

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté du génie de la construction

Département de génie civil



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie
Civil

Option : Géotechnique

Thème

*Evaluation des tassements d'une
chaussée souple sous l'effet dynamique
du poids lourd*

Présenté par :

AKLI Aghiles

Devant le jury :

M^r GABI Smail
M^r GHOUILEM Kamel
M^r KAHIL Amar

**Président
Examineur
Promoteur**

Année universitaire : 2019/2020

Résumé : Les infrastructures routières, doivent présenter une efficacité économique et sociale. A travers des avantages et des coûts sociaux des aménagements réalisés, elles sont le principal vecteur de communication et d'échange entre les populations et jouent un rôle essentiel dans l'intégration des activités économiques à la vie locale. L'augmentation du chargement dû aux passages des poids lourds et de leur fréquence engendrent des dégradations dans les différentes couches constituant les chaussées souples.

La présente étude s'intéresse surtout à l'évaluation des tassements d'une chaussée souple sous l'effet du passage de poids lourds, à l'aide d'un logiciel de calcul numérique (Plaxis 2D). Les résultats obtenus, montrent que les valeurs des tassements obtenus aux interfaces supérieures des différentes couches, varient en fonction de la profondeur et de la nature du poids lourds appliqué.

Mots clé : Chaussées souples, Plaxis 2D, tassements, poids lourds.

Abstract : Road infrastructures must be economically and socially efficient. Through the social benefits and costs of the developments carried out, they are the main vector of communication and exchange between populations and play an essential role in the integration of economic activities into local life. The increase in loading due to the passage of heavy goods vehicles and their frequency causes damage to the various layers of flexible pavements.

The present study focuses on the evaluation of the settlement of a flexible pavement under the effect of the passage of heavy goods vehicles, using a numerical calculation software (Plaxis 2D). The results obtained show that the settlement values obtained at the upper interfaces of the different layers vary according to the depth and the nature of the heavy goods vehicle applied.

Key words : Flexible pavements, 2D Plaxis, settlements, heavy vehicles.

REMERCIEMENTS

Je remercie en premier lieu le bon Dieu, le clément et le miséricordieux de m'avoir donné la force et la patience pour pouvoir réaliser ce modeste travail.

Je remercie mon encadreur M^r KAHIL qui m'a guidé tout au long de ce travail. Je le remercie également pour sa disponibilité et ses judicieux conseils qui ont contribué à alimenter ma réflexion et l'évolution de ce travail.

Ma gratitude est destinée également à M^{me} MEZIANI pour son soutien et son aide inconditionné et son encouragement.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous les membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont portés à mon travail et qui me feront l'honneur de l'examiner.

Un grand merci à mes parents et ma famille pour leur soutien moral et intellectuel le long de ma démarche.

J'adresse mes remerciements aussi à mes amis qui m'ont soutenu durant toute ma vie.

DÉDICACES

À chaque étape importante achevée de notre vie, il convient de faire une pause pour regarder en arrière et se rappeler toutes ces personnes avec lesquelles nous avons passé tous ces bons moments de notre parcours, mais aussi les mauvais. Ces personnes qui nous ont aidées sans jamais rien attendre au retour, soutenues sans réserve, aimées sans compter, ces personnes pour qui notre bonheur, notre réussite comptaient énormément, pour qui un malheur en nous, en eux se transforme en pleur

C'est avec une énorme joie et plaisir que je dédie mon travail à tous ceux qui ont contribué à sa réalisation de près soit-il ou de loin.

A mon encadreur M^r KAHIL AMAR.

A mes parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, et surtout ma mère qui a sacrifiée toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis.

A mes frères, mes tantes, mes oncles et bien sûr mes chères sœurs LISA et KATIA.

A mes grands-parents que j'aime tellement qui nous ont quittés avant de pouvoir assister à cet instant.

A Toute la promotion géotechnique 2019/2020, en particulier : Menad, Lydia, Camélia, Laetitia, Biba, Wafia et Chafia.

