات والتشوهات عن طريق تغيير معاملات الطريق وتقييم نوع الاستجابة (انحرافات السطح ، الإجهادات الجانبية والعمودية ، والتشوهات الجانبية والعمودية) لهذا الغرض ، تم اعتبار طريق مرن مكون من أربع طبقات للتحليل غير الخطي. وهكذا تمت دراسة ثلاث حالات ، الحالة الأولى حيث يكون ضغط التلامس معيارياً ، والحالة الثانية حيث يكون ضغط التلامس مرتفعاً والحالة الثالثة حيث تكون التربة التحتية الداعمة صلبة. تشير نتيجة التحليل غير الخطي إلى أن معامل التربة التحتية الداعمة لا يتأثر بشكل كبير بمعايير طبقة القاعدة وطبقة الأساس ، ولكن معاملات طبقة القاعدة وطبقة الأساس تعتمد بشكل كبير على معامل التربة التحتية الداعمة. الطريقة الأكثر فاعلية لتقليل إجهاد الشد في أسفل طبقة السطح هي زيادة سمك الأسفلت (HMA) أو معامل طبقة القاعدة. الطريقة الأكثر فاعلية لتقليل إجهاد الضغط على الجزء العلوي من طبقة التربة التحتية الداعمة هي زيادة سماكة طبقة القاعدة وطبقة الأساس أو معامل التربة التحتية الداعمة.

### الكلمات الأساسية:

كينل-لايار ، التشوه ، الإجهاد ، الانحراف ، ضغط التلامس ، معامل المرونة

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Généralités sur les chaussées :</b>	<b>1</b>
1.1	Introduction :	1
1.2	Chaussées souples ou flexibles :	1
1.3	Chaussées semi-rigides :	2
1.4	Chaussées rigides :	2
1.5	Différents éléments qui caractérisent les routes :	3
1.5.1	Trafic :	3
1.5.2	Tracé en plan :	3
1.5.3	Profil en long :	3
1.5.4	Profil en travers :	4
1.5.5	Etude géotechnique :	4
<b>2</b>	<b>Chaussées souples</b>	<b>6</b>
2.1	Introduction :	6
2.2	Structure des chaussées souples :	7
2.2.1	Caractéristiques des chaussées souples :	8
2.2.2	Constitution d'une chaussée souple	8
2.3	Dimensionnement des structures de chaussée	10
2.3.1	Introduction :	10
2.3.2	Méthodes de dimensionnement :	11
2.3.3	Paramètre de dimensionnement des chaussées souples :	12
2.4	Matériaux de la chaussée souple	13
2.4.1	Béton bitumineux :	13
2.4.2	Grave-bitume :	14
2.4.3	Graves non traitées (G.N.T) :	14
2.5	Modèles de la mécanique des chaussées :	14
2.5.1	Modèle monocouche de Boussinesq (1885) :	15
2.5.2	Modèle bicouche :	16
2.5.3	Modèle de Hogg :	17
2.5.4	Modèle de Westergaard (1927)	18
2.5.5	Modèles multicouches (Burmister 1943)	19
2.6	Différents types des dégradations des chaussées :	20

2.6.1	Déformations :	20
2.6.2	Affaissement :	21
2.7	Fissurations :	21
2.7.1	Fissures transversales :	22
2.7.2	Fissures longitudinales :	22
2.7.3	Fissurations anarchiques	23
2.7.4	Faièçage :	23
2.8	Arrachements :	24
2.8.1	Désenrobage	24
2.8.2	Nid de poule	24
2.9	Dégradations :	24
2.9.1	Ressuage	24
2.9.2	Pelade :	24
<b>3</b>	<b>Contraintes et déformations dans les chaussées souples</b>	<b>27</b>
3.1	Introduction :	27
3.2	Contraintes :	27
3.3	Déformations :	29
3.4	Solutions analytiques utilisées par KENPAVE	29
3.4.1	Masse non linéaire	29
3.4.2	Masse homogène	30
3.4.3	Méthode itérative	31
3.4.4	Méthode approximative	32
3.5	Systèmes à Couches :	33
3.5.1	Systèmes à deux couches :	34
3.5.2	Systèmes à trois couches	35
3.6	Effet des configurations d'essieux et de pneus sur la chaussée souple :	37
<b>4</b>	<b>Description du logiciel KENPAVE</b>	<b>40</b>
4.1	Introduction	40
4.2	KENSLAB :	41
4.3	KENLAYER :	41
4.3.1	Développements théoriques	41
4.3.2	Analyse élastique non linéaire de KENLAYER	42
4.4	Matériaux granulaires :	43
4.4.1	Relation constitutive :	43
4.4.2	Sols à grains fins	44
4.4.3	Ajustement des contraintes :	46

<b>5</b>	<b>Discussion des résultats .....</b>	<b>51</b>
5.1	Introduction .....	51
5.2	Méthodologie.....	51
5.3	Discussion des résultats .....	57
5.3.1	Comparaison entre l'analyse linéaire et non-linéaire .....	57
5.3.2	Reponse caractéristiques de résistances lors de l'analyse non-linéaire .....	59
5.3.3	Étude des contraintes verticales.....	63
	<b>Conclusion générale .....</b>	<b>65</b>
	<b>Références .....</b>	<b>66</b>
	<b>ANNEXES.....</b>	<b>68</b>
	Premier cas .....	68
	Deuxième cas.....	72
	Troisième cas.....	76

# **CHAPITRE I: GENERALITES SUR LES CHAUSSEES**

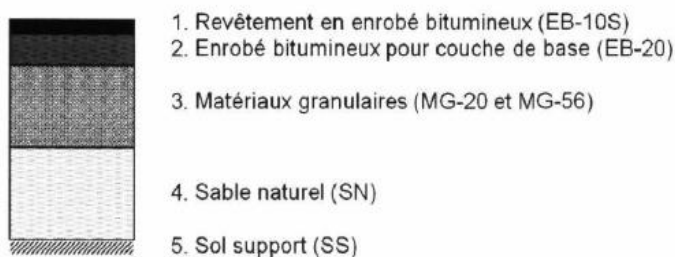
## 1 Généralités sur les chaussées :

### 1.1 Introduction :

Une chaussée est une structure plane et imperméable, conçue et dimensionnée pour garantir l'écoulement du trafic dans de bonnes conditions de sécurité et de confort pour les usagers et assurer sa fonction pour une période de service minimal fixée au stade de l'élaboration du projet. Le rôle du corps de la chaussée est de ramener les contraintes exercées par les pneumatiques à un niveau compatible à la contrainte de rupture du sol support. Sa réalisation fait appel à des critères économiques, techniques et écologiques. Les aspects techniques portent sur le choix de la structure et des matériaux (liants, granulats, etc.) des différentes couches constituant la chaussée. Les aspects économiques portent sur le coût de l'investissement mais aussi sur le coût d'usage et d'entretien pendant la période de service donnée. Les aspects écologiques sont relatifs à son impact sur l'environnement.

### 1.2 Chaussées souples ou flexibles :

Elles sont constituées d'une couche bitumineuse en surface et d'une assise en matériaux granulaire. Elles présentent l'aptitude de se déformer sans se fissurer. Une chaussée souple distribue les efforts de surface à travers les couches de base et de fondation. Cette distribution se faisant de façon à ce que l'effort sur la plate-forme soit compatible avec la résistance de l'infrastructure et du sol, l'épaisseur totale de la chaussée est généralement comprise entre 800 et 1010 mm. [6] (Fig. I.1).



**Figure I. 1.** Coupe type d'une chaussée souple



### 1.3 Chaussées semi-rigides :

Une chaussée semi-rigide est une chaussée avec une couche de surface en béton bitumineux, la couche de base étant améliorée au ciment et la couche de fondation granulaire. Le dimensionnement des structures semi-rigides porte sur la rupture par fatigue à la base de la couche liée et l'orniérage du sol support. Il faut donc s'assurer que la contrainte de traction à la base de la couche traitée est inférieure à la contrainte de traction admissible du matériau et que la déformation verticale à la surface des couches non liées et du sol support est inférieure à une valeur limite admissible.

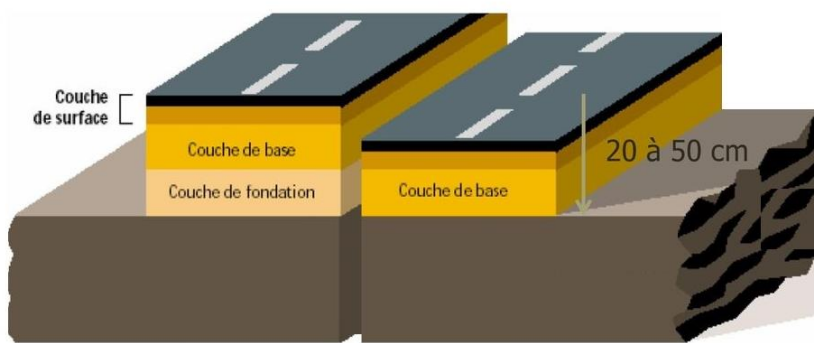
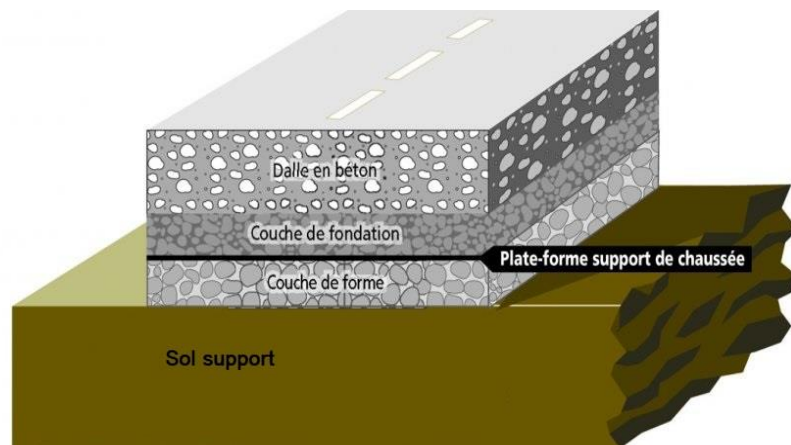


Figure I. 2. Coupe d'une chaussée semi-rigide

### 1.4 Chaussées rigides :

Une chaussée rigide est comme une dalle de béton. Elle est peu déformable, elle absorbe la charge afin d'éviter une déformation, sur la fondation ou l'infrastructure, susceptible de causer la rupture. De telles structures mobilisent des efforts notables de traction par flexion très importants par rapport à ceux subis par les structures semi-rigides et se déforment essentiellement par fissuration. Par contre les contraintes et déformations verticales sont très faibles.

Le principe de dimensionnement des chaussées rigides consiste à limiter les efforts de traction par flexion du béton sous l'effet des charges.



**Figure I. 3.** Coupe d'une chaussée rigide

Le rôle de ce type de chaussées est comme suit :

- absorbe les charges dues aux véhicules et les répartir vers le sol support
- assurer un confort et une sécurité de circulation appropriés
- décharge l'eau de pluie à l'extérieur
- résister aux effets du roulement et du freinage des véhicules.

## 1.5 Différents éléments qui caractérisent les routes :

### 1.5.1 Trafic :

C'est le déplacement de véhicules automobiles sur une route. Sa connaissance, tant en termes de quantité que de nature, est utile dans divers domaines, On le mesure en comptant le nombre de véhicules pendant une période de temps. Les unités les plus employées sont le nombre de véhicules par jour et la section la plus sollicitée de la chaussée étudiée dans une journée.

### 1.5.2 Tracé en plan :

Le tracé en plan est la projection verticale de la route sur un plan horizontal, il est caractérisé par la vitesse de référence qui permet de définir les caractéristiques géométriques nécessaires à tout aménagement routier.

### 1.5.3 Profil en long :

Le profil en long d'une route est une ligne continue obtenue par l'exécution d'une coupe longitudinale fictive, il exprime la variation de l'altitude de l'axe routier en fonction de l'abscisse curviligne.

**1.5.4 Profil en travers :**

Le profil en travers c'est une coupe transversale de la route qui permet de voir les élévations et la pente transversale du terrain naturel par rapport au pavage par la suite d'effectuer les calculs de volumes et savoir localisation des axes

**1.5.5 Etude géotechnique :**

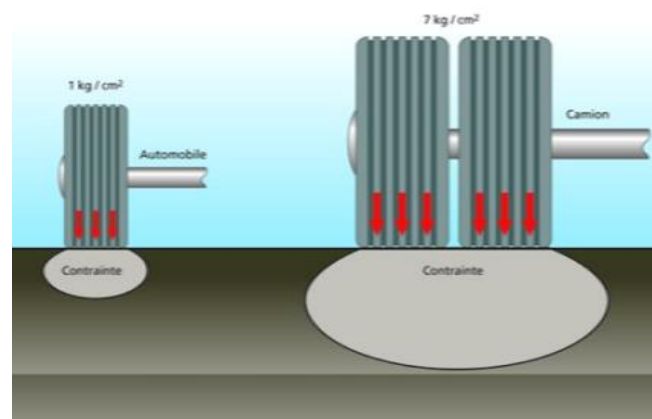
C'est une étude effectuée pour déterminer les caractéristiques et le comportement d'un sol. L'étude consiste à effectuer certains essais au laboratoire et en situ. [4]

## **CHAPITRE II: CHAUSSEES SOUPLES**

## 2 Chaussées souples

### 2.1 Introduction :

Les chaussées sont des structures composites, multicouches, souvent complexes, conçues pour résister sur une durée de vie relativement longue aux multiples sollicitations mécaniques liées principalement au passage de charges lourdes et climatiques (cycles de température, pluie, gel, etc.), qui l'une après l'autre dégrade imperceptiblement les performances initiales des matériaux et de leurs interfaces. La construction d'une chaussée passe par les étapes suivantes: Construction d'une couche d'assise qui apporte la résistance mécanique aux charges puis Une couche de liaison entre couche d'assise et couche de roulement, elle est réalisée avec une émulsion de bitume et enfin d'une couche de roulement. La chaussée reporte sur le sol support, en les répartissant convenablement, les efforts dus au trafic. La chaussée doit avoir une épaisseur telle que la pression verticale transmise au sol soit suffisamment faible afin que celui-ci puisse la supporter sans dégradation. Comme la pression dans la couche granulaire décroît régulièrement en profondeur, on peut constituer une chaussée par la superposition de couches de caractéristiques mécaniques croissantes [5].



**Figure II. 1.** Schéma de principe illustrant les agressivités respectives vis-à-vis de la chaussée d'un véhicule léger et d'un poids lourds

## 2.2 Structure des chaussées souples :

Les chaussées souples sont des chaussées composées généralement d'une couche de surface en matériau bitumineux, d'une sous-couche en grave bitumineux et d'une couche de fondation en grave non traité. Le matériau bitumineux est plus souvent de l'asphalte, dont la nature visqueuse permet une déformation plastique importante. La plupart des surfaces en asphalte sont construites sur une base de gravier, bien que certaines surfaces en asphalte soient construites directement sur la couche de fondation en fonction de la température à laquelle elle est appliquée. La déviation totale de toutes les couches due à la charge de trafic qui agit sur elle. Les contraintes sont transmises au sous-sol par la répartition latérale de la charge appliquée en fonction de la profondeur. Elle transmet la charge à la couche de fondation par une combinaison de couches. La chaussée souple répartit la charge sur une zone relativement plus petite de la couche de fondation. Le coût d'installation initial d'un revêtement souple est assez faible, ce qui explique la répartition internationale de ce type de revêtement. Toutefois, le revêtement souple nécessite un entretien de routine tous les deux ou trois ans. En outre, la chaussée souple se détériore rapidement ; des fissures sont susceptibles d'apparaître en raison d'un mauvais drainage et d'un trafic de véhicules lourds.

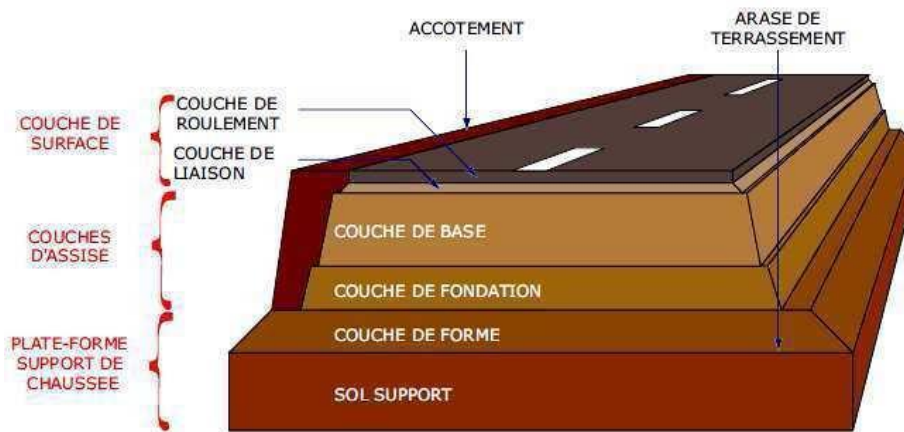


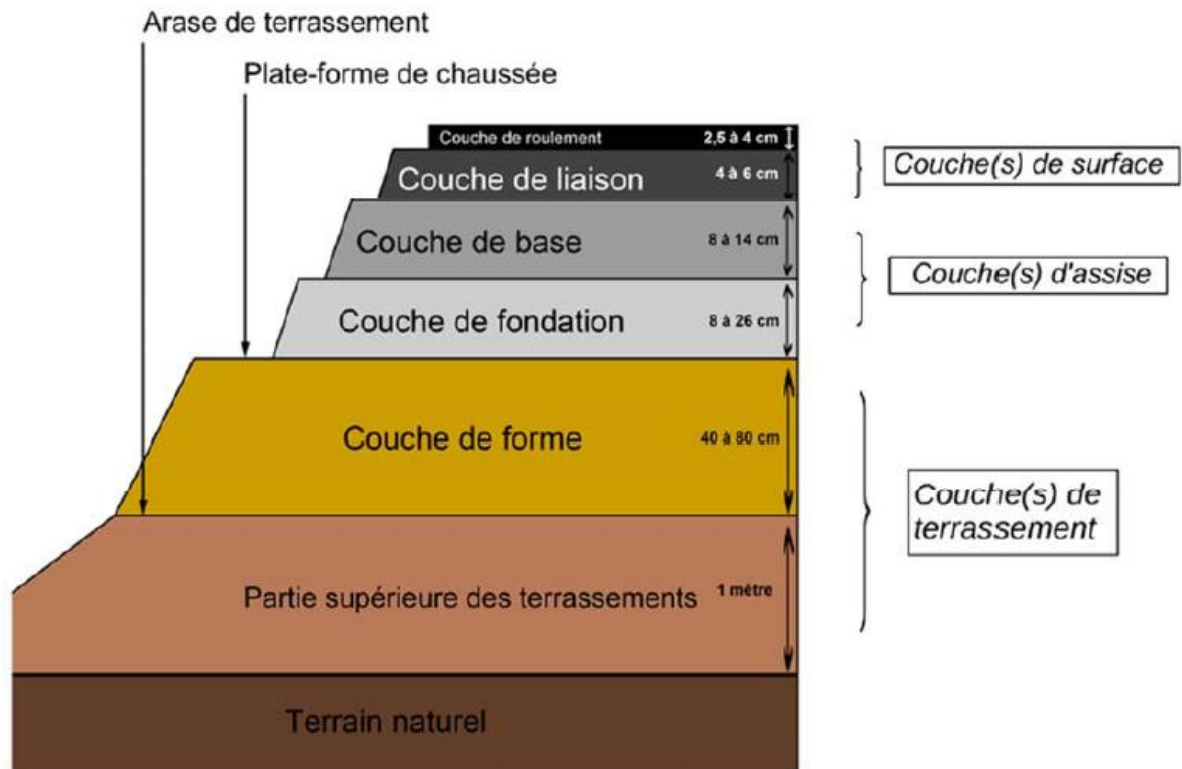
Figure II. 2. Coupe d'une chaussée souple

### 2.2.1 Caractéristiques des chaussées souples :

Les chaussées souples peuvent supporter des déformations très importantes. Au passage des charges roulantes en un point de la chaussée, Le poids du véhicule est transmis au sol, sous forme de pressions, par l'intermédiaire des pneumatiques. La charge étant relativement importante, ceci a pour effet de localiser les pressions sous le sol support dans un faible rayon autour de l'axe de la charge. Pour diffuser ces pressions et les réduire, on augmente l'épaisseur de la chaussée. Ceci constitue la base de toutes les méthodes de calcul des chaussées souples, méthodes qui relient l'épaisseur requise à la pression maximale admissible sur le sol support. Selon l'importance de la route, le revêtement hydrocarboné peut être un simple enduit superficiel de 1,5 à 2cm, ou un béton bitumineux de 4 à 10cm d'épaisseur. Dans le premier cas le revêtement ne joue qu'un rôle de tapis d'usure et d'étanchéité, tandis que dans le second lorsqu'il est épais, assure une répartition importante des charges, sous réserve que sa rigidité et sa résistance soit suffisante pour qu'il ne se fissure pas. Le corps de chaussée diffuse très largement les pressions verticales imposées par les charges roulantes et c'est de lui que dépendra essentiellement la valeur maximale de pression sur le sol de fondation. D'autre part les matériaux pris en compte doivent être aptes à résister aux efforts qui les sollicitent. [5,7].

### 2.2.2 Constitution d'une chaussée souple

Une chaussée souple est constituée de plusieurs couches mises en œuvre sur un sol terrassé appelé sol support. Le sol support est généralement surmonté d'une couche de forme. Le corps de la chaussée proprement est constitué de deux types de couche, les couches d'assise et la couche de surface. L'assise de la chaussée est généralement constituée de deux couches, la couche de fondation et, par-dessus, la couche de base. Ces couches, généralement constituées de matériaux liés, permettent à la chaussée de résister mécaniquement aux charges induites par le trafic. Quant à la couche de surface, elle est constituée de la couche de roulement (ou d'usure) qui subit directement les agressions du trafic et du climat. Une couche de liaison est parfois intégrée entre la couche de roulement et la couche de base de l'assise. Elle permet de spécialiser la couche de roulement au confort et à la sécurité des usagers. La couche de roulement et la couche de liaison constituent la couche de surface d'une chaussée.