Sans oublier mes amis(es) avec qui j'ai partagé mes bons et pires moments, soit durant tout mon cursus du primaire à l'université soit en dehors de mon cursus d'études et à tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce travail.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre 01 : Généralités sur les chaussées	
1.1. Introduction	3
1.2. Définition	3
1.3. Présentation géométrique d'une chaussée	3
1.3.1. Le tracé en plan	3
1.3.2 Le profil en long	4
1.3.3. Le profil en travers	4
1.4. Les couches principales de la chaussée	5
1.5. Différents types de chaussées	6
1.5.1 Chaussées souples	6
1.5.2 Les chaussées rigides	7
1.5.3. Chaussée semi-rigide	8
1.6 Les matériaux utilisés en géotechniques routière	9
1.6.1. Origine et nature des matériaux	9
1.6.2 Les matériaux de la plate-forme	9
1.6.3. Les matériaux de la couche de fondation	10
1.6.4. Les matériaux de la couche de base	11
1.6.5. Les matériaux de revêtement	12
1.7 Construction des chaussées souples	13
1.7.1. Couche de fondation	14
1.7.2. Couche de base	14
1.7.3. Couche de surface	15
1.8. Conclusion	15
Chapitre 02 : Les dégradations des chaussées et procédures d'auscultation	
2.1. Introduction	16
2.2. Les dégradations des chaussées	16
2.2.1. Tassements	16
2.2.2. Glissements	17
2.2.3. Retraits-gonflements	18
2.2.4. Autres dégradations	18
2.2.4.1. Les déformations	18
2.2.4.2. Les fissurations	22
2.2.4.3. Les arrachements	25
2.2.4.4. Dégradations en milieu urbain	28
2.3. Procédures d'auscultation	30
2.3.1. Auscultation visuelle	30
2.3.2. Auscultation par mesure de déflexion	30
2.3.3. Auscultation par le GERPHO	30
2.3.4. Auscultation par sondage	31
2.4. Conclusion	31

Chapitre 03 : Résistance mécanique des chaussées	
3.1. Introduction	32
3.2. Résistance mécanique des chaussées	32
3.3. Sollicitations des couches de chaussées	32
3.3.1. Actions des véhicules sur les chaussées	33
a. Efforts verticaux	33
b. Sollicitations tangentielles	33
c. Efforts de cisaillement	34
d. Actions dynamiques	35
e. Les vibrations	35
f. Durée d'application des charges	35
g. Répétitions des charges	35
3.3.2. L'environnement	36
3.4. Causes de rupture des chaussées souples	36
3.4.1. Le trafic	37
3.4.2. Les conditions climatiques	38
3.4.3. Les malfaçons	39
3.4.4. Les accidents et les incidents	39
3.5. Charges dynamiques et statiques	39
3.6. Mécanique d'un véhicule	40
3.6.1. Type de suspension	40
3.6.2. Le pneumatique	41
3.6.3. Types d'essieux	41
3.7. Effet du mouvement de la charge sur la chaussée	42
3.7.1. Evolution de la charge lors du passage d'un véhicule	43
3.7.2. Temps de réaction de la chaussée	44
3.7.3. Oscillation de charge	44
3.8. Conclusion	45
Chapitre 04 : Présentation du logiciel « PLAXIS »	
4.1. Introduction	46
4.2. Présentation du logiciel (PLAXIS)	46
4.3. Les sous programmes de Plaxis	47
4.3.1. Le programme d'entrée de données (Input)	47
4.3.2. Le programme de calcul	47
4.3.3. Le programme des résultats (Output)	48
4.3.4. Le programme courbe (Curves)	50
4.4. Etapes de modélisation	50
4.4.1 La géométrie	50
4.4.2. Les conditions aux limites	51
4.4.3. Définition des paramètres des matériaux	51
4.4.4. Le maillage	51
4.4.5. Les conditions initiales	51
4.4.6. Phase de calcul	52