**Figure II. 3.** Coupe transversale d'une chaussée souple

#### 2.2.2.1 Couche de surface :

Elle est constituée de la couche de liaison intermédiaire et la couche de roulement. Elle absorbe les efforts de cisaillement provoqués par la circulation.

#### 2.2.2.2 Couche de roulement :

C'est la seule couche de la chaussée perçue par les usagers. Elle assure la fonction de protection de l'assise contre les agressions du trafic, du climat et des polluants accidentels, La sécurité et le confort des usagers, le déplacement d'usagers différents (véhicules, cycles, piétons).

#### 2.2.2.3 Couche de liaison :

Elle permet de spécialiser la couche de roulement au confort et à la sécurité des usagers.

#### 2.2.2.4 Couche d'assise :

L'assise est composée de deux couches, la couche de fondation et la couche de base. Elles apportent à la structure de chaussée l'essentiel de sa rigidité et répartissent (par diffusion



latérale) les sollicitations, induites par le trafic, sur la plate-forme support afin de maintenir les déformations à ce niveau dans les limites admissibles.

#### **2.2.2.5 Couche de base :**

Elle est la plus proche de la couche de surface. Elle reçoit des contraintes et des déformations notables. Elle est formée en générale de grave concassée ou de grave bitume, tuf, sable gypseux.

#### **2.2.2.6 Couche de fondation :**

Constituée d'un matériau non traité elle répartit les contraintes induites par le trafic à un taux compatible avec les limites admissibles du sol support.

#### **2.2.2.7 Couche de forme**

La variation caractéristique des sols exige une amélioration et l'uniformité de la portance du sol, on interpose entre le sol support et les couches de chaussée. La couche de forme est un élément de transition qui protégé le sol support contre l'action destructive des gros engins, et facilite le compactage des couches supérieures en leur fournissant un support ferme et non déformable. Elle peut être constituée soit de matériaux grenus roulés ou concassés, soit de matériaux traités aux liants hydrauliques.

#### **2.2.2.8 Sol support :**

Le sol support peut être en remblai, qui est un sol surélevé, ou en déblai, qui est un sol enfoncé, la portance des sols, exprimée en MPa, varie selon leur teneur en eau. Il est généralement sur monté d'une couche de forme pour former un ensemble appelé plateforme support de chaussée

### **2.3 Dimensionnement des structures de chaussée**

#### **2.3.1 Introduction :**

L'objectif de dimensionnement des chaussées c'est de déterminer les épaisseurs des différentes couches de la structure de la chaussée et créer une structure capable de supporter un trafic pour une durée de vie fixée. Le dimensionnement d'une chaussée souple fait intervenir la voie, le trafic poids lourds (PL), l'agressivité du trafic PL et le coefficient d'agressivité, la durée de service, le classement géotechnique des sols naturels, l'état hydrique du sol support sensible à l'eau, le type d'hiver et l'indice de gel, la vérification au gel/dégel. Plusieurs type d'approches ont été développé en fonction du type d'approche les modèles de comportement ont été développées on considère trois types de modèles :

- **Modèles empiriques** : Les modèles empiriques sont des modèles basés sur l'analyse de l'observation des dégradations des chaussées et en particulier leur évolution.
- **Modèles semi-empiriques** : Les modèles semi-empiriques se basent d'une part sur les lois de comportement des matériaux, mais également sur l'observation de l'évolution des dégradations des chaussées. Ces modèles permettent de combiner les avantages des modèles théoriques et empiriques tout en diminuant les désavantages de l'un et de l'autre.
- **Modèles Théoriques** : Les modèles théoriques sont basés sur l'application des lois théoriques de comportement des matériaux. Les structures de chaussées étant un système multicouche de matériaux hydrocarbonés, ces modèles nécessitent la détermination d'un nombre considérable de paramètres. Ces modèles présentent l'avantage de pouvoir simuler le comportement de n'importe quel type de structure bitumineuse pour des conditions de sollicitations (charge, température) définies [7].

### 2.3.2 Méthodes de dimensionnement :

Les méthodes de dimensionnement les plus utilisés sont :

#### 2.3.2.1 Méthode AASHTO :

C'est une méthode basée sur des essais routiers. Elle est réalisée à la fin de l'année 1950. Le dimensionnement se fait à l'aide d'équations de régression traduites sous forme d'abaques et des formules permettant de choisir l'épaisseur de la chaussée en fonction du trafic cumulé considéré et la dégradation de la qualité d'usage de la route. La notion de qualité d'usage de la route est définie par l'indice PSI (Present Service ability Index) qui varie de zéro (chaussée impossible à circuler) à six (chaussée en parfait état). Cette échelle a été déterminée sur la base des dégradations de la chaussée et de leurs effets perçus par les usagers.

#### 2.3.2.2 Méthode C.B.R (California bearing ratio)

C'est une méthode (Semi-Empirique) qui est basée sur un essai de poinçonnement sur un échantillon de sol support en compactant des éprouvettes à (90 -100) % de l'optimum Proctor modifié sur une épaisseur d'eau de moins de 15 (cm). Le CBR retenu finalement est la valeur la plus basse obtenue après immersion de cet échantillon. Pour que la chaussée tienne, il faut que la contrainte verticale répartie suivant la théorie de Boussinesq, soit inférieure à une contrainte limite qui est proportionnelle à l'indice CBR. L'épaisseur est donnée par la formule suivante [4,5,7]:

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

$$e = (100 + 150(\sqrt{p})) / I_{CBR} + 5 \quad (1)$$

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

$$e = 100 + (\sqrt{p}) (75 + 50 \log N/10) / I_{CBR} + 5 \quad (2)$$

Avec :

e : Epaisseur équivalente

$I_{CBR}$ : Indice CBR.

N : Nombre moyen de camion de plus 1500 kg à vide.

P : Charge par roue  $P = 6.5$  t (essieu 13 t).

### 2.3.2.3 Méthode du catalogue de dimensionnement des chaussées neuves :

C'est une méthode qui se base sur l'approche théorique et l'empirique le catalogue de dimensionnement nécessite les paramètres suivants :

- Trafic
- Matériaux
- Sol Support
- Environnement.

En fonction de ces paramètres on aboutit au choix d'une structure de chaussée donnée.

### 2.3.2.4 Méthode d'Asphalte Institute :

Elle basée sur les résultats obtenus des essais «AASHO », on prend en considération le trafic composite par échelle de facteur d'équivalence et utilise un indice de structure tenant compte de la nature des diverses couches. L'épaisseur sera déterminée en utilisant l'abaque de l'asphalte institue

### 2.3.3 Paramètre de dimensionnement des chaussées souples :

- **Trafic** : constitue un élément essentiel du dimensionnement des chaussées. A chaque passage de véhicules, le poids des véhicules est transmis à la chaussée, sous forme de

pressions, par l'intermédiaire des pneumatiques. Chaque passage de véhicule sur la chaussée entraîne une légère fatigue de celle-ci, tant pour ce qui concerne la structure que les qualités de surface. L'accumulation de ces dommages élémentaires conduit à la dégradation progressive de l'ensemble. Le calcul de dimensionnement fait donc intervenir le trafic cumulé qui circule sur la chaussée durant la période de service prévue. Les poids lourds sont les seuls véhicules pris en considération pour décrire et quantifier le trafic dans les opérations de conception et de dimensionnement de la chaussée. La classe d'un trafic est exprimé en moyenne journalière annuelle (MJA) à l'année de mise en service, par sens de circulation et pour la voie la plus large. Dans certaine agglomération, on tiendra compte aussi d'un taux d'accroissement annuel du trafic PL, la durée de service Le maître d'ouvrage choisira une durée de service ou durée initiale de calcul qui est fonction de sa stratégie d'investissement. Cette durée sera en général comprise entre 10 et 20 ans. C'est la durée pour laquelle l'ouvrage réalisé n'entraînera aucun entretien structurel.

- **Qualité de la plate-forme :** Le dimensionnement de la chaussée dépend de la classe de portance exigée au marché pour la plate-forme support.
- **Données climatiques :** ont une influence sur la résistance, la durabilité, la déformabilité des chaussées et de leur support. Le dimensionnement doit subir une vérification au gel/dégel en fonction de la localisation géographique du projet et son exposition aux rigueurs hivernales.

## 2.4 Matériaux de la chaussée souple

Les matériaux utilisés doivent résister aux sollicitations répétées N fois (Passage répété des véhicules lourds). En générale les matériaux utilisés dans les chaussées souples sont :

### 2.4.1 Béton bitumineux :

Le béton bitumineux est un mélange, parfaitement contrôlé et de haute qualité, réalisé à chaud. Il est constitué de granulats de bonne qualité et bien calibrés provenant exclusivement du concassage de roches massives et de bitume pur tenant à la fois d'élément mouillant et agglutinant. Il doit être bien compacté en une masse uniforme et dense. Le béton bitumineux représente l'une des solutions techniques les plus avancées à l'heure actuelle pour la réalisation des couches de roulement des chaussées revêtues. Il s'applique à toutes les classes de trafic. Sa parfaite adaptation à tous les seuils de trafic est due aux très hauts niveaux de

.Performance qui lui sont accessibles compte tenu des caractéristiques de sa formulation. Le béton bitumineux présente les avantages suivants:

- Meilleure homogénéité d'ensemble
- Meilleure étanchéité
- Grande stabilité
- Meilleure résistance au glissement

#### **2.4.2 Grave-bitume :**

C'est un mélange de granulats et de bitume, fabriqué en poste d'enrobage et utilisé pour réaliser des assises de chaussée 4% du mélange représentent le bitume et le rest c'est du gravier à granulométrie contrôlée.

#### **2.4.3 Graves non traitées (G.N.T) :**

Le grave non traitée sont granulaires composé seulement des granulats le diamètre des grains est compris entre 14 et 31,5mm. Les granulats doivent présenter les caractéristiques minimales selon la classe de trafic et la position de la couche dans la chaussée. On distingue deux types de GNT :

- Les GNT A : obtenues en une seule fraction, sans ajout d'eau, dont l'homogénéité de la granularité est codifiée.
- Les GNT B : recomposées de plusieurs fractions granulaires distinctes, dans des proportions définies et qui sont malaxées et humidifiées en centrale.

#### **2.5 Modèles de la mécanique des chaussées :**

Les modèles de la mécanique des chaussées permettent d'expliquer le fonctionnement et le comportement des divers types de structures routières à partir d'une schématisation simple des structures et des charges appliquées. Ils permettent aussi d'évaluer le niveau de sollicitation d'une structure de chaussée. Les modèles doivent donc représenter le plus possible le fonctionnement des structures étudiées. Par souci de simplicité, la plupart des méthodes de calcul de la réponse mécanique de la chaussée sont basées sur des hypothèses simplificatrices: charge idéalisée, comportement linéaire élastique des matériaux; couches constituées de matériaux homogènes et isotropes. Les différents modèles les plus fréquemment utilisés sont :

### 2.5.1 Modèle monocouche de Boussinesq (1885) :

Le mathématicien Français Boussinesq considère le sol comme un massif élastique, semi infini. Il suppose en plus que le corps de chaussée en matériau granulaire n'est pas très différent du sol support. La charge  $q$  du pneumatique appliquée à la chaussée génère une contrainte en fonction de la profondeur. Le but est de rechercher à quelle profondeur du sol support la contrainte verticale a été suffisamment diffusée pour ne pas dépasser la contrainte admissible. L'allure du diagramme de contrainte à différentes profondeurs présenté par L'expression de la contrainte suivante:

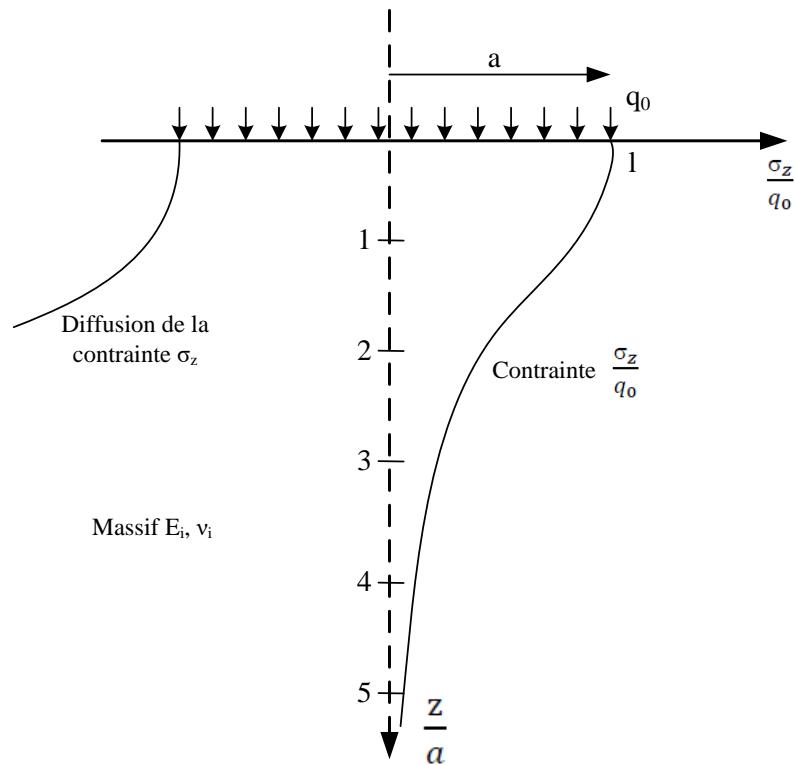
$$\sigma_z = q_0 \left[ 1 - \frac{z^3}{(a^2+z^2)^{3/2}} \right] \quad (3)$$

où

$q_0$  : Pression appliquée par le pneumatique

$a$  : Rayon d'action de la charge,

$z$  : Profondeur.



**Figure II. 4.** Diffusion des pressions dans un massif de Boussinesq

### 2.5.2 Modèle bicouche :

Dans le cas d'une faible contrainte sur le support; il peut être coûteux de réaliser la répartition des pressions par l'intermédiaire du corps granulaire ou bien le dimensionnement pour un corps de chaussée granulaire peut mener à une épaisseur forte. Pour l'éviter, les matériaux peuvent être traités aux liants hydrauliques ou hydrocarbonés. Le liant, avec son aptitude d'augmenter le module, modifie donc son comportement mécanique. La couche de chaussée fléchit sous la charge et s'accompagne de contrainte de traction par flexion à la base de la chaussée. Pour le dimensionnement nous devons satisfaire deux critères qui conditionnent son comportement dans le temps:

$$\sigma_z \leq \sigma_{adm} \text{ et } \sigma_t \leq \sigma_{adm}$$

Qui est une condition nécessaire et suffisante car :

$$\sigma_t \leq \sigma_{adm} \rightarrow \sigma_z \leq \sigma_{adm}$$

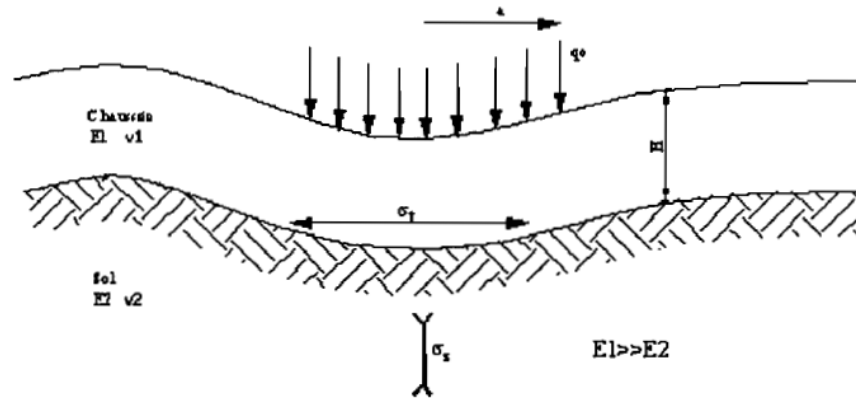


Figure II. 5. Modèle bicouche

### 2.5.3 Modèle de Hogg :

Le modèle bicouche génère des contraintes verticales et des déplacements qui 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  $\omega$  et  $\sigma_z$

$$D\Delta^2\omega = p \quad (4)$$

D : Facteur de rigidité

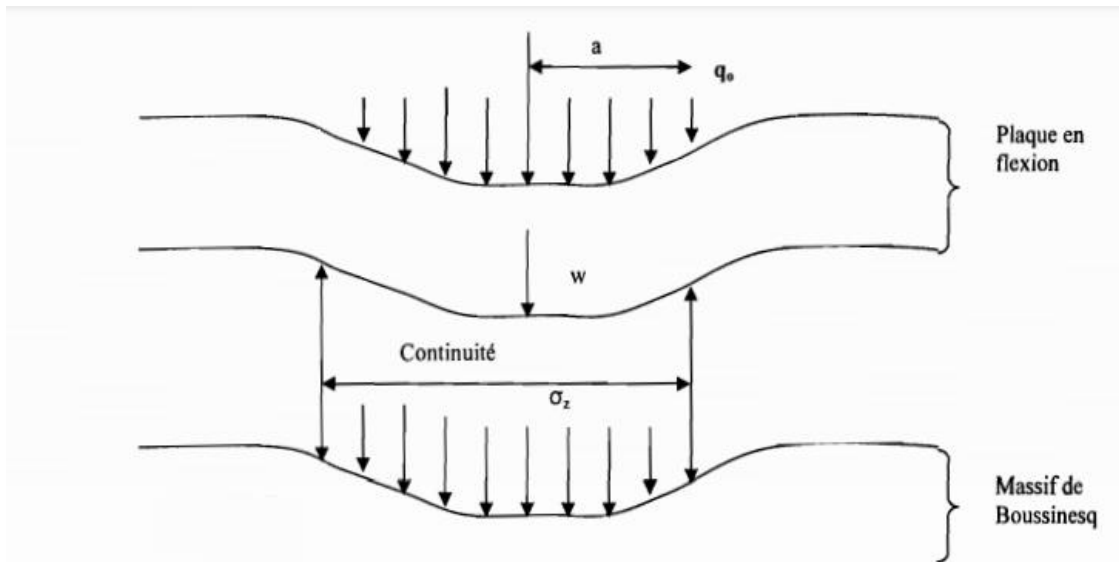
$$D = \frac{E_1 H^3}{12(1-\nu_1^2)} \quad (5)$$

P : Somme des pressions  $p = \sigma_z - q_0 \quad (6)$

$\omega$ : Déflexion

$$\Delta^2\omega = \frac{\sigma_z - q_0}{D} \quad (7)$$





**Figure II. 6.** Diffusion des contraintes selon Hogg

#### 2.5.4 Modèle de Westergaard (1927)

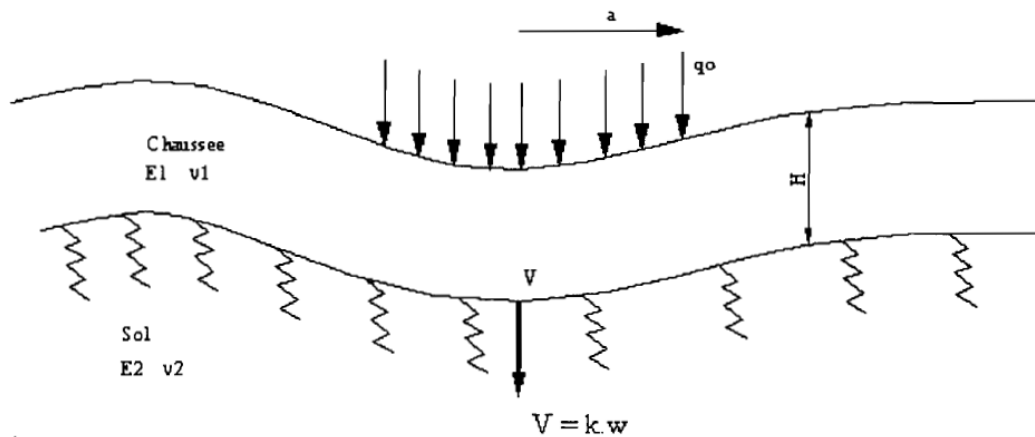
Outre l'hypothèse de la plaque utilisée par Hogg, Westergaard considère le sol comme un assemblage de ressort dont le déplacement vertical en un point est proportionnel à la pression verticale en ce point soit :

$$V = k w \quad (8)$$

V : Contrainte verticale sur le massif

W : Déplacement vertical de la plaque

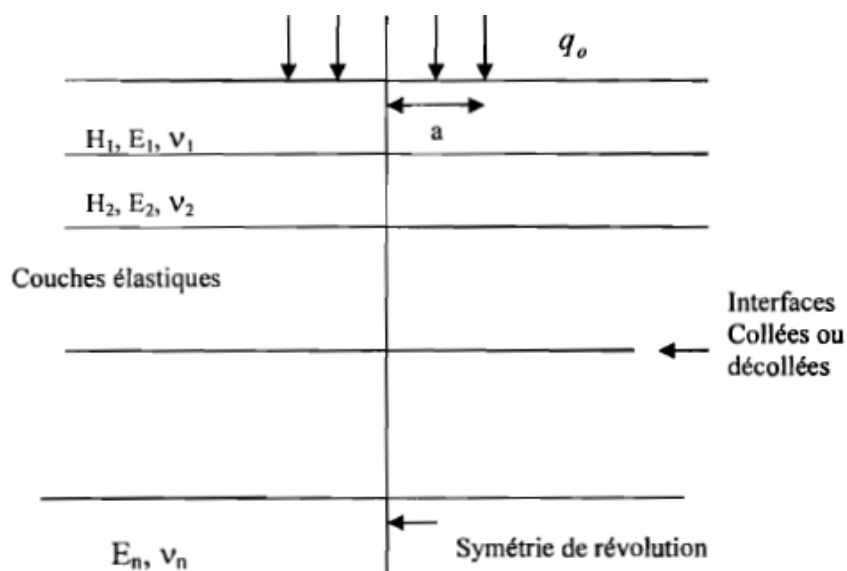
K : Module de réaction du sol



**Figure II. 7.** Diffusion de la contrainte selon Westergaard

### 2.5.5 Modèles multicouches (Burmister 1943)

Burmister a développé le cas de modèle à  $n$  couches. Il s'agit là d'un modèle 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.



**Figure II. 8.** Diffusion des contraintes selon Busmister

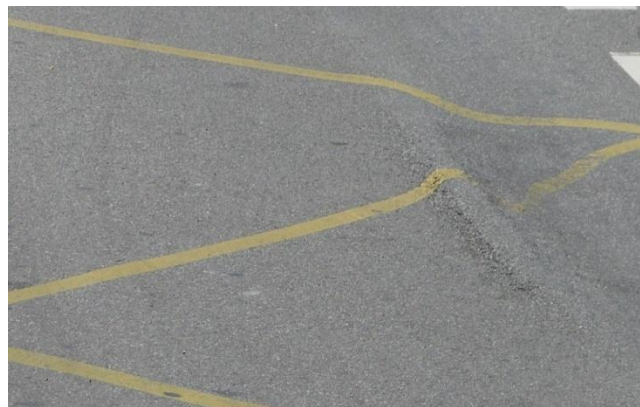
## 2.6 Différents types des dégradations des chaussées :

D'une manière générale, les dégradations observées dans les chaussées souples peuvent être répertoriées en quatre principales familles qui sont les déformations, les fissurations, les arrachements et les dégradations en milieu urbain [8].

### 2.6.1 Déformations :

Ce sont des dégradations qui entraînent une modification de la chaussée donnant à la surface de cette dernière un aspect différent de celui désiré. Ces déformations qui prennent naissance dans le corps de la chaussée affectent en générale les couches inférieures pour atteindre ensuite la couche de roulement et peuvent se distinguer selon leur forme ou leur localisation comme suit [8] :

- **Ornière à faible rayon** : qui correspond à une dépression longitudinale simple, double et parfois triple, de l'ordre de 250 mm de largeur, située dans les pistes de roues. Le profil Transversal de ces dépressions est souvent similaire à des traces de pneus simples ou jumelés.



**Figure II. 9.** Ornière à faible rayon

- **Ornière à grand rayon** : Elle est caractérisée par une dépression longitudinale simple située dans les pistes de roues. La forme transversale de la dépression correspond à celle d'une courbe parabolique très évasé



**Figure II. 10.** Ornière à grand rayon

### 2.6.2 Affaissement :

C'est une distorsion du profil en bordure de la chaussée ou au voisinage de conduites souterraines ou dépression très prononcée et souvent assez étendue se localisant soit en rive, soit en pleine largeur



**Figure II. 11.** Affaissements

### 2.7 Fissurations :

Les sollicitations répétées de flexion alternée dans la couverture bitumineuse d'une chaussée souple entraînent une dégradation par fatigue, sous la forme de fissures d'abord isolées puis évoluant peu à peu vers un faïençage à maille de faible dimension. Les fissurations sont définies comme étant une cassure de revêtement suivant une ligne avec ou sans rupture du corps de chaussée. Elles peuvent intéresser aussi bien la couche de roulement seule, qu'une partie ou la totalité du corps de chaussée [8].

### 2.7.1 Fissures transversales :

On parle de fissures transversales en cas de rupture du revêtement relativement perpendiculaire à la direction de la route, généralement sur toute la largeur de la chaussée.



**Figure II. 12.** Fissures transversals

### 2.7.2 Fissures longitudinales :

Elles sont définies par la rupture du revêtement relativement parallèle à la direction de la route.



**Figure II. 13.** Fissures longitudinales

### 2.7.3 Fissurations anarchiques

Elles proviennent du vieillissement de l'enrobé.



**Figure II. 14.** Fissures anarchiques

### 2.7.4 Faiénçage :

Le faiénçage est par définition un ensemble de fissures plus ou moins rapprochées formant des mailles. Elles sont dites à mailles fines ou peaux de crocodiles lorsque le côté varie de 10 à 40 cm et à mailles larges au-delà de 40 cm. Ce le nom donné au réseau de fissures qui apparaissent parfois sur le revêtement en enrobés lorsque ceux-ci sont placés sur une chaussée trop déformable. Il s'agit d'une rupture du revêtement par fatigue qui met en cause l'épaisseur du revêtement compte tenu des charges roulantes, de leur fréquence et de la qualité de chaussé.



**Figure II. 15.** Faiénçage

## 2.8 Arrachements :

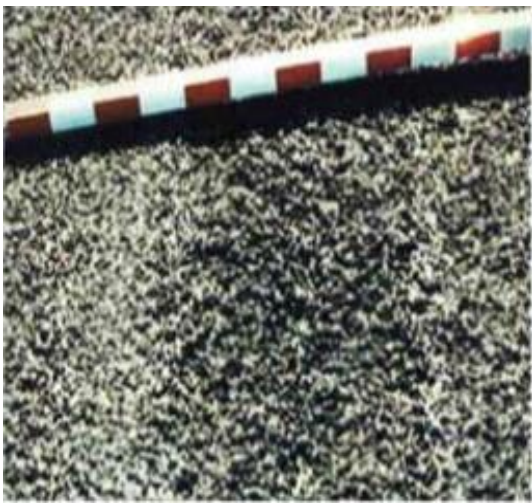
Les arrachements sont des désordres affectant en général la couche de roulement

### 2.8.1 Désenrobage

Le désenrobage est la perte des gros granulats en surface produisant une détérioration progressive du revêtement.

### 2.8.2 Nid de poule

Le nid-de-poule est la manifestation finale d'une combinaison de différents problèmes. Il est caractérisé par une désagrégation localisée du revêtement sur toute son épaisseur formant des trous de forme généralement arrondie, au contour bien défini, de taille et de profondeur variables.



Desenrobages



Nide de poule

**Figure II. 16.** Arrachements

## 2.9 Dégradations :

La dégradation est décrite par la rupture du revêtement suivant un tracé circulaire et/ou radial

### 2.9.1 Ressuage

Le ressuage est une remontée de bitume à la surface du revêtement, accentuée dans les pistes de roues

### 2.9.2 Pelade :

C'est la dégradation des plaques de l'enrobé de la couche de surface.





Ressuage



Pelade

**Figure II. 17.** Dégradations



**CHAPITRE III: CONTRAINTES ET  
DEFORMATIONS DANS LES CHAUSSEES  
SOUPLES**

### 3 Contraintes et déformations dans les chaussées souples

#### 3.1 Introduction :

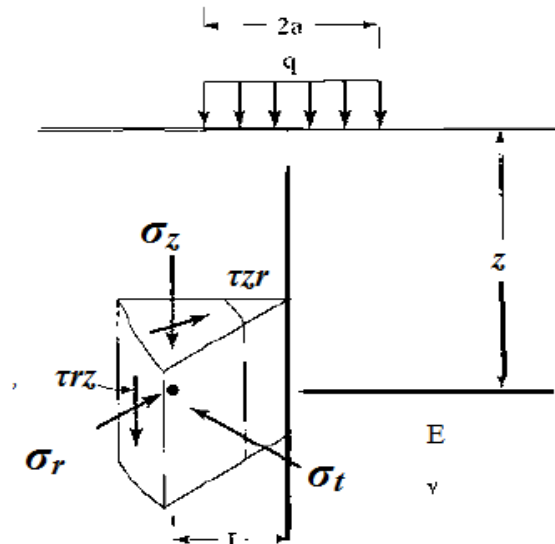
Lorsque la roue du véhicule se déplace sur la surface de la chaussée, une impulsion de charge est appliquée. Cette impulsion crée des contraintes et des déformations dans tout le système de la chaussée. Lorsque ces contraintes et déformations sont répétées plusieurs fois au cours des années, la chaussée se détériore progressivement jusqu'à atteindre une défaillance. Par conséquent, l'ampleur et le nombre de répétitions des contraintes et déformations affectent les performances de la chaussée et déterminent sa durée de vie. Il est donc important d'estimer avec précision ces contraintes et déformations dans le système de chaussée afin de pouvoir concevoir la chaussée avec précision [2].

#### 3.2 Contraintes :

La chaussée est soumise à différentes contraintes verticales, horizontales et cisaillements. Les contraintes sont engendrées par les charges en surface et diffusées, atténuer par l'assise à des niveaux acceptables et compatibles avec les caractéristiques mécaniques du sol. Ils se divisent en une contrainte majeure  $\sigma_1$  et une mineure  $\sigma_3$ . Ces contraintes sont composées de 3 contraintes normales ( $\sigma_z, \sigma_r, \sigma_t$ ) agissant perpendiculairement à la face de l'élément et de 6 contraintes de cisaillement ( $\tau_{rt}, \tau_{tr}, \tau_{rz}, \tau_{zr}, \tau_{zt}, \tau_{tz}$ ) Agissant parallèlement à la face. À partir des conditions d'équilibre ; les contraintes de cisaillement agissant sur les faces sécantes sont égales.

Ainsi ;  $\tau_{rt} = \tau_{tr}, \tau_{rz} = \tau_{zr}$  et  $\tau_{tz} = \tau_{zt}$ . À chaque point du système, il existe une certaine

Orientation de l'élément telle que les contraintes de cisaillement agissant sur l'élément telles que les contraintes de cisaillement agissant sur chaque face soient égales à zéro. Les contraintes Normales dans cette condition sont définies comme des contraintes principales et sont notées  $\sigma_1$  (Contrainte majeure),  $\sigma_2$  (intermédiaire) et  $\sigma_3$  (contrainte mineure).



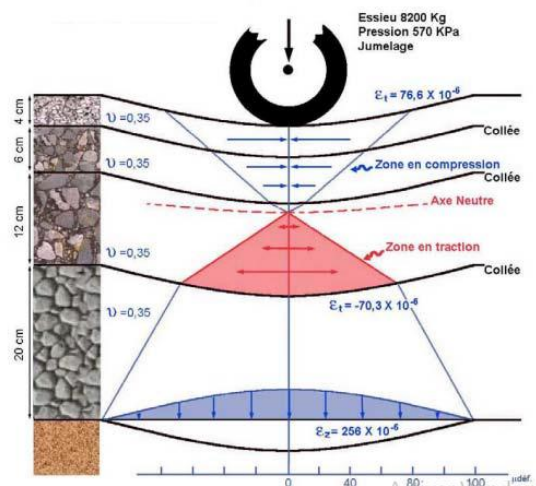
**Figure III. 1.** Composante des contraintes sous charge asymétrique

Les déformations Étant donné l'état de contrainte triaxial de tout élément, peuvent être calculées à l'aide des équations suivantes :

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_r + \sigma_t)] \tag{9}$$

$$\epsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_t + \sigma_z)] \tag{10}$$

$$\epsilon_t = \frac{1}{E} [\sigma_t - \mu(\sigma_r + \sigma_z)] \tag{11}$$



**Figure III. 2.** Déformation d'un corps de chaussée sous une charge de roue

### 3.3 Déformations :

Lorsqu'un matériau granulaire est soumis à des chargements cycliques à contraintes imposées, comme pour le trafic routier, les déformations de la structure granulaire dépendent des déformations suivantes :

- Déformation élastique de chaque particule
- Glissement entre particules (irréversible)
- Déformation due à l'éclatement des grains et à l'attrition (irréversible)

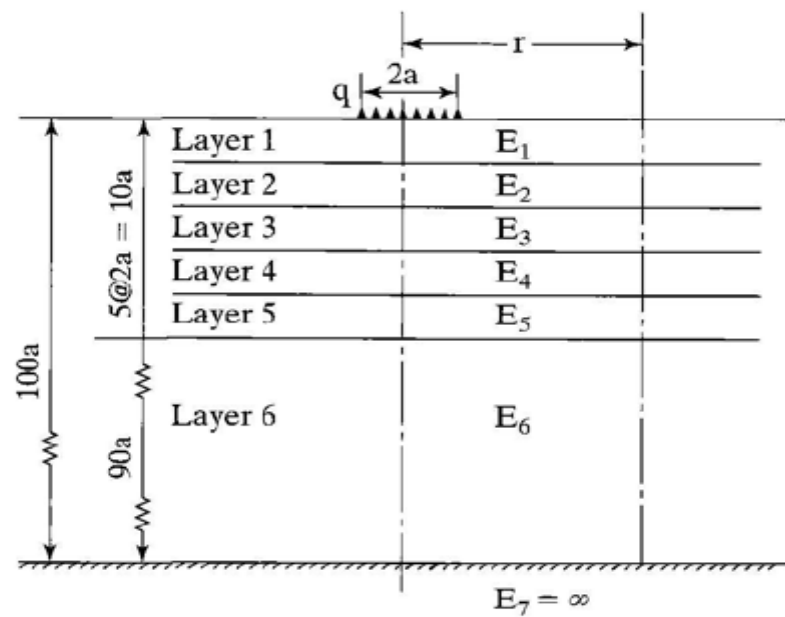
La déformation des sols et matériaux granulaires sous pression est le résultat de trois mécanismes principaux :

- Consolidation : changement de forme et de compressibilité des particules
- Distorsion : courbure, mouvement individuel des particules
- Attrition : écrasement et rupture des matériaux quand la charge excède la résistance de la particule.

### 3.4 Solutions analytiques utilisées par KENPAVE

#### 3.4.1 Masse non linéaire

Les solutions de Boussinesq reposent sur l'hypothèse que le matériel qui constitue le demi-espace est élastique linéaire. Il est bien connu que les sols ne sont pas élastiques et subissent une déformation permanente sous des charges stationnaires répétées et l'application des charges mobiles de trafic, la plupart des déformations sont récupérables et peuvent être considérées comme élastiques. Il est donc possible de choisir un module d'élasticité raisonnable en fonction de la vitesse de déplacement des charges. La linéarité implique l'applicabilité du principe de superposition, de sorte que la constante élastique doit ne pas varier avec l'état. Soulignons. En d'autres termes, la déformation axiale d'un matériau élastique linéaire sous la contrainte doit être indépendante de la pression de confinement. Cela n'est évidemment pas vrai pour les sols, car leur déformation axiale dépend fortement de l'ampleur des pressions de confinement. Par conséquent, l'effet de la non-linéarité sur la solution de Boussinesq présente un intérêt pratique.



**Figure III. 3.** Division du demi-espace en un système à sept couches

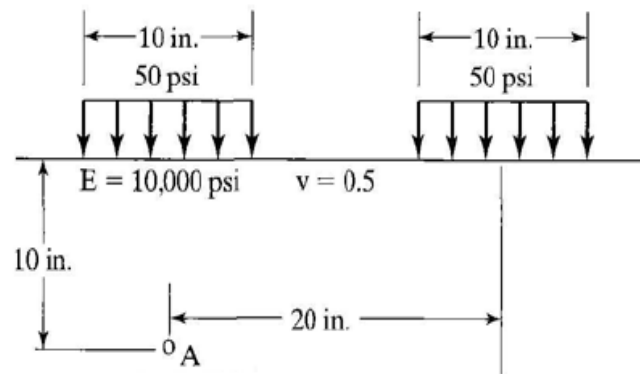
### 3.4.2 Masse homogène

Pour caractériser le comportement d'une chaussée flexible sous charges des roues on le considère comme un demi-espace homogène. Un demi-espace a une grande surface infinie et une profondeur infinie avec un plan supérieur sur lequel les charges sont appliquées.

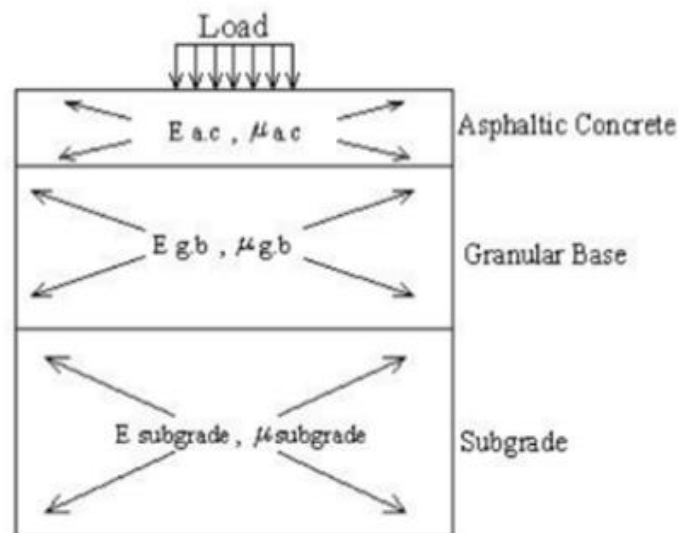
La théorie originale de Boussinesq (1885) base sur une charge concentrée

Appliquée sur un demi -l'espace. Les contraintes, déformations et déviations dues à une charge concentrée peuvent être intégrées pour obtenir celles dues à une zone de charge circulaire. Avant le développement de la théorie des couches par Burmister (1943), une grande attention a été accordée aux solutions de Boussinesq, car c'étaient les seules disponibles.

La théorie peut être utilisée pour déterminer les contraintes, les déformations dans la couche de fondation si le rapport de module entre l'espace et la couche de fondation est proche de l'unité, par une mince surface en asphalte et une fine base granulaire.



**Figure III. 4.** Demi-espace homogène soumis à deux charges circulaires



**Figure III. 5.** Analyse linéaire-élastique réalisée à l'aide de Kenlayer

### 3.4.3 Méthode itérative

La méthode itérative a commencé par la démonstration de Huang qui a montré que les contraintes verticales ne sont pas affectées de manière significative selon que les contraintes à  $r = 0$  ou  $r = \infty$  sont utilisées pour déterminer le module d'élasticité, mais les déplacements verticaux sont énormément affectés. Il a ensuite utilisé la méthode des éléments finis et a constaté que le comportement non linéaire des sols a des grands effets sur les déplacements verticaux et radiaux, un effet intermédiaire sur les contraintes radiales et tangentielles, et un effet très faible sur les contraintes verticales et de cisaillement. En fonction de la profondeur du point en question, les contraintes verticales basées sur la théorie non linéaire peuvent être

supérieures ou inférieures à celles basées sur la théorie linéaire et, à une certaine profondeur, les deux théories pourraient produire les mêmes tensions.

Le module d'élasticité de chaque couche est déterminé à partir de :

$$E = E_0 (1 + \beta \theta) \quad (12)$$

$E$  : Module d'élasticité de contrainte donné

$\theta$  : Somme de trois contraintes normales

$E_0$  : Module d'élasticité initial

$\beta$  : Constante de sol indiquant l'augmentation de module d'élasticité par unité d'augmentation de contrainte.

Les contraintes doit inclure à la fois les effets de la charge appliquée et les contraintes géostatiques ; ça peut être exprimée par l'équation suivantes :

$$\theta = \sigma_z + \sigma_r + \sigma_t + \gamma z \quad (13)$$

$\sigma_z$  : Contrainte vertical.

$\sigma_r$  : Contrainte radiale.

$\sigma_t$  : Contrainte tangentielle.

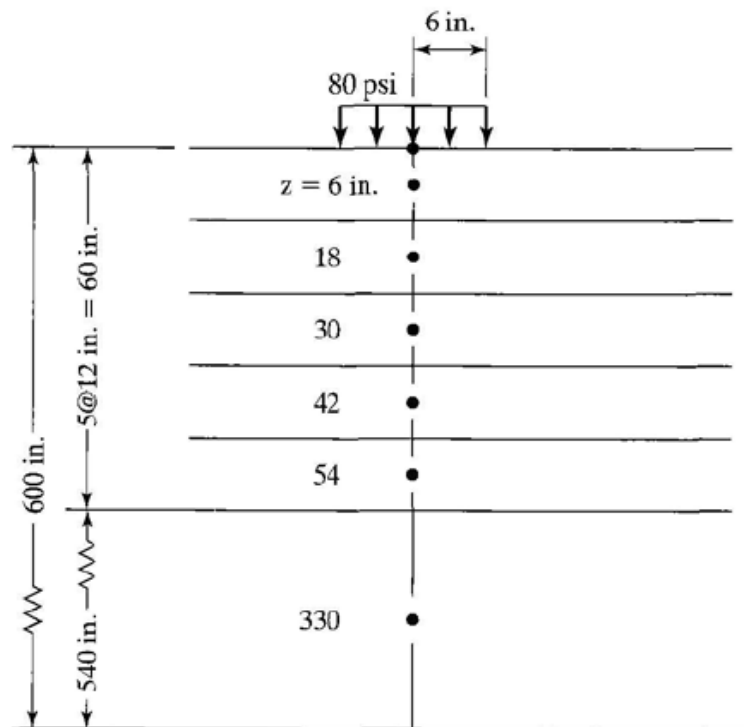
$\gamma$  : Poids volumique du sol

$z$  : Distance sous la surface du sol à laquelle la contrainte

#### 3.4.4 Méthode approximative

Cette méthode divise le demi-espace non linéaire en plusieurs couches et de détermine les contraintes à mi-hauteur de chaque couche par les équations de Boussinesq basées sur la théorie linéaire. A partir des contraintes ainsi obtenues, le module d'élasticité  $E$  pour chaque couche est déterminé à partir d'Equation (10). La déformation de chaque couche, qui est la différence de déflexion entre le haut et le bas de chaque couche basée sur le  $E$  donné, peut alors être obtenue. A partir de la base rigide, ou une profondeur éloignée de la surface où le déplacement vertical peut être considéré comme nul, la des déformations sont ajoutées pour

obtenir les déviations à différentes profondeurs. La Figure 3.6 représente l'analyse par la méthode approximative.