4.4.7. Visualisation des résultats	52
4.5. Les modèles de comportement utilisés dans « PLAXIS »	54
4.5.1. Modèle élastique linéaire	54
4.5.2. Modèle de Mohr-Coulomb	54
4.5.3. Modèle pour les sols mous « Soft Soil Model »	56
4.5.4. Modèle de sol avec écrouissage « Hardening Soil Model »	56
4.5.5. Modèle pour les sols mous avec fluage « Soft Soil Creep Model »	57
4.5.6. Modèle pour les roches fracturées « Jointed Rock Model »	57
4.6. Conclusion	57
Chapitre 05 : Résultats et interprétations	
5.1. Introduction	58
5.2. Modélisation numérique	58
5.2.1. Modèle géométrique	58
5.2.2. Lois de comportement utilisées	58
5.2.3. Maillage et conditions aux limites	59
5.2.4. Les conditions initiales	60
5.3. Influence du trafic sur les tassements de la chaussée	61
5.4. Simulation du chargement du trafic	63
5.4.1. Cas 01 : Passage d'un camion porteur à deux essieux (CP2E)	63
5.4.2. Cas 02 : Passage d'un camion Porteur à trois essieux (CP3E)	69
5.4.3. Cas 03 : Passage d'un camion tracteur et semi-remorque à 4 essieux (TSR4E)	75
5.4.4. Cas 04 : Passage d'un camion tracteur et semi-remorque à 5 essieux (TSR5E)	81
5.5. Tassements sous la roue du P[ES ₁] dans les 4 cas de chargement	90
5.6 Conclusion	93
Conclusion générale	94
Références Bibliographiques	95

Liste des Figures

Chapitre 01 : Généralités sur les chaussées

Figure 1.1. Le tracé en plan d'une chaussée	4
Figure 1.2. Le tracé en long d'une chaussée	4
Figure 1.3. Le profil en travers d'une chaussée	5
Figure 1.4. Coupe transversale d'un corps de chaussée (Emmanuel Mengie, 2015)	6
Figure 1.5. Structure d'une chaussée souple	7
Figure 1.6. Structure type d'une chaussée rigide	7
Figure 1.7. Structure type d'une chaussée semi-rigide	8
Figure 1.8. Schéma récapitulatif des types de chaussées	8

Chapitre 02 : Les dégradations des chaussées et procédures d'auscultation

Figure 2.1. Tassement	17
Figure 2.2. Glissement	17
Figure 2.3. Retrait gonflement d'une chaussée	18
Figure 2.4. Orniérage	19
Figure 2.5. Affaissements	19
Figure 2.6. Soulèvement différentiel	20
Figure 2.7. Désordre du profil	21
Figure 2.8. Flache	21
Figure 2.9. Bourrelet	22
Figure 2.10. Fissure transversale	22
Figure 2.11. Fissurations longitudinales	23
Figure 2.12. Fissure d'adaptation	24
Figure 2.13. Faiencage à mailles fines	24
Figure 2.14. Pelade	25
Figure 2.15. Nid de poule	26
Figure 2.16. Plumage	26
Figure 2.17. Désenrobage	27
Figure 2.18. Ressuage	27
Figure 2.19. Fissuration autour des regards	28
Figure 2.20. Coupe ou tranchée sur une chaussée	29
Figure 2.21. Dénivellation des regards	29

Chapitre 03 : Résistance mécanique des chaussées

Figure 3.1. Fonctionnement d'une structure de chaussée sous l'application d'une charge roulante	33
Figure 3.2. Fonctionnement d'une chaussée sous sollicitations liées au trafic	34
Figure 3.3. Passage d'une charge roulante	38
Figure 3.4. Mouvement sous variation thermique	38
Figure 3.5. Composante du véhicule et contenu fréquentiel des vibrations induites (Fahimi Jida).	40
Figure 3.6. Constitution d'un pneumatique (Michelin (2002))	41
Figure 3.7. Distribution des charges et développement des contraintes verticales et de cisaillement	43