**Figure III. 6.** Subdivision de la couche

### 3.5 Systèmes à Couches :

Les chaussées souples sont des systèmes de couches avec un matériau meilleur au-dessus et ne peuvent pas être représentées par une masse homogène, c'est pourquoi l'utilisation de la théorie des couches de Burmister est plus appropriée. En 1943 Burmister a créé des solutions pour un système à deux couches en 1945 puis il a étendue à un système à trois couches avec l'avantage des ordinateurs, la théorie peut être appliquée à un système à n couches. La figure 3.6 montre un système à n couches. Elle nécessite les hypothèses suivantes :

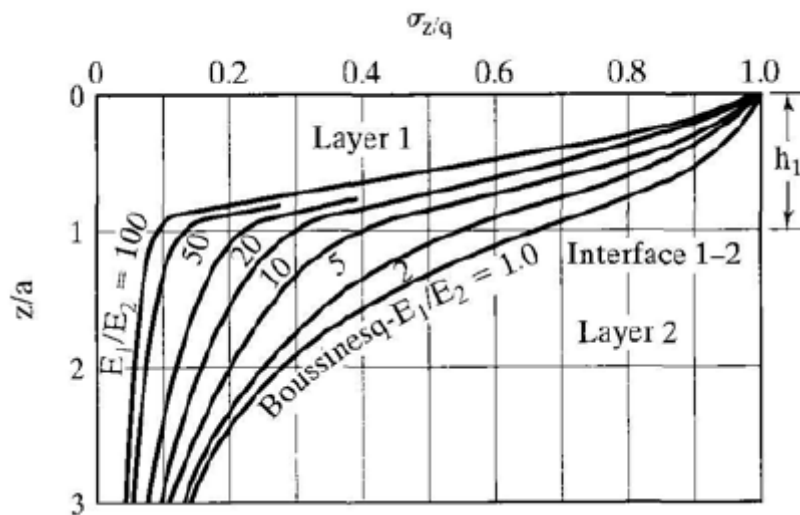
- Chaque couche est homogène, isotrope et linéairement élastique avec un module d'élasticité  $E$  et un coefficient de Poisson.
- La matière est en apesanteur et son étendue est infinie.
- Chaque couche a une épaisseur finie  $h$ , sauf la couche la plus basse a une épaisseur infinie.
- Une pression uniforme  $q$  est appliquée sur la surface sur une zone circulaire de rayon  $a$ .
- Les conditions de continuité sont satisfaites aux interfaces des couches, comme l'indique la même contrainte verticale, contrainte de cisaillement, déplacement vertical



et déplacement radial. Pour une interface sans frottement, la continuité de la contrainte de cisaillement et du déplacement radial est remplacé par une contrainte de cisaillement nulle de chaque côté de l'interface.

### 3.5.1 Systèmes à deux couches :

Le système à deux couches est la construction en pleine profondeur dans laquelle une épaisse couche d'enrobe à chaud est placée directement sur le sol. Les contraintes dans un système à deux couches dépendent du rapport de module  $\frac{E_1}{E_2}$  et du rapport épaisseur-rayon  $\frac{h_1}{a}$ . La figure III.7 montre l'effet d'une couche de revêtement sur la répartition des contraintes verticales sous le centre d'une zone de charge circulaire. Le graphique est applicable au cas où l'épaisseur  $h_1$  de la couche 1 est égale au rayon de contact zone, ou  $\frac{h_1}{a} = 1$

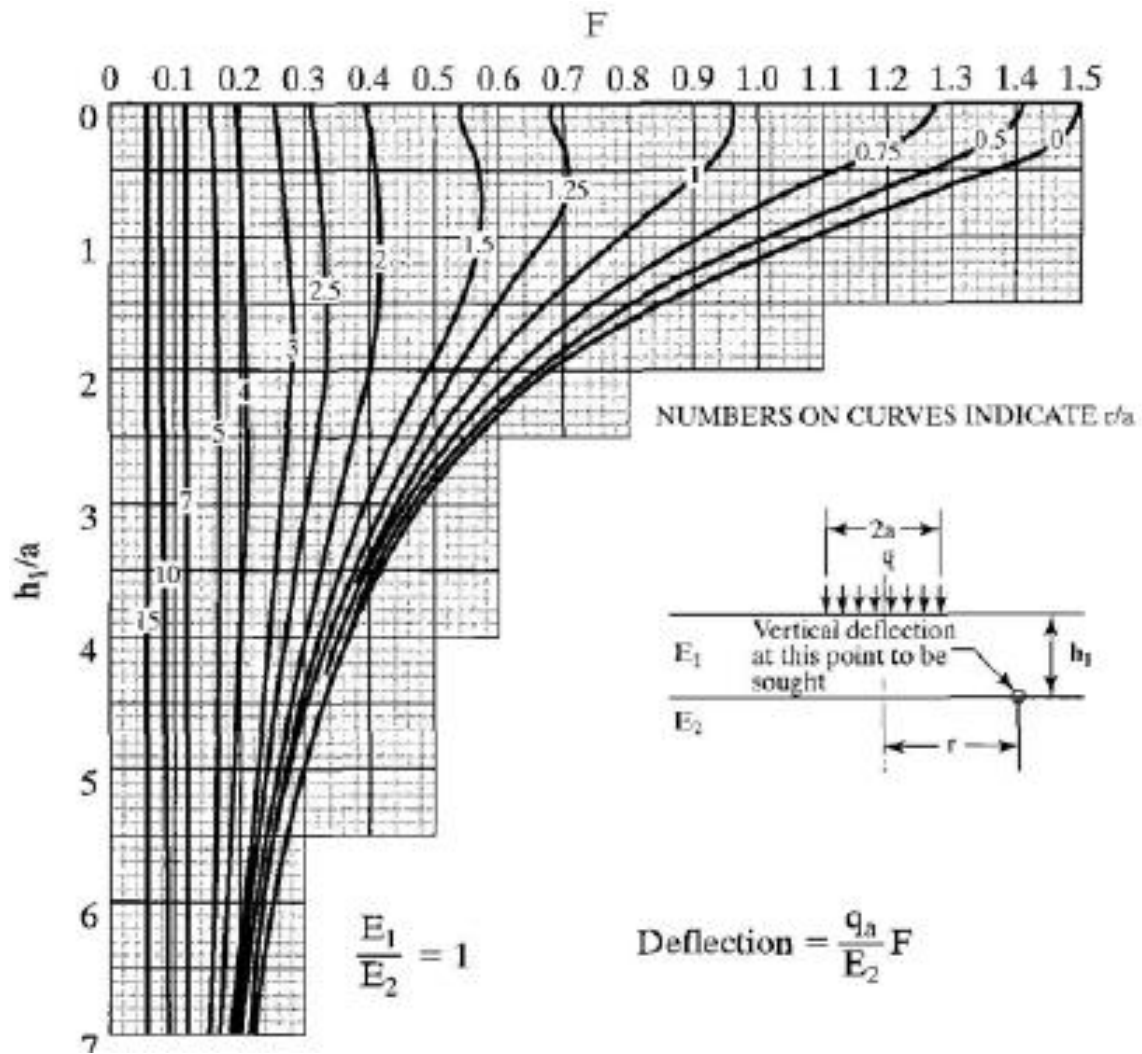


**Figure III. 7.** Distribution verticale des contraintes dans un système à deux couches

#### 3.5.1.1 Le déplacement de surface verticale

Le déplacement de surface verticale a également été utilisé comme critère de conception. La figure III.8 peut être utilisée pour les déterminer dans un système à deux couches. La déflexion est exprimée en termes de facteur F par :

$$\omega = \frac{q_a}{E_2} F \quad (14)$$



**Figure III. 8.** Déflexion verticale de l'interface d'un système à deux couches

### 3.5.1.2 Déformation à la traction critique :

Les déformations à la traction situées au bas de la couche d'asphalte ont été utilisées comme critère de conception pour empêcher la fissuration par fatigue. Deux types de souches principales pourraient être considérés. L'une est la déformation principale globale basée sur les six composantes des contraintes normales et de cisaillement [4].

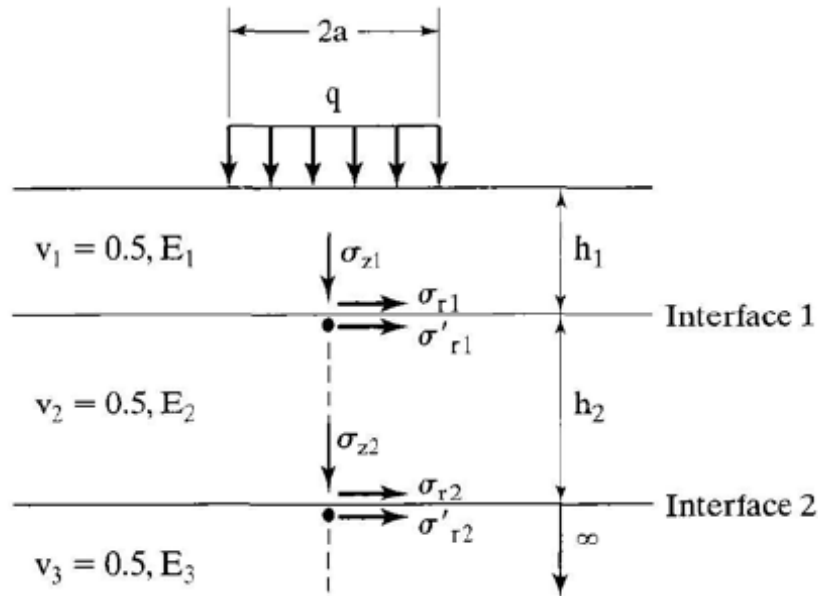
### 3.5.2 Systèmes à trois couches

Les contraintes dans un système à trois couches dépendent des coefficients  $K_1$ ,  $K_2$  à respecter, A et H, définis comme suit :

$$K_1 = \frac{E_1}{E_2} \quad K_2 = \frac{E_2}{E_3} \quad (15)$$

$$A = \frac{a}{h_1} \quad H = \frac{h_1}{h_2} \quad (16)$$

Ces rapports sont tirés de la figure suivant :



**Figure III. 9.** Contraintes aux interfaces dans un système à couches

Cette figure présente un système à trois couches et les contraintes aux interfaces sur l'axe de symétrie. Ces contraintes incluent la contrainte verticale à la première interface ( $\sigma_{z1}$ ). Contrainte verticale à la deuxième interface ( $\sigma_{z2}$ ). Contrainte radiale au bas de la couche une ( $\sigma_{z1}$ ). Contrainte radiale en haut de la deuxième couche ( $\sigma'_{z1}$ ). Contrainte radiale au bas de la deuxième couche ( $\sigma_{z1}$ ) et contrainte radiale en haut de troisième couche ( $\sigma'_{z2}$ ).

Les contraintes radiales et tangentielles sont identiques sur l'axe de symétrie, et les contraintes sont égales à 0. Lorsque le coefficient de Poisson est de 0,5 on peut tirer les équations de déformation vertical et radial d'un système a trois couches à partir de l'équation (9) :

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} (\sigma_z - \sigma_r) \quad (17)$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{2E} (\sigma_r - \sigma_z) \quad (18)$$

L'équation (18) indique que la déformation radiale est égale à la moitié de déformation verticale est de signe opposé.

$$\varepsilon_z = -2\varepsilon_r \quad (19)$$






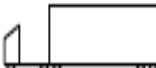


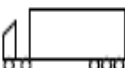
L'équation (18) peut être visualisée physiquement à partir du fait que, lorsqu'un matériau est incompressible et a un coefficient de Poisson de 0,5, la déformation horizontale est égale à la moitié de la déformation verticale et la somme de  $\varepsilon_z$ ,  $\varepsilon_r$ , et  $\varepsilon_t$  doit être égale à 0.

$k_1 = 2, 20$  et  $200$ , et  $k_2 = 2$  et  $20$  ils sont présentés, pour économiser l'espace. Les valeurs intermédiaires de  $k_1$  et  $k_2$  peuvent être obtenues par une interpolation.

### **3.6 Effet des configurations d'essieux et de pneus sur la chaussée souple :**

On prend en considération 3 type de roues dans la conception des chaussées souple routières : roues simple, jumelage et tandem le tableau suivant simplifie les type de véhicules les roues et la surface de contact roue-chaussée et la pression pneumatiques.

**Tableau III. 1.** Caractéristiques du véhicule, des essieux et des pneus

Vehicle Figure	Tire Code	Tire Type	Load per Tire (Tonne)	Tire Pressure (Kpa)	Tire Radius (cm)	Tire Spacing (cm)	Axle Spacing (cm)
	1a	Single Axle Single Tire	2	700	9,44	0	0
	1b	Single Axle Single Tire	2	700	9,44	0	0
	2a	Single Axle Single Tire	2,5	760	10,13	0	0
	2b	Single Axle Dual Tires	2,3	660	10,43	31,8	0
	3a	Single Axle Single Tire	2,5	760	10,13	0	0
	3b	Single Axle Dual Tires	2,525	760	10,18	31,8	0
	4a	Single Axle Single Tire	3,625	830	11,68	0	0
	4b	Tandem Axle Dual Tires	2,25	660	10,32	31,8	120
	5a	Single Axle Single Tire	4	850	12,12	0	0
	5b	Tandem Axle Dual Tires	2,25	660	10,32	31,8	120
	5c	Tandem Axle Dual Tires	2,25	660	10,32	31,8	120
	6a	Single Axle Single Tire	2,75	760	10,63	0	0
	6b	Tandem Axle Dual Tires	2,25	660	10,32	31,8	120
	6c	Tandem Axle Dual Tires	2,25	660	10,32	31,8	120
	7a	Single Axle Single Tire	3	830	10,62	0	0
	7b	Tandem Axle Dual Tires	2,125	660	10,03	31,8	137
	7c	Tridem Axle Dual Tires	2,25	660	10,32	31,8	137
	8a	Single Axle Single Tire	3	830	10,62	0	0
	8b	Single Axle Dual Tires	1,75	660	9,10	31,8	0
	8c	Tandem Axle Dual Tires	2,375	660	10,60	31,8	120
	9a	Single Axle Single Tire	3	830	10,62	0	0
	9b	Single Axle Single Tire	3,5	700	11,47	0	0
	9c	Tridem Axle Dual Tires	2	660	9,73	31,8	120

L'analyse d'effet de déformation de chaque essieu et chaque type de pneu peut être examinée à travers le tableau 1 à l'aide de logiciels d'analyse KENPAVE. Les données nécessaires sont le module d'élasticité, le coefficient de poisson, l'épaisseur des couches de la chaussée et la condition de charge. La réponse critique causée par la configuration de l'essieu et du pneu peut être facilement déterminée en comparant les réponses à différents points le long de la direction transversale. Les figures suivant montrent le point d'analyse pour chaque type de configuration d'essieu afin de connaître l'emplacement du point critique de déformation [1].

# **CHAPITRE IV: DESCRIPTION DU LOGICIEL**

## **KENPAVE**

## 4 Description du logiciel KENPAVE

### 4.1 Introduction

KENPAVE est un logiciel d'analyse et de conception des chaussées qui permet de calculer les contraintes, les déplacements et les déformations des chaussées souples et rigides. Le logiciel KENPAVE est développé en 1993 par Yang H. Huang, professeur émérite de génie civil à l'Université du Kentucky, est utilisé pour modéliser des structures de chaussée flexibles et rigides typiques.

Le logiciel contient quatre programmes informatiques distincts LAYERINP, KENLAYER, SLABSINP et KENSLABS (pour les chaussées rigides). La figure IV.1 illustre l'écran principal de KENPAVE, composé de deux zones de saisie en haut et de 11 fenêtres de commande en bas. Les trois boutons de gauche sont utilisés pour les chaussées flexibles, les cinq de droite pour les chaussées rigides et les quatre autres pour les besoins généraux.



Figure IV. 1. Écran du Logiciel KENPAVE

## 4.2 KENSLAB :

Le programme informatique KENSLABS est basé sur la méthode des éléments finis, dans laquelle la dalle est divisée en éléments finis rectangulaires avec un grand nombre de nœuds. Les charges des roues et les réactions du sol sont appliquées à la dalle comme des forces verticales concentrées verticalement aux nœuds. Son programme d'entrée est SLABSINP et ses programmes graphiques sont SGRAPH et CONTOUR. L'analyse des dommages peut être effectuée en divisant chaque année en un maximum de 12 périodes, chacune avec un maximum de 12 groupes de charge.

## 4.3 KENLAYER :

### 4.3.1 Développements théoriques

KENLAYER est un programme informatique développé à l'Université du Kentucky et utilisé pour la solution d'un système multicouche élastique sous une zone à chargement circulaire. Son principe de calcul est basé sur la théorie multicouche élastomère de Burmister, Similaire à d'autres programmes basés sur la méthode analytique. Il s'applique uniquement aux chaussées souples sans joints ni couches rigides. Les solutions sont superposées pour les roues multiples, appliquées itérativement pour les couches non linéaires, et colocalisées à différents moments pour les couches viscoélastiques

Par conséquent, KENLAYER peut être appliqué à des systèmes a multicouches sous des roues simples, doubles, doubles tandems ou doubles tridem avec chaque couche se comportant différemment, soit élastique linéaire, non linéaire, élastique ou viscoélastique. L'analyse des dommages peut être effectuée en divisant chaque année en un maximum de 12 périodes, chacune avec un ensemble différent de propriétés du matériau. Chaque période peut avoir un maximum de 12 groupes de charges, uniques ou multiples. Les dommages causés par fissuration par fatigue et déformation permanente dans chaque période sur l'ensemble des groupes de charge sont additionnés pour évaluer la durée de vie théorique. L'analyse des dommages est effectuée à la fois pour la fissuration par fatigue et pour la déformation permanente. Le critère de rupture pour la fissuration par fatigue est exprimé comme suit :

$$N_f = f_1(\varepsilon_t)^{-f_2} (E_2)^{-f_3} \quad (20)$$

$N_f$ : Nombre autorisé de répétitions de charge pour éviter les fissures de fatigue

$\varepsilon_t$ : Contrainte de traction au bas de la couche d'asphalte

$E_1$ : Module d'élasticité de la couche d'asphalte

$f_1, f_2$  et  $f_3$  : Constantes déterminées à partir d'essais de fatigue en laboratoire



#### 4.3.1.1 Description du programme :

KENLAYER, avec le programme d'entrée LAYERINP et le programme graphique LGRAPH, fait partie du logiciel KENPAVE. Dans ses dimensions actuelles, il peut être appliqué sur un maximum de 19 couches avec des sorties à 10 coordonnées radiales et 19 coordonnées verticales différentes, soit un total de 190 points. Pour les roues multiples, en plus des 19 coordonnées verticales, des solutions peuvent être obtenues sur un total de 25 points en spécifiant les coordonnées x et y de chaque point. Les conformités de fluage peuvent être spécifiées à un maximum de 15 durées. L'analyse de l'endommagement peut être faite en divisant chaque année en un maximum de 12 périodes, chacune avec un maximum de 12 groupes de charge. Pour faciliter la saisie et l'édition des données, on utilise LAYERINP. Ce programme utilise des menus et des formulaires d'entrée de données pour créer et éditer le fichier de données. Bien que le grand nombre de paramètres d'entrée semble écrasant, des valeurs par défaut sont fournies pour beaucoup d'entre eux, de sorte que seul un nombre limité d'entrées sera nécessaire.

#### 4.3.1.2 Analyse élastique linéaire de KENLAYER

Cette analyse est basée sur l'hypothèse que toutes les couches sont élastiques linéaires. Bien que les couches d'enrobés à chaud sont viscoélastiques linéaire et les couches granulaires sont élastiques non linéaires, une procédure approximative consiste à supposer qu'elles sont linéairement élastiques en sélectionnant les modules appropriés pour l'enrobé à chaud, en fonction de la vitesse des véhicules et de la température de la chaussée, et pour les matériaux granulaires, en fonction du niveau de charge. Le programme KENLAYER utilise la théorie d'élasticité à multicouches, les valeurs du module d'élasticité et le coefficient de poisson sont supposés être constants sur l'ensemble de la couche.

#### 4.3.2 Analyse élastique non linéaire de KENLAYER

Cette analyse est basée sur l'hypothèse qu'une ou plusieurs couches sont élastiques non linéaires avec un module de résilience dépendant de la contrainte. La couche granulaire non linéaire peut être considérée comme une couche unique ou subdivisée en un certain nombre de couches, chacune ne dépassant pas 51 mm d'épaisseur.

Le programme KENLAYER permet la résolution de systèmes comportant jusqu'à 12 couches non linéaires afin d'accroître la sensibilité des analyses, les couches de base granulaires sont divisées en 12 sous-couches d'épaisseur égale. Les points de contrainte pour chaque sous-couche sont définis comme les points placés sous la ligne centrale de chargement

à mi profondeur de chaque sous-couche. Les calculs sont effectués chaque sous-couche par son module d'élasticité et le coefficient de Poisson des matériaux in situ. Les valeurs de module dans la direction radiale doivent être implémentées dans l'analyse et ce type de modélisation peut être obtenu à l'aide de la méthode des éléments finis.

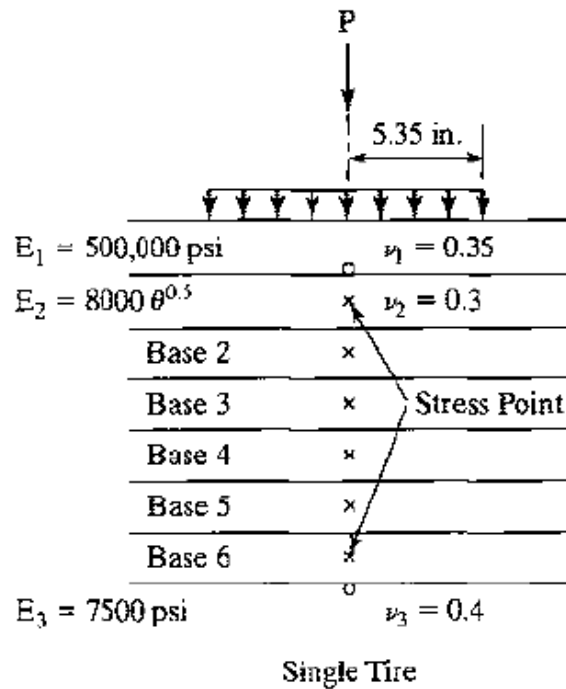


Figure IV. 2. Exemple d'une analyse non linéaire

#### 4.4 Matériaux granulaires :

Le module résilient des matériaux granulaires augmente avec l'augmentation du premier invariant de contrainte, comme l'indique l'équation (21). Cependant, KENLAYER utilise une relation plus populaire, qui est décrite ci-après.

##### 4.4.1 Relation constitutive :

Une relation simple entre le module résilient et le premier invariant de contrainte peut être exprimé comme suit :

$$E = K_1 \theta^k \quad (21)$$

dans laquelle  $K_1$  et  $K_2$  sont des constantes dérivées expérimentalement et  $\theta$  est l'invariant de contrainte, qui peut être soit la somme de trois contraintes normales  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  et  $\sigma_z$ , et la somme de trois contraintes principales  $\sigma_1 + \sigma_2$  et  $\sigma_3$  :

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (22)$$

y compris le poids d'un système en couches donne

$$\theta = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z + \gamma z (1+2k_0) \quad (23)$$

Dans laquelle  $\gamma$  est le poids unitaire moyen,  $z$  est la distance sous la surface à laquelle le module doit être déterminé, et  $K_0$  est le coefficient de la pression terrestre au repos.

Les motifs à  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$  ne sont pas utilisés dans l'équation (23) est qu'ils peuvent ne pas être dans la même direction que les contraintes géostatiques.

Contrairement à d'autres programmes informatiques, KENLAYER utilise la convention de signe de la mécanique des sols pour les contraintes et les déformations. Par conséquent, 0 est positif en compression et négatif en traction.

Material type	No. of data points	$K_1$ (psi)		$K_2$	
		Mean	Standard deviation	Mean	Standard deviation
Silty sand	8	1620	78	0.62	0.13
Sand-gravel	37	4480	4300	0.53	0.17
Sand-aggregate blend	78	4350	2630	0.59	0.13
Crushed stone	115	7210	7490	0.45	0.23

Note. 1 psi = 6.9 kPa.

Source. After Rada and Witczak (1981).

**Tableau IV. 1.** Constantes non linéaires  $K_1$  et  $K_2$  pour les matériaux granulaires

#### 4.4.2 Sols à grains fins

Le module résilient des sols à grains fins diminue avec l'augmentation de la contrainte déviatrice  $\sigma_d$  dans les essais triaxiaux en laboratoire,  $\sigma_2 = \sigma_3$ , donc la contrainte déviatrice est définie comme suit :

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (24)$$

Dans un système de couches,  $\sigma_2$  peut ne pas être égal à  $\sigma_3$ , de sorte que la moyenne de  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$  est considérée comme  $\sigma_3$ . En incluant le poids du système en couches, on obtient :

$$\sigma_d = \sigma_1 - 0.5(\sigma_2 + \sigma_3) + \gamma z (1 - k_0) \quad (25)$$

L'équation (25) n'est pas théoriquement correcte car les contraintes principales de chargement peuvent ne pas être dans la même direction que les contraintes géostatiques. Les

contraintes de charge dans le sous-sol sont généralement faibles et n'ont pas d'effet significatif sur le module calculé.

KENLAYER utilise les trois contraintes normales  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  et  $\sigma_z$ , pour remplacer les trois contraintes principales,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$  dans l'équation 6. Si le point choisi pour le calcul du module se trouve sur l'axe de symétrie pour une seule roue ou sur le plan de symétrie entre deux roues doubles, les trois contraintes normales et les trois contraintes principales sont identiques.

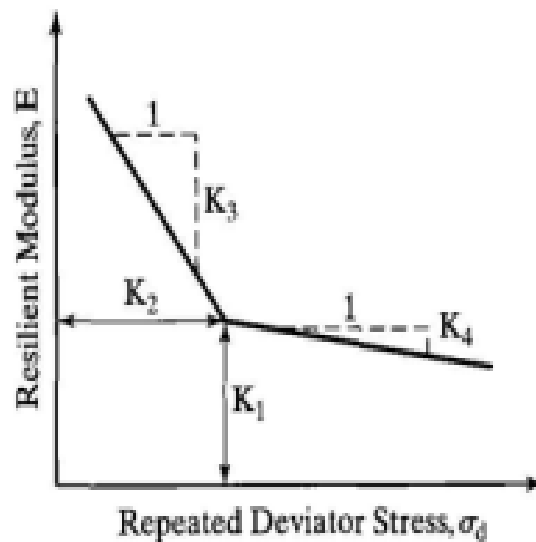
La figure IV.3 montre la relation générale entre le module résilient et la contrainte de déviation des sols à grains fins obtenue à partir d'essais de charge répétés en laboratoire.

Le comportement bilinéaire être exprimé comme suit :

$$E = K_1 + K_3 (K_2 - \sigma_d) \text{ quand } \sigma_d < K_2 \quad (26)$$

$$E = K_1 - K_4 (\sigma_d - K_2) \text{ quand } \sigma_d > K_2 \quad (27)$$

Dans laquelle  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  et  $K_4$  sont des constantes matérielles.



**Figure IV. 3.** Relation générale entre le module résilient et la contrainte de déviation pour les sols à grains fins

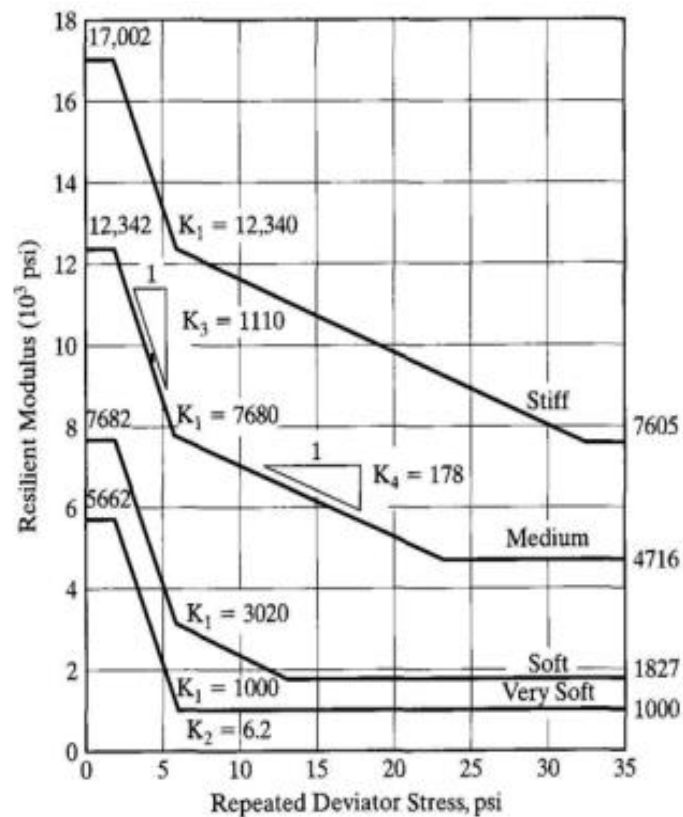
Thompson et Elliott (1985) ont indiqué que la valeur du module élastique au point de rupture de la courbe bilinéaire, comme indiqué par  $K_1$  dans la figure 4.3, est un bon indicateur du comportement résilient.

Les autres constantes,  $K_2$ ,  $K_3$  et  $K_4$ , présentent une variabilité moindre et influencent la réponse de la chaussée dans une moindre mesure que  $K_1$ .

Ils ont classé les sols à grains fins en quatre types, à savoir très mous, mous, moyens et rigides, avec la relation déviateur-contrainte du module résilient illustrée à la figure IV.4.

Le module résilient maximum est régi par une contrainte de déviateur de (13,8 kPa). Le module résilient minimum est limité par les résistances à la compression non confinées, qui sont supposées être de (42,8 kPa), (89,0 kPa), (157 kPa), et (226 kPa) pour les quatre sols.

L'équation 26 et 27 également été incorporée dans KENLAYER.

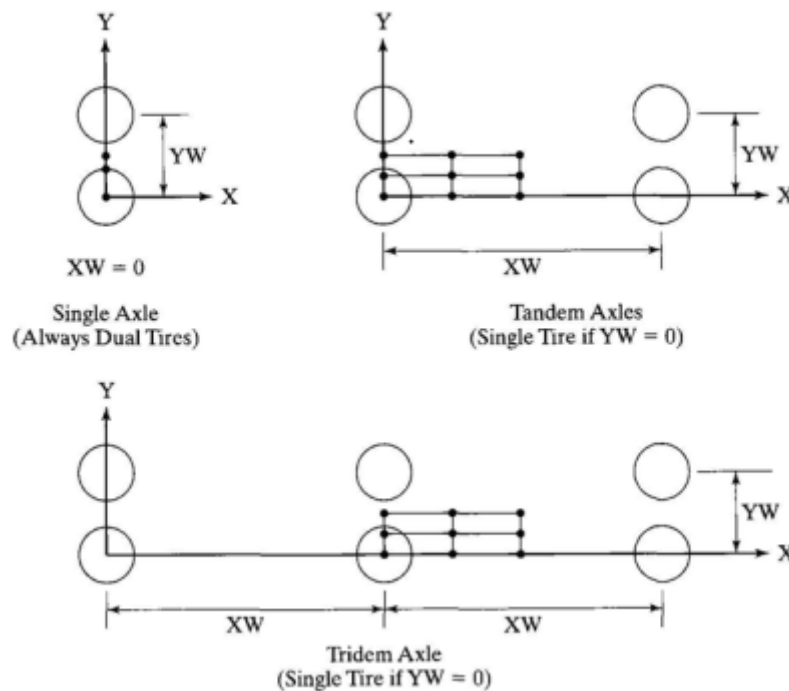


**Figure IV. 4.** Relation entre module résilient, déviateur et contrainte pour quatre types de plate-forme

#### 4.4.3 Ajustement des contraintes :

Pour le calcul du module Il est bien connu que la plupart des matériaux granulaires ne supportent aucune tension. Malheureusement, lorsqu'ils sont utilisés en tant que base ou sous-base sur un substrat plus faible, les contraintes horizontales dues aux charges appliquées sont le plus souvent en tension.

Cependant, ces matériaux peuvent encore supporter une tension si celle-ci est inférieure à la pré-compression causée par les contraintes géostatiques ou autres contraintes in situ. Le module d'élasticité des matériaux granulaires ne dépend pas uniquement de la contrainte de chargement, mais de la combinaison de la contrainte de chargement et la pré-compression.



**Figure IV. 5.** Vue en plan de plusieurs roues

Il n'est pas possible que la contrainte horizontale combinée devienne négative, car, lorsqu'elle est réduite à 0, les particules se séparent et aucune contrainte n'existe.

Un examen des résultats calculés par KENLAYER révèle que les contraintes horizontales combinées à la plupart des points de contrainte dans les couches granulaires sont négatives. Ceci pourrait indiquer que la pratique habituelle d'utiliser  $K_0$  de 0.5 à 1 (basé sur la théorie de la pression active des terres) pour calculer la contrainte géostatique est trop conservatrice, et qu'un  $K_0$  beaucoup plus grand (basé sur la pression terrestre passive) devrait être utilisé. À partir d'expériences menées avec une couche de sable sur une argile molle, Selig et al. (1986) ont indiqué que le développement de contraintes résiduelles horizontales sous des charges répétées est la clé de la stabilité du système à deux couches.

Comme la pré-compression réelle varie et difficile à déterminer, il est raisonnable d'ajuster les contraintes combinées de manière à ce que la contrainte réelle ne dépasse pas la résistance du matériau. Cet ajustement ne s'applique qu'à la détermination du module des matériaux granulaires, et aucune modification réelle de l'état des contraintes due à la charge n'est tentée.

Trois méthodes ont été incorporées dans KENLAYER pour l'analyse non linéaire.

Les deux premières méthodes ont été décrites dans la première édition ; la troisième méthode est une nouvelle addition basée sur la théorie de Mohr-Coulomb, elle dépend de la valeur du paramètre d'entrée PHI,  $\Phi$ . Si PHI est affecté à 0, la méthode 1 est utilisée ; si PHI est une grande valeur représentant le module minimum du matériau granulaire, la méthode 2

est impliquée ; si PHI est l'angle de friction interne du matériau granulaire (avec une valeur comprise entre 0 et 90), la méthode 3 est indiquée.

➤ **Méthode 1 :**

Dans la méthode 1, la couche granulaire non linéaire est subdivisée en un certain nombre de couches, et les contraintes à mi- profondeur de chaque couche sont utilisées pour déterminer le module d'élasticité. Si la contrainte horizontale, y compris la contrainte géostatique, est négative ou en tension, elle est mise à 0.

Cette modification de la contrainte est nécessaire pour éviter un  $\theta$  négatif. Avec les deux contraintes horizontales égales à 0, le module d'élasticité dépend uniquement de la contrainte verticale, sans contribution des contraintes horizontales. La contrainte verticale à un point de contrainte près de la charge est toujours positive, donc le module sera également positif, et il n'est pas nécessaire de spécifier un module minimum.

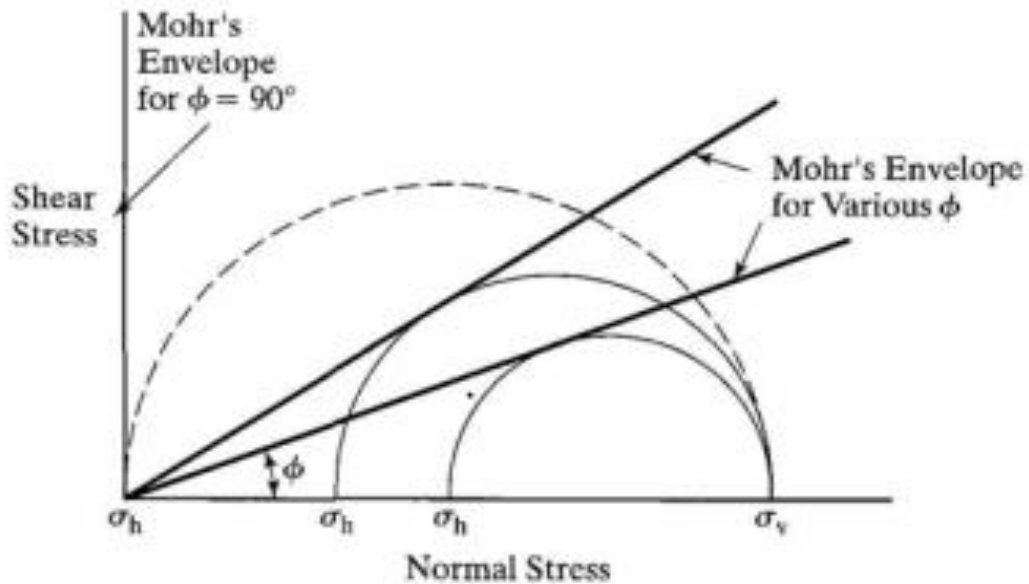
➤ **Méthode 2 :**

Dans la méthode 2, la couche granulaire est considérée comme une couche unique, et un point de contrainte approprié, généralement situé entre le quart supérieur et le tiers supérieur de la couche, est choisi pour calculer le module. Comme le point de contrainte est proche de la charge dans la partie supérieure de la couche, il n'y a aucune chance que l'invariant de contrainte,  $\theta$ , devienne négatif, donc aucune modification de contrainte n'est nécessaire. En d'autres termes, les contraintes horizontales négatives sont utilisées pour calculer  $\theta$ . Pour éviter l'utilisation d'un module déraisonnablement bas, un module minimum, indiqué par la valeur de PHI, doit être spécifié. Si le module calculé est inférieur à PHI, PHI sera utilisé comme module de la couche. Il est suggéré que  $K_1$  du matériau granulaire soit utilisé comme PHI, de sorte que le module calculé ne sera jamais inférieur à  $K_1$  ; cette relation est toujours vraie, à moins que B ne soit plus grand que le module calculé. Cette relation est toujours vraie, sauf si B est inférieur à (6,9 kPa).

➤ **Méthode 3 :**

Dans la méthode 3, la couche granulaire est considérée comme une seule couche avec le point de contrainte à mi-hauteur de la couche. Les contraintes horizontales négatives ou faibles sont modifiées selon la théorie de la rupture de Mohr-Coulomb, de sorte que la résistance des matériaux ne soit pas dépassée. Cette méthode a été initialement proposée par Raad et Figuero en (1980) et a ensuite été incorporée dans les programmes informatiques ILLI-PAVE et MICH-PAVE. Le cas à considérer dans KENLAYER est beaucoup plus simple que celui de ces programmes d'éléments finis, car les points de contrainte sont situés sous ou très près de la charge; par conséquent, la contrainte verticale peut être considérée comme la

contrainte principale majeure et la contrainte horizontale comme la contrainte principale mineure. Comme les contraintes horizontales aux points des contraintes dans le sol de fondation sont toujours positives et satisfont au critère de rupture de Mohr-Coulomb, aucun ajustement n'est nécessaire pour les sols à grains fins. Pour ajuster la contrainte horizontale dans les matériaux granulaires, on suppose que le matériau a un angle de frottement interne, emporté par l'enveloppe de rupture représentée sur la figure IV.6. Lorsque la rupture se produit, le cercle de Mohr basé sur les contraintes principales majeures et mineures doit être tangent à l'enveloppe de rupture.



**Figure IV. 6.** Ajustement de la contrainte horizontale au point de contrainte.



## **CHAPITRE V: DISCUSSION DES RESULTATS**

## 5 Discussion des résultats

### 5.1 Introduction

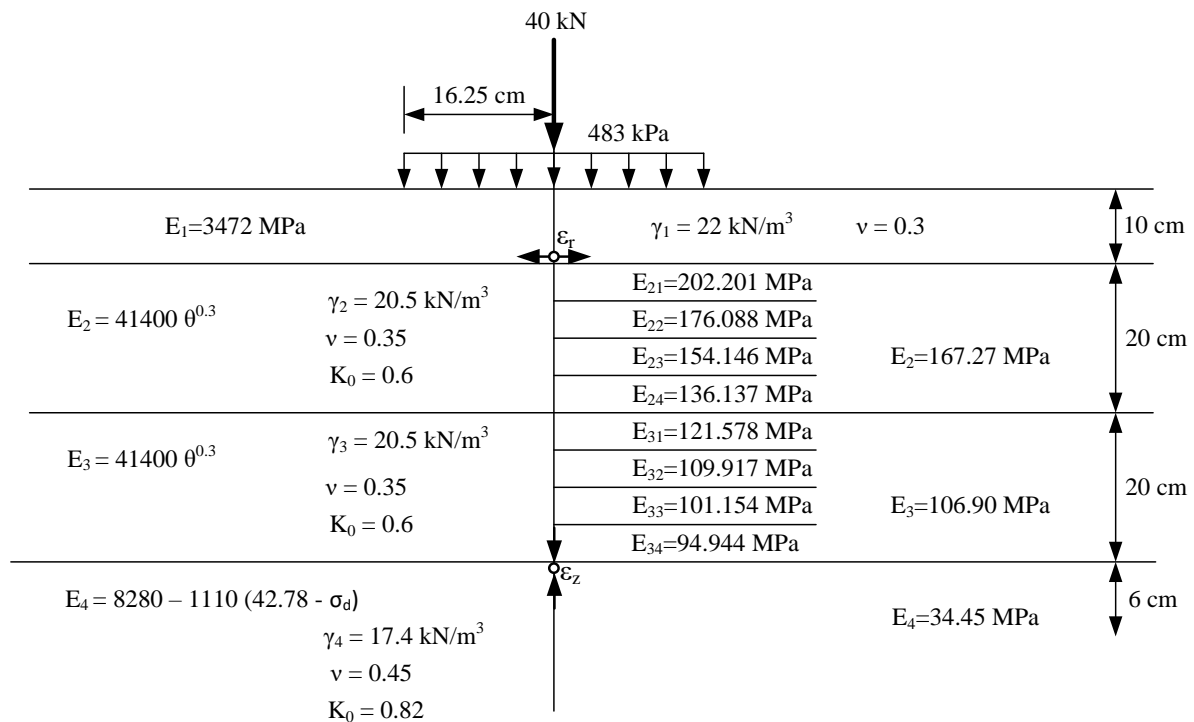
Dans cette étude, on étudie l'effet du module d'élasticité et les déformations de la chaussée sur les paramètres de chaussée flexibles tels que le nombre des couches, le type de réponse (Déflexions de surface, Contraintes radiale et verticale, Déformations radiale et verticale).

Cette analyse est basée sur l'hypothèse qu'une ou plusieurs couches sont élastiques non linéaires avec un module élastique dépendant de la contrainte. La couche granulaire non linéaire peut être considérée comme une seule couche ou subdivisée en un certain nombre de couches dont chacune ne dépassant pas 50 mm d'épaisseur.

### 5.2 Méthodologie

La Figure V.1 montre le cas standard pour un système élastique non-linéaire similaire au système linéaire étudié [Bouhrara S]. Une comparaisons est faite entre ces deux système élastiques correspondant aux réponses de déflexion, de contrainte et de déformation.