Figure 3.8. Évolution de la contrainte en un point par rapport à la position de la roue (Fahimi Jida).	44
Figure 3.9. Oscillation d'une roue due une chaussée non uniforme (Fahimi Jida).	45
 Chapitre 04 : Présentation du logiciel « PLAXIS »	
Figure 4.1. Fenêtre principale du programme d'entrée des données	47
Figure 4.2. Fenêtre principale du programme de calcul	48
Figure 4.3. Fenêtre de calcul	48
Figure 4.4. La fenêtre principale du programme des résultats	49
Figure 4.5. Interface graphique curves	50
Figure 4.6. Organigramme de modélisation avec PLAXIS	53
Figure 4.7. Fenêtre des paramètres des modèles élastique linéaire	54
Figure 4.8. Fenêtre des paramètres du modèle de Mohr-Coulomb	55
 Chapitre 05 : Résultats et interprétations	
Figure 5.1. Modèle géométrique du corps de chaussée	58
Figure 5.2 Maillage et conditions aux limites du corps de chaussée	60
Figure 5.3 Position de la nappe phréatique	60
Figure 5.4 Génération des contraintes	61
Figure 5.5. Simplification de la surface de contact pneu-chaussée (Huang, 1993)	61
Figure 5.6. Interfaces supérieures des couches du corps de chaussée	63
Figure 5.7. Tassements au-dessous des roues sous un déplacement imposé	64
Figure 5.8. Chargement dynamique du passage du camion	64
Figure 5.9. Variation des tassements sur IS^{CR} (Z=5.66m)	65
Figure 5.10. Variation des tassements sur IS^{CB} (Z=5.60m)	65
Figure 5.11. Variation des tassements IS^{CF} (Z=5.40m)	66
Figure 5.12. Variation des tassements sur IS^{CFR} (Z=5.20m)	66
Figure 5.13. Variation des tassements sur IS^{SS} (Z=5.00m)	67
Figure 5.14. Tassements maximaux sur les interfaces supérieures des couches aux profils P[ES ₁] et P[ES ₂]	68
Figure 5.15. Evolution des tassements sous le profil P[ES ₁]	68
Figure 5.16. Evolution des tassements sous le profil P[ES ₂]	69
Figure 5.17. Tassements au-dessous des roues sous un déplacement imposé	69
Figure 5.18. Chargement dynamique du passage du camion	70
Figure 5.19. Variation des tassements sur IS^{CR} (Z=5.66m)	70
Figure 5.20. Variation des tassements sur IS^{CB} (Z=5.60m)	71
Figure 5.21. Variation des tassements sur IS^{CF} (Z=5.40m)	71
Figure 5.22. Variation des tassements sur IS^{CFR} (Z=5.20m)	72
Figure 5.23. Variation des tassements sur IS^{SS} (Z=5.00m)	72
Figure 5.24. Tassements maximaux sur les interfaces supérieures des couches aux profils P[ES ₁], P[ES ₂]et P[ES ₃]	73
Figure 5.25. Evolution des tassements sous le profil P[ES ₁]	74

Figure 5.26. Evolution des tassements sous le profil P[ES ₂]	74
Figure 5.27. Evolution des tassements sous le profil P[ES ₃]	75
Figure 5.28. Tassements au-dessous des roues sous un déplacement imposé	75
Figure 5.29. Chargement dynamique du passage du camion	76
Figure 5.30. Variation des tassements sur IS ^{CR} (Z=5.66m)	76
Figure 5.31. Variation des tassements sur IS ^{CB} (Z=5.60m)	77
Figure 5.32. Variation des tassements sur IS ^{CF} (Z=5.40m)	77
Figure 5.33. Variation des tassements sur IS ^{CFR} (Z=5.20m)	78
Figure 5.34. Variation des tassements sur IS ^{SS} (Z=5.00m)	78
Figure 5.35. Tassements maximaux sur les interfaces supérieures des couches aux profils P[ES ₁], P[ES ₂], P[ES ₃] et P[ES ₄]	79
Figure 5.36. Evolution des tassements sous le profil P[ES ₁]	80
Figure 5.37. Evolution des tassements sous le profil P[ES ₂]	81
Figure 5.38. Evolution des tassements sous le profil P[ES ₃]	81
Figure 5.39. Evolution des tassements sous le profil P[ES ₄]	81
Figure 5.40. Tassements au-dessous des roues sous un déplacement imposé	82
Figure 5.41. Chargement dynamique du passage du camion	82
Figure 5.42. Variation des tassements sur IS ^{CR} (Z=5.66m)	83
Figure 5.43. Variation des tassements sur IS ^{CB} (Z=5.60m)	83
Figure 5.44. Variation des tassements sur IS ^{CF} (Z=5.40m)	84
Figure 5.45. Variation des tassements sur IS ^{CFR} (Z=5.20m)	84
Figure 5.46. Variation des tassements sur IS ^{SS} (Z=5.00m)	85
Figure 5.47. Tassements maximaux aux interfaces supérieures des couches aux profils P[ES ₁] et P[ES ₂] et P[ES ₃] et P[ES ₄] et P[ES ₅]	86
Figure 5.48. Evolution des tassements sous le profil P[ES ₁]	87
Figure 5.49. Evolution des tassements sous le profil P[ES ₂]	88
Figure 5.50. Evolution des tassements sous le profil P[ES ₃]	88
Figure 5.51. Evolution des tassements sous le profil P[ES ₄]	89
Figure 5.52. Evolution des tassements sous le profil P[ES ₅]	89
Figure 5.53. Tassements maximaux aux interfaces des couches du profil P[ES ₁] dans les différents cas de chargement	90
Figure 5.54. Evolution des tassements dans le cas (CP2E)	91
Figure 5.55. Evolution des tassements dans le cas (CP3E)	91
Figure 5.56. Evolution des tassements dans le cas (TSR4E)	92
Figure 5.57. Evolution des tassements dans le cas (TSR5E)	92