À cet effet, même si la couche 1 est en fait viscoélastique, il est toujours possible de trouver une vitesse du véhicule ou une durée de charge telle que le module d'élasticité soit égal à 3,5 GPa. Le module d'élasticité de la couche de base, de la couche de fondation et du sol support dépend de la contrainte, comme indiqué par les équations illustrées sur la Figure V.1. Pour un sol de support à grains fins, seule l'équation d'une contrainte de déviateur inférieure à 42,78 kPa est présentée. Les constantes de ces équations non-linéaires ont été sélectionnées de manière à pouvoir obtenir les mêmes modules que dans le système linéaire. Pour atteindre un module de 180 MPa pour la couche de base et de 110 MPa pour la couche de fondation, la même valeur de  $K_1$  égale à 41.4 MPa doit être utilisée.



**Figure V. 1.** Système multicouche élastique non-linéaire d'une chaussée souple

Dans cette étude, une chaussée souple, composée de quatre couches a été considérée pour l'analyse non-linéaire (Figure V.1). L'épaisseur de la couche de surface est de 10 cm, celle de la couche base est de 20 cm, et celle de la couche de fondation est de 20 cm, et enfin l'épaisseur de la couche du sol support est infinie.

Les couches de base et de fondation sont chacune subdivisées en quatre sous-couches. Le module de chaque couche, tel qu'obtenu par KENLAYER, est montré sur la Figure V.1. En plus du cas standard illustré dans la Figure V.1, deux autres cas, chacun avec un seul paramètre différent du cas standard, ont également été analysés. On distingue les cas étudiés suivants :

- Cas 1 : Le cas standard avec une pression de contact égale à 483 kPa.
- Cas 2 : La pression de contact est élevée et égale à 966 kPa.
- Cas 3 : Le sol support est rigide avec un coefficient  $K_1=85146$  kPa.

On veut estimer les caractéristiques de résistances à jusqu'à la profondeur de 65 cm en dessous de la surface du sol. Toutes les interfaces sont supposées totalement liées. La Figure V.2 montre les informations générales sur le système à étudier tel que : Le type de matériau non-linéaire est 2, l'analyse des dommages est 0, le nombre de périodes par année et le groupe de charge est égal à 1. La tolérance pour l'intégration est 0,001 et la limite des cycles d'intégration est 80, le type de réponse est 9, le nombre des couches pour la traction de bas et

le nombre des couches pour la compression de haut est égal 1 et le système des unités est 1. L'analyse se fait sur des profondeurs au nombre de coordonnées égale à 8.

General Information of LAYERINP for Set No. 1

TITLE	Case 1: Four Layered System -Single Wheel Loads_2021	
Type of material (1=linear, 2=nonlinear, 3=viscoelastic, 4=combined)	(MATL)	2
Damage analysis (0=no, 1=yes with summary only, 2=yes with detailed printout)	(NDAMA)	0
Number of periods per year	(NPY)	1
Number of load groups	(NLG)	1
Tolerance for numerical integration	(DEL)	0.001
Number of layers	(NL)	10
Number of Z coordinates for analysis	(NZ)	8
Maximum cycles of numerical integration	(ICL)	80
Type of responses (1=displacements only, 5=plus stresses, 9=plus strains)	(NSTD)	9
All layer interfaces bonded (1=yes, 0=if some are frictionless)	(NBOND)	1
Number of layers for bottom tension	(NLBT)	1
Number of layers for top compression	(NLTC)	1
System of units (0=English, 1=SI)	(NUNIT)	1

(1) This form appears when the 'General' on the Main Menu of LAYERINP is clicked. You can override any of the default values by typing in a new value. You can use the Tab key to move the cursor from one textbox to the next or just click on the textbox before typing. The use of click has the advantage that you don't have to delete the default before typing in the data you want. If you want to read the remaining text, you can use the scrollbar. You can also use the PgDn key after clicking this textbox to make it active.

(2) TITLE (title of run): Any title or comment can be typed on one line. The title should not be longer than 68 characters including spaces. If you make a mistake in typing, use the Del key to erase any typographical errors. When the total length reaches 68, no additional characters can be added. No comma should be used in TITLE. Use colon or semicolon instead.

(3) MATL (types of material): 1 when all layers are linear elastic, 2 when some layers are nonlinear

**Figure V. 2.** Information générale sur le système multicouche de la chaussée souple

Les réponses à comparer comprennent :

- La déflexion de la surface  $w_0$ .
- La déformation de traction radiale  $\varepsilon_r$ , en bas de la couche de surface
- La déformation de compression verticale  $\varepsilon_z$  en haut du sol support
- La contrainte verticale  $\sigma_z$  en haut de chaque couche,
- Les contraintes verticales dans le sol support à 65 cm par rapport à la surface de roulement.

Le Tableau V.1 présente une étude précédente de l'analyse linéaire d'une chaussée souple faite par Boughrara (2019).

**Tableau V. 1.** Différents cas étudiés lors de l'analyse linéaire [Bouhrara S]

Epaisseur de la couche	Cas 1 : Pression de contact <u>Standard</u> ( $q_1 = 483\text{KPa}$ )		Cas 2 : Pression de contact <u>elevée</u> ( $q_3 = 966\text{KPa}$ )		Cas 3 : Sol support <u>rigide</u> ( $E = 3 * E_{\text{Standard}}$ )	
	<b>E</b>	<b><math>\nu</math></b>	<b>E</b>	<b><math>\nu</math></b>	<b>E</b>	<b><math>\nu</math></b>
0 -10	3500	0.3	3500	0.3	3500	0.3
10-30	180	0.35	180	0.35	180	0.35
30-50	110	0.35	110	0.35	110	0.35
50-95.5	35	0.45	35	0.45	105	0.45

Le Tableau V.2 présente les résultats aboutis lors de l'étude de l'analyse linéaire Boughrara (2019).

**Tableau V. 2.** Résultats de l'analyse linéaire [Boughrara S]

Localisation	Réponse	Pression de Contact		Sol Support
Point	Parametre	Standard	Elevée	Rigide
		$q_1 = 483 \text{ kPa}$	$q_3 = 966 \text{ kPa}$	$E = 105 \text{ MPa}$
Haut de la couche de surface	$\omega_i$	<i>0.08408</i>	<i>0.08911</i>	<i>0.05198</i>
Bas de la couche de surface	$\sigma_r$	-1371.31	-2013.32	-1309.06
	$\varepsilon_r (E^{-06})$	-290.4	-423.8	-278.5
Haut de la couche de base	$\sigma_z$	<b>188.657</b>	<b>246.555</b>	<b>194.317</b>
	$\sigma_r$	21.139	15.42	27.518
Bas de la couche de base	$\sigma_r$	-53.465	-49.102	-30.11
Haut de la couche de fondation	$\sigma_z$	<b>61.394</b>	<b>66.699</b>	<b>75.936</b>
	$\sigma_r$	-17.151	-18.706	-2.498
Bas de la couche de fondation	$\sigma_r$	-39.343	-40.977	-5.298
Haut de la couche du sol support	$\sigma_z$	<b>24.479</b>	<b>25.214</b>	<b>40.053</b>
	$\sigma_r$	0.278	0.114	2.464
	$\varepsilon_r (E^{-06})$	692.3	717.5	360.3
Bas de la couche du sol support	$\sigma_z$	<b>10.971</b>	<b>11.084</b>	<b>16.566</b>
	$\sigma_r$	0.214	0.187	0.325

Les résultats de notre étude d'analyse non-linéaire de la chaussée souple composée de quatre couches sont présentés dans l'Annexe 1 présentées dans le Tableau V.3. Les réponses incluent les paramètres tels que : la déflexion de surface  $w_0$ , les contraintes radiales  $\sigma_r$ , les contraintes verticales  $\sigma_z$ , la déformation de traction radiale  $\varepsilon_r$  en bas de la couche 1 et la déformation de compression verticale  $\varepsilon_z$  en haut du sol support.

**Tableau V. 3.** Résultats de l'analyse non-linéaire

Localisation	Réponse	Pression de Contact		Sol Support
		Standard	Elevée	
Point	Parametre			
		$q_1 = 483 \text{ kPa}$	$q_3 = 966 \text{ kPa}$	$E = 105 \text{ MPa}$
Haut de la couche de surface	$\omega_i$	0.08414	0.08854	0.05117
Bas de la couche de surface	$\varepsilon_r (E^{-06})$	-290.6	-416.0	-272.3
	$\sigma_r$	-1350.966	-1941.515	-1256.960
Haut de la couche de base	$\sigma_z$	189.360	254.203	198.696
	$\sigma_r$	16.847	7.251	23.838
Bas de la couche de base	$\sigma_r$	-25.595	-29.624	-9.210
Haut de la couche de fondation	$\sigma_z$	63.671	69.160	79.176
	$\sigma_r$	-21.533	-24.464	-6.518
Bas de la couche de fondation	$\sigma_r$	-43.534	-45.501	-12.260
Haut de la couche du sol support	$\varepsilon_r (E^{-06})$	692.3	713.4	371.2
	$\sigma_z$	24.090	24.453	39.209
	$\sigma_r$	0.317	0.062	1.976
Bas de la couche du sol support	$\sigma_z$	17.197	17.271	27.199
	$\sigma_r$	0.317	0.212	0.900

### 5.3 Discussion des résultats

#### 5.3.1 Comparaison entre l'analyse linéaire et non-linéaire

##### 5.3.1.1 Cas de pression de contact standard

Le cas standard de l'analyse non-linéaire est très similaire à celui de l'analyse linéaire, avec presque les mêmes modules d'élasticités des couches.

La comparaison entre les solutions linéaires et non-linéaires montre que la solution non-linéaire donne presque la même déflexion de surface  $w_0$  (Figure V.3), une déformation radiale de traction  $\varepsilon_r$  légèrement plus petit (Figure V.4) et une déformation verticale de compression  $\varepsilon_z$  légèrement supérieur (Figure V.5).

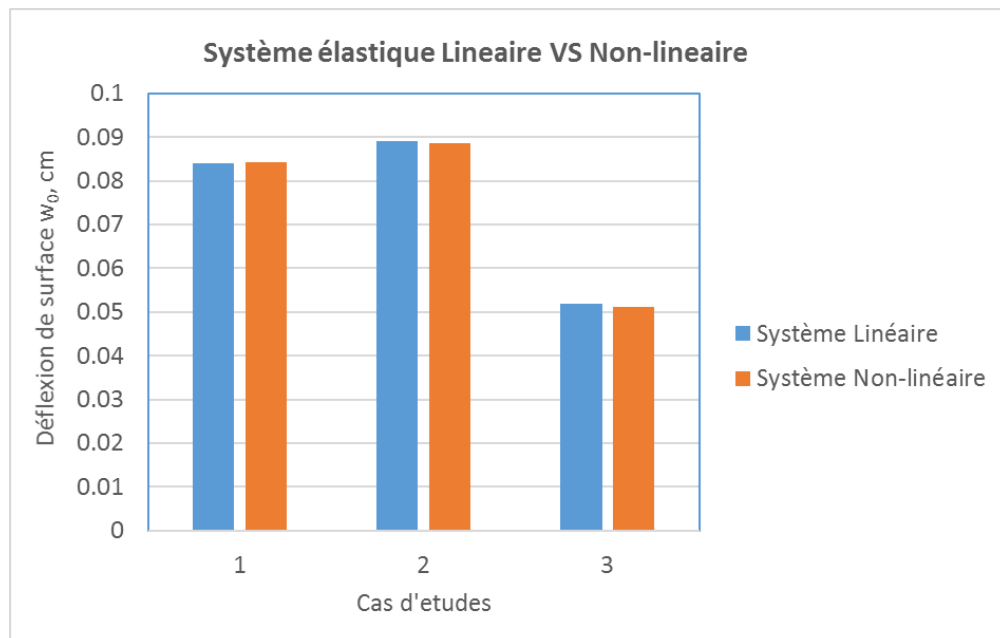


Figure V. 3. Déflexion de surface  $w_0$



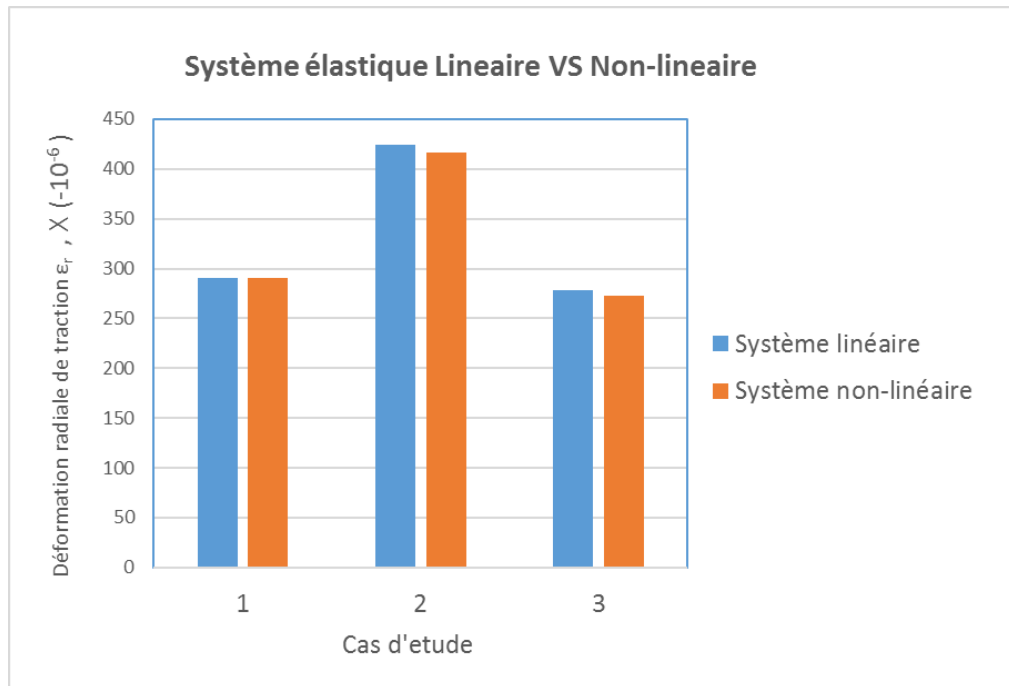


Figure V. 4. Déformation radiale de traction  $\epsilon_r$

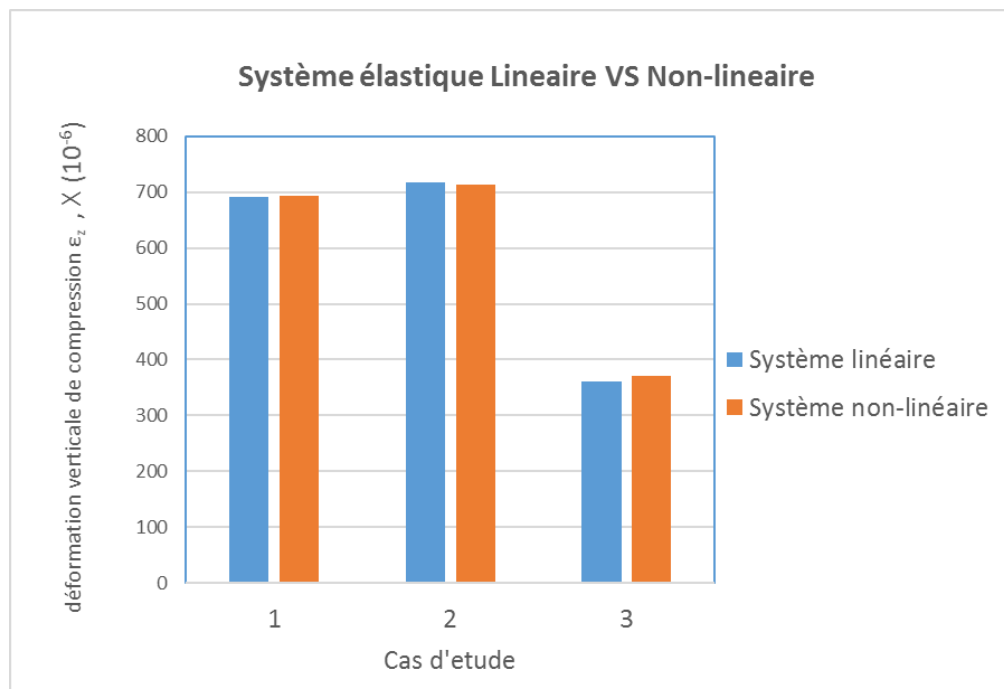


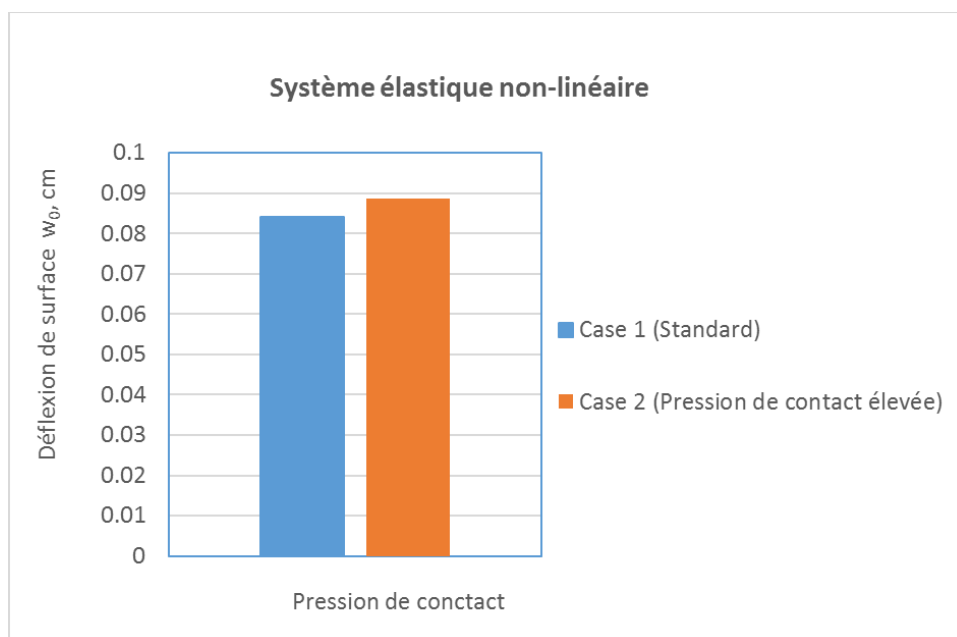
Figure V. 5. Déformation verticale de compression  $\epsilon_z$

## 5.3.2 Reponse caractéristiques de résistances lors de l'analyse non-linéaire

### 5.3.2.1 Cas de pression de contact élevée

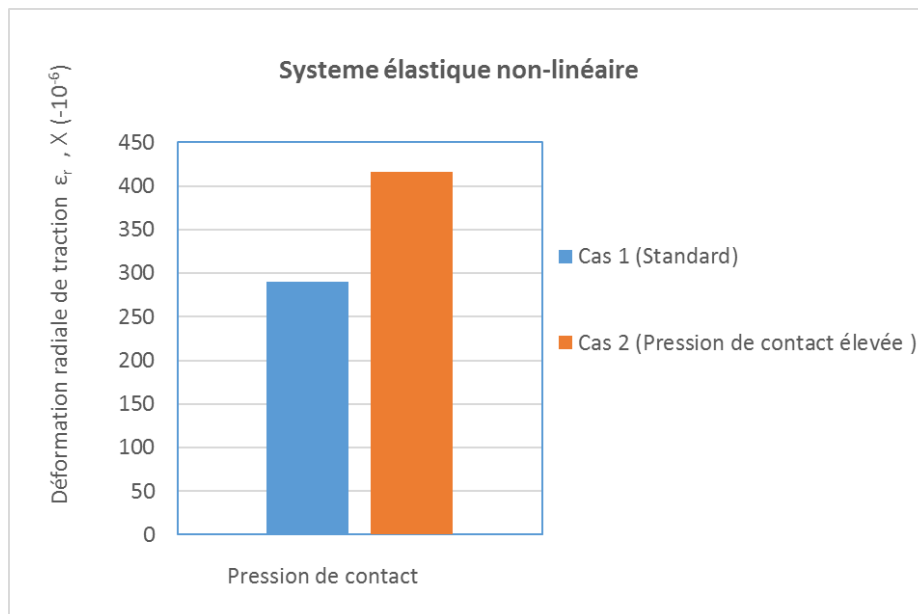
Avec la même charge totale, une augmentation de la pression des pneus entraîne une augmentation de  $E_2$  mais n'a pratiquement aucun effet sur  $E_3$  et  $E_4$ . Ceci est raisonnable car la couche de fondation et du sol support sont assez éloignées de la charge et ne sont pas affectées par la pression de contact, tant que la charge totale est la même. Compte tenu de l'augmentation de  $E_2$ , l'analyse non linéaire se traduit par un  $w_0$ ,  $\varepsilon_r$  et  $\varepsilon_z$  plus petit par rapport à l'analyse linéaire. (Figure V.6,7 et 8)

Si la conception est régie par la déflexion de surface  $w_0$ , le cas 2 a une déflexion de surface de 5.2% supérieure au cas standard, correspondant à la pression élevée  $q_2$  de sorte que l'effet du rayon de contact est négligeable.



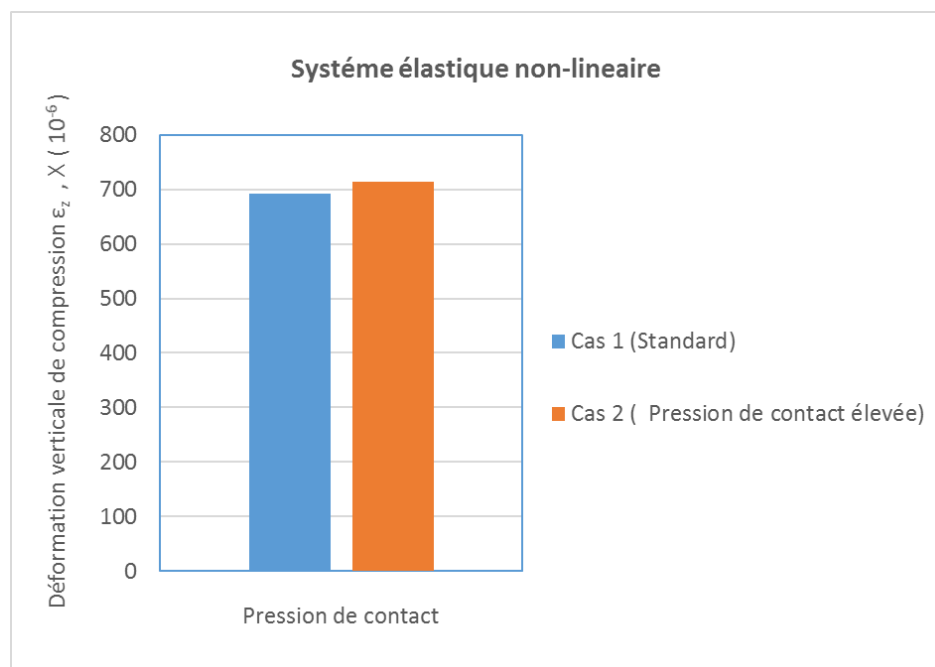
**Figure V. 6.** Déflexion de surface  $w_0$  (Cas de la pression de contact élevée)

Si la conception est régie par la déformation radiale de traction  $\varepsilon_r$  au bas de la couche de surface, le cas 2 conduit à une déformation radiale supérieure de 43.2% au cas standard, correspondant à la pression élevée  $q_2$  nécessitant ainsi l'utilisation d'une couche de surface plus épaisse ou meilleure pour éviter les fissures de fatigue.



**Figure V. 7.** Déformation de traction radiale (Cas de la pression de contact élevée)

Si la conception est régie par la déformation verticale de compression  $\epsilon_z$  en haut du sol support, le cas 2 n'a une déformation verticale que 3% supérieure au cas standard, correspondants à la pression élevée  $q_2$  de sorte que l'effet du rayon de contact est négligeable.

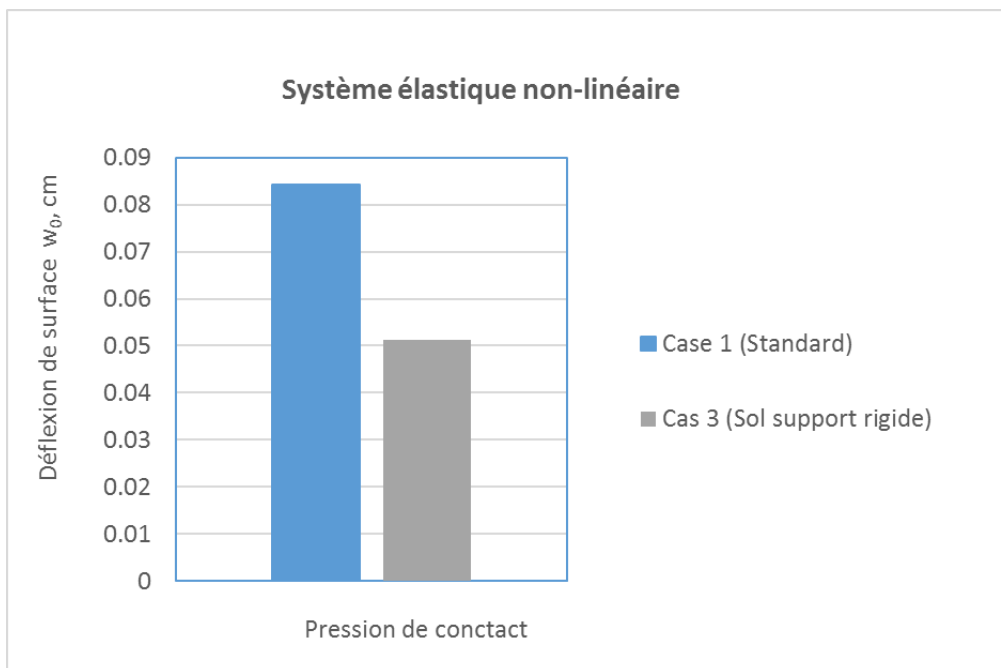


**Figure V. 8.** Déformation de compression verticale (Cas de la pression de contact élevée)

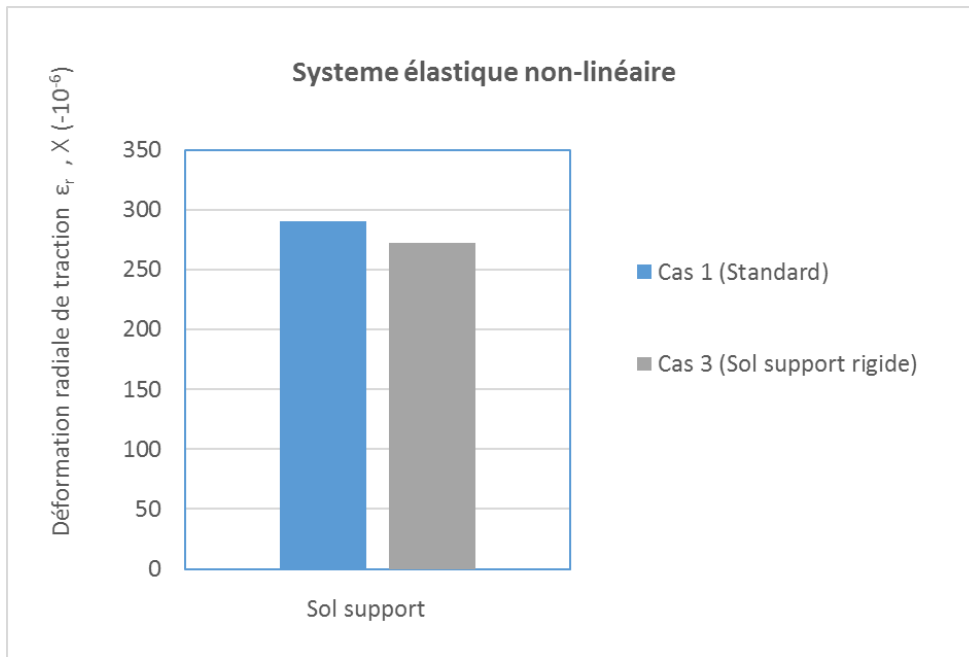
### 5.3.2.2 Cas de sol de support rigide

Un sol support rigide provoque une augmentation sensible de  $E_2$  et  $E_3$ . Une augmentation de  $E_4$  34452 kPa à 103355 KPa entraîne une augmentation de 15.8% de  $E_3$  et de 6.8% de  $E_2$ . Par conséquent, l'analyse non-linéaire entraîne une réduction de  $\varepsilon_r$  de 7.8% par rapport aux 4.1% de l'analyse linéaire, et entraîne presque une similarité de réduction de  $\varepsilon_z$  de 48.2% par rapport aux 47.9% de l'analyse linéaire (Figure V.9).

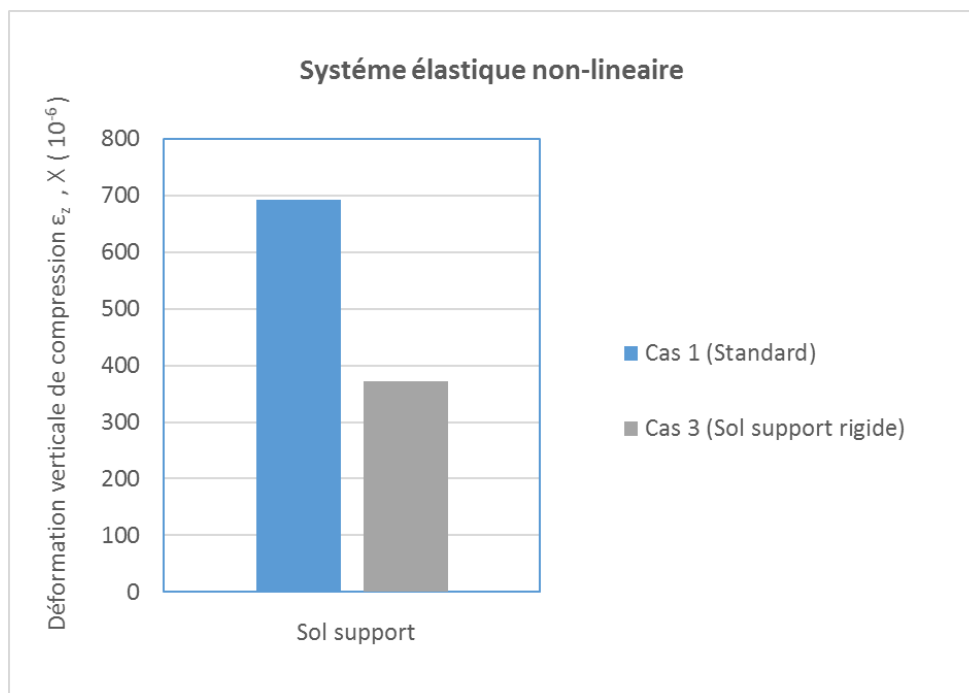
Une comparaison du cas 3 avec le cas standard indique qu'une couche de sol support rigide réduit la déflexion de la surface de 39.2% (Figure V.9), et augmente la déformation verticale de compression  $\varepsilon_z$  de 46.4% (Figure V.10), mais la déformation radiale de traction au bas de la couche de surface n'est que de 6.3% (Figure V.11).



**Figure V. 9.** Déflexion de surface  $w_0$  (Cas du sol support rigide)



**Figure V. 10.** Déformation de traction radiale (Cas du sol support rigide)



**Figure V. 11.** Déformation de compression verticale (Cas du sol support rigide)

### 5.3.3 Étude des contraintes verticales

Le cas standard de l'analyse non-linéaire est très similaire à celui de l'analyse linéaire, avec presque les mêmes contraintes verticales aux niveaux hauts de chaque couche.

La comparaison entre les solutions linéaires (Figure V.12) et non-linéaires montre que la solution non-linéaire (Figure V.13) donne presque la même contrainte verticale  $\sigma_z$  (Figure V.3) dans les trois cas : 1) Pression de contact standard, 2) Pression de contact élevée et 3) Sol support).

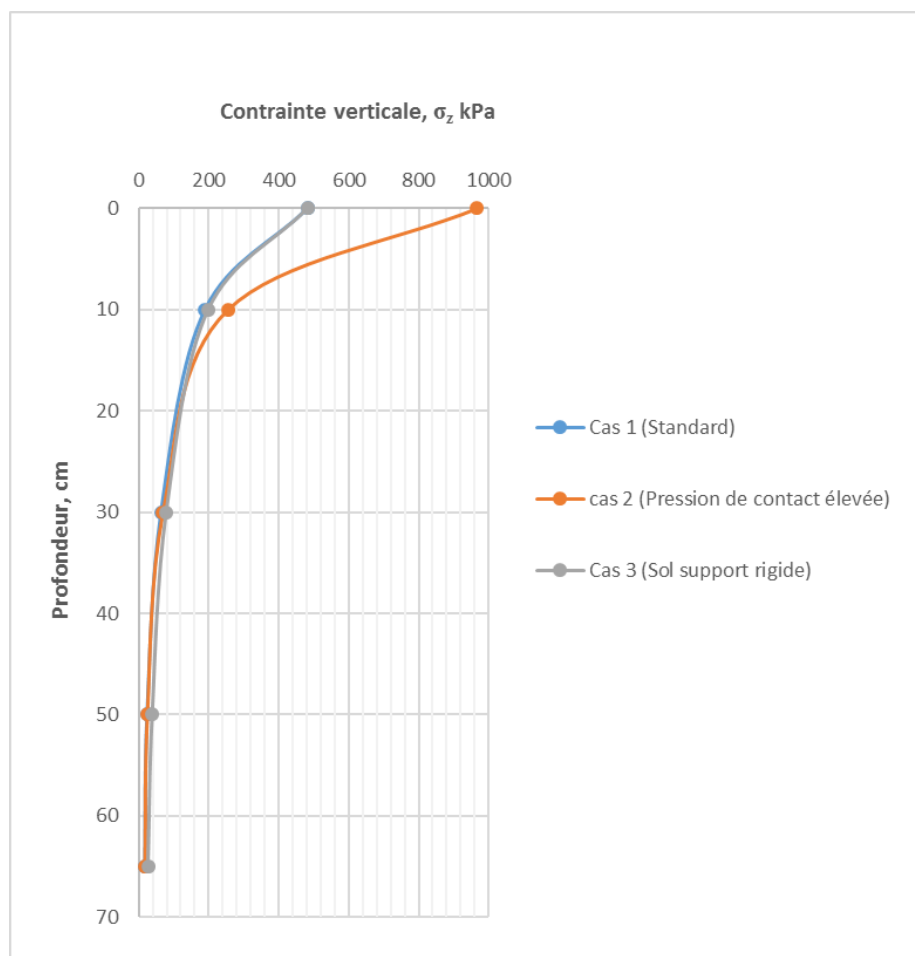
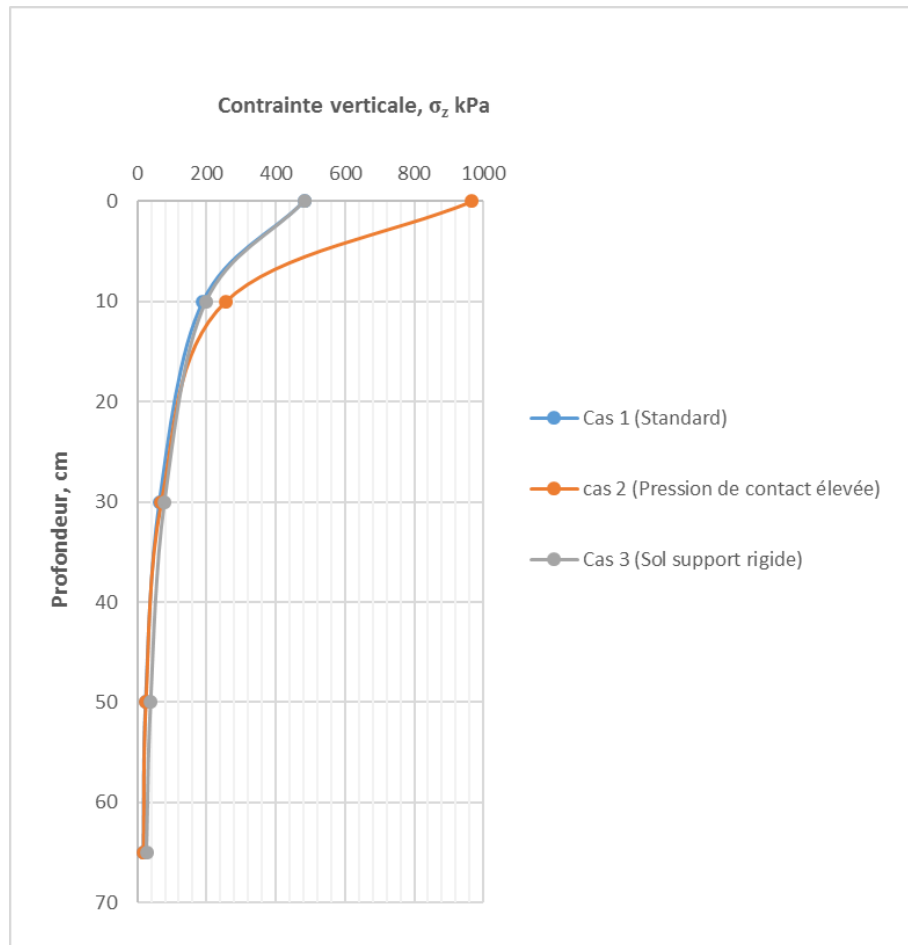


Figure V. 12. Contrainte verticale (Cas linéaire)



**Figure V. 13.** Contrainte verticale (Cas non-linéaire)

## Conclusion générale

La route est l'une des infrastructures les plus importantes de chaque pays. L'ingénierie des chaussées est une partie cruciale de la conception et de la construction des routes qui traite directement de l'efficacité et de la rentabilité de ces veines vitales.

Dans cette étude, Kenlayer, une application d'éléments finis, a été utilisé pour examiner l'effet de la modification de la couche de surface et du rapport de position sur le comportement de la chaussée et le déplacement et la distribution des contraintes d'un système de chaussée donné. Les résultats ont été comparés et analysés, les réponses à comparer comprennent :

La déflexion de la surface  $w_0$ , la déformation de traction radiale  $\varepsilon_r$ , en bas de la couche de surface, la déformation de compression verticale  $\varepsilon_z$  en haut du sol support, la contrainte verticale  $\sigma_z$  en haut de chaque couche et les contraintes verticales dans le sol support à 65 cm par rapport à la surface de roulement.

Les résultats et la comparaison montrent que dans le cas Standard de l'analyse non-linéaire est très similaire à celui de l'analyse linéaire, avec presque les mêmes modules d'élasticités des couches.

La comparaison entre les solutions linéaires et non-linéaires montre que la solution non-linéaire donne presque la même déflexion de surface  $w_0$  une déformation radiale de traction  $\varepsilon_r$  légèrement plus petit et une déformation verticale de compression  $\varepsilon_z$  légèrement supérieur. Le cas de pression de contact élevée **avec** la même charge totale présente, une augmentation de la pression des pneus entraîne une augmentation de  $E_2$  mais n'a pratiquement aucun effet sur  $E_3$  et  $E_4$ . Ceci est raisonnable car la couche de fondation et du sol support sont assez éloignées de la charge et ne sont pas affectées par la pression de contact, tant que la charge totale est la même. Compte tenu de l'augmentation de  $E_2$ , l'analyse non linéaire se traduit par un  $w_0$ ,  $\varepsilon_r$  et  $\varepsilon_z$  plus petit par rapport à l'analyse linéaire, la comparaison du troisième cas avec le cas standard indique qu'une couche de sol support rigide réduit la déflexion de la surface de 39.2%, et augmente la déformation verticale de compression  $\varepsilon_z$  de 46.4%, mais la déformation radiale de traction au bas de la couche de surface n'est que de 6.3%.



---

### Références

- [1] Tajudin A.N., Priyatna R.(2019), Effect of Axle and Tire Configurations on Flexible Pavement Response. IOP Conference Series Materials Science and Engineering 508 012004
- [2] Taylor & Francis Group LLC (2006), The Handbook of Highway Engineering., New York, USA, 848 pages
- [3] Yang H. Huang, (2004), Pavement Analysis and Design., Kentucky, USA, 776 pages.
- [4] Boughrara S. (2019), Analyse Numérique d'une chaussée souple en utilisant le Logiciel KENLAYER, Mémoire de Master, Département de Génie Civil, Université Larbi Tebessi, Tébessa.
- [5] Collection Technique, (1999), T50 : Voiries et aménagements urbains en béton tome 1 conception et dimensionnement, 326 pages
- [6] Gauthier P. (2011), Étude du concept de structure inverse pour le renforcement de chaussées soumises aux charges d'autobus urbains, Maître ès sciences (M.Sc.). Faculté Des Sciences et de Génie, Université Laval, Québec, Canada
- [7] Setra, LCPC, (1988), Conception et dimensionnement des structures de chaussée, Guide technique, 260 pages.
- [8] Ibro Maiguizo Z. (2012), Les dégradations dans les chaussées souples et les moyens de prévention, Mémoire de Master, Faculté de Génie de la Construction, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou.

# **ANNEXES**

## ANNEXES

### Premier cas

INPUT FILE NAME -C:\KENPAVE\tmf-cl-SI-0295.DAT  
 NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1  
 TITLE -Case 1: Four Layered System -Single Wheel Loads  
 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)----- = 10  
 NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 8  
 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 : 10 5 5 5 5 5 5 5 5  
 POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.3 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35  
 0.35 0.35 0.45  
 VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0 10 10.001 30 30.001 50  
 50.001 65  
 ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED  
 FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 3.450E+06 2 2.021E+05  
 3 1.761E+05 4 1.548E+05 5 1.361E+05 6 1.216E+05 7 1.099E+05  
 8 1.012E+05 9 9.494E+04 10 3.445E+04  
 LOAD GROUP NO. 1 HAS 1 CONTACT AREA  
 CONTACT RADIUS (CR)----- = 16.25  
 CONTACT PRESSURE (CP)----- = 483  
 RADIAL COORDINATES OF 1 POINT(S) (RC) ARE : 0  
 NUMBER OF NONLINEAR LAYERS (NOLAY)----- = 9  
 MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS FOR NONLINEAR ANALYSIS (ITENOL) = 15  
 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 1  
 Z COORDINATES (ZCNOL) FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ARE: 12.5 17.5 22.5  
 27.5  
 32.5 37.5 42.5 47.5 65

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: 22 20.5 20.5 20.5 20.5 20.5 20.5  
 20.5 20.5 17.4

LAYER NO. = 2 NCLAY = 0 K2 = 0.295 K0 = 0.6

LAYER NO. = 3 NCLAY = 0 K2 = 0.295 K0 = 0.6

page 2

LAYER NO. = 4 NCLAY = 0 K2 = 0.295 K0 = 0.6

LAYER NO. = 5 NCLAY = 0 K2 = 0.295 K0 = 0.6

LAYER NO. = 6 NCLAY = 0 K2 = 0.295 K0 = 0.6

LAYER NO. = 7 NCLAY = 0 K2 = 0.295 K0 = 0.6

LAYER NO. = 8 NCLAY = 0 K2 = 0.295 K0 = 0.6

LAYER NO. = 9 NCLAY = 0 K2 = 0.295 K0 = 0.6

LAYER NO. = 10 NCLAY = 1 K2 = 42.78 K3 = 1110 K4 = 178 K0 = 0.82

LAYER NUMBER AND GEOSTATIC STRESS (GEOS) ARE:

2 2.71250 3 3.73750 4 4.76250 5 5.78750 6 6.81250

7 7.83750 8 8.86250 9 9.88750 10 13.01000

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 2 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 41400

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 3 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 41400

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 4 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 41400

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 5 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 41400

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 6 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 41400

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 7 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 41400

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 8 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 41400

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 9 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 41400

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 10 NCLAY = 1 EMIN = 12606 EMAX = 53006

K1 = 8280

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

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

AT ITERATION 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 2.021E+05 3 1.761E+05

4 1.548E+05 5 1.361E+05 6 1.216E+05 7 1.099E+05 8 1.012E+05 9 9.494E+04

AT ITERATION 2 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 1.945E+05 3 1.742E+05

4 1.571E+05 5 1.421E+05 6 1.300E+05 7 1.202E+05 8 1.126E+05 9 1.072E+05

AT ITERATION 3 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 1.909E+05 3 1.738E+05

4 1.588E+05 5 1.457E+05 6 1.347E+05 7 1.256E+05 8 1.183E+05 9 1.132E+05

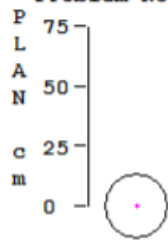
AT ITERATION 4 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 1.901E+05 3 1.738E+05

4 1.599E+05 5 1.477E+05 6 1.372E+05 7 1.284E+05 8 1.212E+05 9 1.162E+05  
 AT ITERATION 5 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 1.902E+05 3 1.739E+05  
 4 1.606E+05 5 1.488E+05 6 1.386E+05 7 1.298E+05 8 1.227E+05 9 1.177E+05  
 AT ITERATION 6 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 1.904E+05 3 1.740E+05  
 4 1.610E+05 5 1.495E+05 6 1.393E+05 7 1.306E+05 8 1.234E+05 9 1.184E+05  
 LAYER NUMBER AND THREE NORMAL STRESSES INCLUDING GEOSTATIC STRESSES  
 2 168.847 3.975 3.975 3 130.376 -8.563 -8.563  
 4 100.847 -14.789 -14.789 5 78.729 -18.147 -18.147  
 6 62.249 -20.555 -20.555 7 50.083 -23.079 -23.079  
 8 41.414 -26.603 -26.603 9 35.957 -32.223 -32.223  
 10 30.215 10.983 10.983  
 LAYER NUMBER AND ADJUSTED THREE NORMAL STRESSES INCLUDING GEOSTATIC  
 STRESSES FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ARE:  
 2 168.847 3.975 3.975 3 130.376 0.000 0.000  
 4 100.847 0.000 0.000 5 78.729 0.000 0.000  
 6 62.249 0.000 0.000 7 50.083 0.000 0.000  
 8 41.414 0.000 0.000 9 35.957 0.000 0.000  
 10 30.215 10.983 10.983  
 RADIAL VERTICAL VERTICAL VERTICAL RADIAL TANGENTIAL SHEAR

page 3

COORDINATE COORDINATE DISPLACEMENT STRESS STRESS STRESS STRESS  
 (STRAIN) (STRAIN) (STRAIN) (STRAIN)  
 0.00000 0.00000 0.08414 483.000 1466.745 1466.745 0.000  
 (STRAIN) -1.516E-04 2.665E-04 2.665E-04 .000E+00  
 0.00000 10.00000 0.08573 189.348 -1350.966 -1350.966 0.000  
 (STRAIN) 2.898E-04 -2.906E-04 -2.906E-04 .000E+00  
 0.00000 10.00100 0.08573 189.360 16.847 16.847 0.000  
 (STRAIN) 9.328E-04 -2.906E-04 -2.906E-04 .000E+00  
 0.00000 30.00000 0.07120 63.675 -25.595 -25.595 0.000  
 (STRAIN) 5.459E-04 -2.604E-04 -2.604E-04 .000E+00  
 0.00000 30.00100 0.07120 63.671 -21.533 -21.533 0.000  
 (STRAIN) 5.652E-04 -2.604E-04 -2.604E-04 .000E+00  
 0.00000 50.00000 0.06173 24.086 -43.534 -43.534 0.000  
 (STRAIN) 4.609E-04 -3.102E-04 -3.102E-04 .000E+00  
 0.00000 50.00100 0.06172 24.086 0.317 0.317 0.000  
 (STRAIN) 6.923E-04 -3.102E-04 -3.102E-04 .000E+00  
 0.00000 65.00000 0.05298 17.197 0.317 0.317 0.000  
 (STRAIN) 4.919E-04 -2.200E-04 -2.200E-04 .000E+00

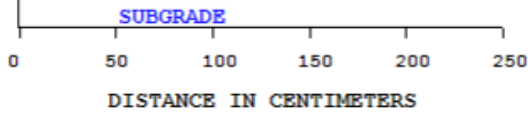
Case 1: Four Non Linear Layered System -Single Wheel Loads-2021  
 Problem No. 1 Period No. 1 Load Group No. 1



Contact Radius = 16.25 cm  
 Contact Pressure = 483 kPa

• Response points  
 • Stress points for nonlinear layers

D	0	E = 3450000 kPa PR = 0.3 GAM = 22 kN/m3						
E	10	K1 = 41400 kPa	K2 = 0.295	PR = 0.35	EHI = 0	KO = 0.6	GAM = 20.5 kN/m3	
P	15	K1 = 41400 kPa	K2 = 0.295	PR = 0.35	EHI = 0	KO = 0.6	GAM = 20.5 kN/m3	
P	20	K1 = 41400 kPa	K2 = 0.295	PR = 0.35	EHI = 0	KO = 0.6	GAM = 20.5 kN/m3	
T	25	K1 = 41400 kPa	K2 = 0.295	PR = 0.35	EHI = 0	KO = 0.6	GAM = 20.5 kN/m3	
T	30	K1 = 41400 kPa	K2 = 0.295	PR = 0.35	EHI = 0	KO = 0.6	GAM = 20.5 kN/m3	
H	35	K1 = 41400 kPa	K2 = 0.295	PR = 0.35	EHI = 0	KO = 0.6	GAM = 20.5 kN/m3	
H	40	K1 = 41400 kPa	K2 = 0.295	PR = 0.35	EHI = 0	KO = 0.6	GAM = 20.5 kN/m3	
H	45	K1 = 41400 kPa	K2 = 0.295	PR = 0.35	EHI = 0	KO = 0.6	GAM = 20.5 kN/m3	
c	50	K1 = 8280 kPa	PR = 0.45	KO = 0.82	GAM = 17.4 kN/m3			
m		EMIN = 12610 kPa EMAX = 53010 kPa K2 = 42.78 kPa K3 = 1110 K4 = 178						



## Deuxième cas

```

INPUT FILE NAME -C:\KENPAVE\tmf-c2-SI-0295.DAT
NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1
TITLE -Case 2: Four Layered System -Single Wheel Loads
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)----- = 10
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 8
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 : 10 5 5 5 5 5 5 5
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.3 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35
0.35 0.35 0.45
VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0 10 10.001 30 30.001 50
50.001 65
ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED
FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 3.450E+06 2 2.169E+05
3 1.909E+05 4 1.689E+05 5 1.509E+05 6 1.231E+05 7 1.115E+05
8 1.027E+05 9 9.651E+04 10 3.439E+04
LOAD GROUP NO. 1 HAS 1 CONTACT AREA
CONTACT RADIUS (CR)----- = 11.49
CONTACT PRESSURE (CP)----- = 966
RADIAL COORDINATES OF 1 POINT(S) (RC) ARE : 0
NUMBER OF NONLINEAR LAYERS (NOLAY)----- = 9
MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS FOR NONLINEAR ANALYSIS (ITENOL) = 15
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 1
Z COORDINATES (ZCNOL) FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ARE: 12.5 17.5 22.5
27.5
32.5 37.5 42.5 47.5 65
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: 22 20.5 20.5 20.5 20.5 20.5 20.5  
 20.5 20.5 17.4

LAYER NO. = 2 NCLAY = 0 K2 = 0.295 K0 = 0.6

LAYER NO. = 3 NCLAY = 0 K2 = 0.295 K0 = 0.6

page 2

LAYER NO. = 4 NCLAY = 0 K2 = 0.295 K0 = 0.6

LAYER NO. = 5 NCLAY = 0 K2 = 0.295 K0 = 0.6

LAYER NO. = 6 NCLAY = 0 K2 = 0.295 K0 = 0.6

LAYER NO. = 7 NCLAY = 0 K2 = 0.295 K0 = 0.6

LAYER NO. = 8 NCLAY = 0 K2 = 0.295 K0 = 0.6

LAYER NO. = 9 NCLAY = 0 K2 = 0.295 K0 = 0.6

LAYER NO. = 10 NCLAY = 1 K2 = 42.78 K3 = 1110 K4 = 178 K0 = 0.82

LAYER NUMBER AND GEOSTATIC STRESS (GEOS) ARE:

2 2.71250 3 3.73750 4 4.76250 5 5.78750 6 6.81250

7 7.83750 8 8.86250 9 9.88750 10 13.01000

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 2 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 41400

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 3 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 41400

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 4 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 41400

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 5 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 41400

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 6 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 41400

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 7 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 41400

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 8 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 41400

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 9 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 41400

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 10 NCLAY = 1 EMIN = 12606 EMAX = 53006

K1 = 8280

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

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

AT ITERATION 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 2.169E+05 3 1.909E+05

4 1.689E+05 5 1.509E+05 6 1.231E+05 7 1.115E+05 8 1.027E+05 9 9.651E+04

AT ITERATION 2 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 2.094E+05 3 1.865E+05

4 1.673E+05 5 1.515E+05 6 1.321E+05 7 1.217E+05 8 1.138E+05 9 1.082E+05

AT ITERATION 3 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 2.057E+05 3 1.846E+05

4 1.669E+05 5 1.523E+05 6 1.370E+05 7 1.271E+05 8 1.194E+05 9 1.139E+05

AT ITERATION 4 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 2.039E+05 3 1.838E+05

4 1.670E+05 5 1.530E+05 6 1.396E+05 7 1.300E+05 8 1.222E+05 9 1.168E+05

AT ITERATION 5 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 2.030E+05 3 1.835E+05

4 1.672E+05 5 1.534E+05 6 1.411E+05 7 1.315E+05 8 1.237E+05 9 1.182E+05



AT ITERATION 6 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 2.026E+05 3 1.834E+05  
 4 1.673E+05 5 1.538E+05 6 1.419E+05 7 1.322E+05 8 1.244E+05 9 1.189E+05

LAYER NUMBER AND THREE NORMAL STRESSES INCLUDING GEOSTATIC STRESSES

2 216.016 -6.855 -6.855 3 155.059 -16.707 -16.707  
 4 114.120 -20.458 -20.458 5 86.053 -22.284 -22.284  
 6 66.323 -23.349 -23.349 7 52.291 -25.206 -25.206  
 8 42.526 -28.369 -28.369 9 36.458 -33.936 -33.936  
 10 30.283 10.876 10.876

LAYER NUMBER AND ADJUSTED THREE NORMAL STRESSES INCLUDING GEOSTATIC  
 STRESSES FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ARE:

2 216.016 0.000 0.000 3 155.059 0.000 0.000  
 4 114.120 0.000 0.000 5 86.053 0.000 0.000  
 6 66.323 0.000 0.000 7 52.291 0.000 0.000  
 8 42.526 0.000 0.000 9 36.458 0.000 0.000  
 10 30.283 10.876 10.876

RADIAL VERTICAL VERTICAL VERTICAL RADIAL TANGENTIAL SHEAR

page 3

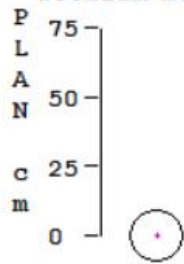
COORDINATE COORDINATE DISPLACEMENT STRESS STRESS STRESS STRESS

(STRAIN) (STRAIN) (STRAIN) (STRAIN)

0.00000 0.00000 0.08854 966.000 2173.674 2173.674 0.000  
 (STRAIN) -1.710E-04 3.789E-04 3.789E-04 .000E+00  
 0.00000 10.00000 0.08895 254.251 -1941.515 -1941.515 0.000  
 (STRAIN) 4.114E-04 -4.160E-04 -4.160E-04 .000E+00  
 0.00000 10.00100 0.08895 254.203 7.251 7.251 0.000  
 (STRAIN) 1.230E-03 -4.159E-04 -4.159E-04 .000E+00  
 0.00000 30.00000 0.07203 69.165 -29.624 -29.624 0.000  
 (STRAIN) 5.847E-04 -2.827E-04 -2.827E-04 .000E+00  
 0.00000 30.00100 0.07203 69.160 -24.464 -24.464 0.000  
 (STRAIN) 6.081E-04 -2.827E-04 -2.827E-04 .000E+00  
 0.00000 50.00000 0.06213 24.452 -45.501 -45.501 0.000  
 (STRAIN) 4.736E-04 -3.207E-04 -3.207E-04 .000E+00  
 0.00000 50.00100 0.06213 24.453 0.062 0.062 0.000  
 (STRAIN) 7.134E-04 -3.208E-04 -3.208E-04 .000E+00  
 0.00000 65.00000 0.05319 17.271 0.212 0.212 0.000  
 (STRAIN) 4.994E-04 -2.238E-04 -2.238E-04 .000E+00

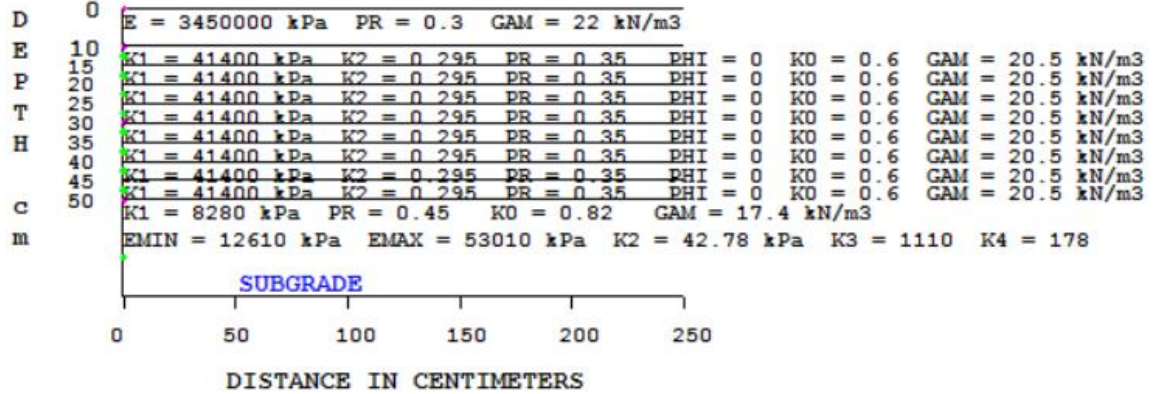
Case 2: Four Non Linear Layered System -Single Wheel Loads-2021

Problem No. 1 Period No. 1 Load Group No. 1



Contact Radius = 11.49 cm  
 Contact Pressure = 966 kPa

- Response points
- Stress points for nonlinear layers



## Troisième cas

```

INPUT FILE NAME -C:\KENPAVE\tmf-c3-SI-0295.DAT
NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1
TITLE -Case 3: Four Layered System -Single Wheel Loads
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)----- = 10
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 8
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 : 10 5 5 5 5 5 5 5 5
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.3 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35
0.35 0.35 0.45
VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0 10 10.001 30 30.001 50
50.001 65
ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED
FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 3.450E+06 2 2.135E+05
3 1.875E+05 4 1.655E+05 5 1.475E+05 6 1.384E+05 7 1.267E+05
8 1.180E+05 9 1.118E+05 10 1.014E+05
LOAD GROUP NO. 1 HAS 1 CONTACT AREA
CONTACT RADIUS (CR)----- = 16.25
CONTACT PRESSURE (CP)----- = 483
RADIAL COORDINATES OF 1 POINT(S) (RC) ARE : 0
NUMBER OF NONLINEAR LAYERS (NOLAY)----- = 9
MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS FOR NONLINEAR ANALYSIS (ITENOL) = 15
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 1
Z COORDINATES (ZCNOL) FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ARE: 12.5 17.5 22.5
27.5
32.5 37.5 42.5 47.5 65
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: 22 20.5 20.5 20.5 20.5 20.5 20.5  
 20.5 20.5 17.4

LAYER NO. = 2 NCLAY = 0 K2 = 0.295 K0 = 0.6

LAYER NO. = 3 NCLAY = 0 K2 = 0.295 K0 = 0.6

page 2

LAYER NO. = 4 NCLAY = 0 K2 = 0.295 K0 = 0.6

LAYER NO. = 5 NCLAY = 0 K2 = 0.295 K0 = 0.6

LAYER NO. = 6 NCLAY = 0 K2 = 0.295 K0 = 0.6

LAYER NO. = 7 NCLAY = 0 K2 = 0.295 K0 = 0.6

LAYER NO. = 8 NCLAY = 0 K2 = 0.295 K0 = 0.6

LAYER NO. = 9 NCLAY = 0 K2 = 0.295 K0 = 0.6

LAYER NO. = 10 NCLAY = 1 K2 = 42.78 K3 = 1110 K4 = 178 K0 = 0.82

LAYER NUMBER AND GEOSTATIC STRESS (GEOS) ARE:

2 2.71250 3 3.73750 4 4.76250 5 5.78750 6 6.81250

7 7.83750 8 8.86250 9 9.88750 10 13.01000

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 2 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 41400

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 3 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 41400

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 4 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 41400

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 5 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 41400

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 6 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 41400

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 7 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 41400

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 8 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 41400

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 9 NCLAY = 0 PHI = 0 K1 = 41400

FOR PERIOD 1 LAYER NO. = 10 NCLAY = 1 EMIN = 52475 EMAX = 117314

K1 = 85146

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

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

AT ITERATION 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 2.135E+05 3 1.875E+05

4 1.655E+05 5 1.475E+05 6 1.384E+05 7 1.267E+05 8 1.180E+05 9 1.118E+05

AT ITERATION 2 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 2.036E+05 3 1.826E+05

4 1.659E+05 5 1.521E+05 6 1.435E+05 7 1.344E+05 8 1.274E+05 9 1.222E+05

AT ITERATION 3 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 2.000E+05 3 1.804E+05

4 1.664E+05 5 1.547E+05 6 1.464E+05 7 1.385E+05 8 1.323E+05 9 1.275E+05

AT ITERATION 4 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 1.988E+05 3 1.798E+05

4 1.669E+05 5 1.563E+05 6 1.480E+05 7 1.407E+05 8 1.348E+05 9 1.301E+05

AT ITERATION 5 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 1.985E+05 3 1.799E+05

4 1.672E+05 5 1.571E+05 6 1.489E+05 7 1.418E+05 8 1.360E+05 9 1.315E+05

AT ITERATION 6 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 2 1.984E+05 3 1.801E+05  
 4 1.674E+05 5 1.575E+05 6 1.494E+05 7 1.424E+05 8 1.366E+05 9 1.321E+05

LAYER NUMBER AND THREE NORMAL STRESSES INCLUDING GEOSTATIC STRESSES

2 179.167 11.762 11.762 3 142.442 2.002 2.002  
 4 114.496 -2.054 -2.054 5 93.708 -3.509 -3.509  
 6 78.262 -3.960 -3.960 7 66.746 -3.991 -3.991  
 8 58.186 -4.145 -4.145 9 51.961 -4.762 -4.762  
 10 40.219 11.570 11.570

LAYER NUMBER AND ADJUSTED THREE NORMAL STRESSES INCLUDING GEOSTATIC  
 STRESSES FOR COMPUTING ELASTIC MODULUS ARE:

2 179.167 11.762 11.762 3 142.442 2.002 2.002  
 4 114.496 0.000 0.000 5 93.708 0.000 0.000  
 6 78.262 0.000 0.000 7 66.746 0.000 0.000  
 8 58.186 0.000 0.000 9 51.961 0.000 0.000  
 10 40.219 11.570 11.570

RADIAL VERTICAL VERTICAL VERTICAL RADIAL TANGENTIAL SHEAR

page 3

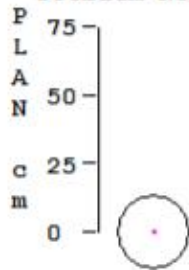
COORDINATE COORDINATE DISPLACEMENT STRESS STRESS STRESS STRESS

(STRAIN) (STRAIN) (STRAIN) (STRAIN)

0.00000 0.00000 0.05117 483.000 1553.757 1553.757 0.000  
 (STRAIN) -1.302E-04 2.733E-04 2.733E-04 .000E+00  
 0.00000 10.00000 0.05117 198.684 -1256.959 -1256.959 0.000  
 (STRAIN) 2.762E-04 -2.723E-04 -2.723E-04 .000E+00  
 0.00000 10.00100 0.05117 198.696 23.838 23.838 0.000  
 (STRAIN) 9.172E-04 -2.724E-04 -2.724E-04 .000E+00  
 0.00000 30.00000 0.03669 79.179 -9.210 -9.210 0.000  
 (STRAIN) 5.435E-04 -2.139E-04 -2.139E-04 .000E+00  
 0.00000 30.00100 0.03669 79.176 -6.518 -6.518 0.000  
 (STRAIN) 5.606E-04 -2.139E-04 -2.139E-04 .000E+00  
 0.00000 50.00000 0.02788 39.210 -12.260 -12.260 0.000  
 (STRAIN) 3.617E-04 -1.642E-04 -1.642E-04 .000E+00  
 0.00000 50.00100 0.02788 39.209 1.976 1.976 0.000  
 (STRAIN) 3.712E-04 -1.642E-04 -1.642E-04 .000E+00  
 0.00000 65.00000 0.02320 27.199 0.900 0.900 0.000  
 (STRAIN) 2.617E-04 -1.165E-04 -1.165E-04 .000E+00

Case 3: Four Non Linear Layered System -Single Wheel Loads-2021

Problem No. 1 Period No. 1 Load Group No. 1



Contact Radius = 16.25 cm  
Contact Pressure = 483 kPa

• Response points  
• Stress points for nonlinear layers