Liste des tableaux

Chapitre 01 : Généralités sur les chaussées

Tableau 1.1. Terminologie	5
Tableau 1.2. Les différentes classes de portance des sols de la plate-forme	9
Tableau 1.3. Matériaux des couches d'assise	11
Tableau 1.4 Composites des mélanges bétons bitumineux et enrobés denses	13

Chapitre 03 : Résistance mécanique des chaussées

Tableau 3.1. Classes de trafic en fonction des poids lourds qui circulent	37
Tableau 3.2. Les catégories d'essieux et charges de référence poids lourds	42

Chapitre 04 : Présentation du logiciel « PLAXIS »

Tableau 4.1. Les paramètres intégrés dans le modèle de Mohr-Coulomb	55
---	-----------

Chapitre 05 : Résultats et interprétations

Tableau 5.1. Paramètres géotechniques des différentes couches de chaussée.	59
Tableau 5.2. Caractéristiques des camions fréquents	62
Tableau 5.3. Tassements maximaux sur les interfaces supérieures des profils P[ES ₁] et P[ES ₂]	67
Tableau 5.4. Tassements maximaux sur les interfaces supérieures des profils P[ES ₁], P[ES ₂] et P[ES ₃]	73
Tableau 5.5. Tassements maximaux sur les interfaces des profils P[ES ₁], P[ES ₂], P[ES ₃] et P[ES ₄]	79
Tableau 5.6. Tassements maximaux sur les interfaces des profils P[ES ₁] et P[ES ₂] et P[ES ₃] et P[ES ₄] et P[ES ₅]	86
Tableau 5.7. Tassements maximaux sur le P[ES ₁] dans les différents cas du chargement	90

Listes des notations et indices

Indice

P

T

PL

J

 σ τ

L

D

Q

A

Z

T

E

CR

CB

CF

CFR

SS

 γ

E

 ν φ

C

 Ψ K_0 U_z **Désignation**

Pression

Trafic

Poids lourds

Jours

Contrainte

Contrainte de cisaillement

Longueur entre les essieux

Longueur équivalente de la roue

Charge

Amplitude

Profondeur

Temps

Déformation

Couche de roulement

Couche de base

Couche de fondation

Couche de forme

Sol support

Poids volumique

Module de Young

Coefficient de poisson

Angle de frottement

Cohésion

Angle de dilatance

Coefficient des terres au repos

Tassement

Introduction générale

Le réseau routier joue un rôle essentiel dans le développement d'un pays car il représente une base sur laquelle se fonde plusieurs secteurs tels que le transport ; donc il est le moyen vital de l'économie et du développement social d'un pays.

Le réseau routier est constitué principalement des couches de surfaces, d'assises et de forme. Un dimensionnement adéquat d'une structure de chaussée souple passe inévitablement par une bonne connaissance des caractéristiques réelles des plates-formes de sols-supports et notamment du comportement mécanique non-linéaire des matériaux utilisés dans les assises (Paute et al ; 1994).

Avec le temps, les changements de saison et les contraintes engendrées par les différents types de véhicules circulant sur les chaussées provoquent l'endommagement progressif des structures. L'augmentation de la détérioration rend les routes plus vulnérables aux différentes contraintes.

Dans la réalité, l'interaction entre la surface de la route et les véhicules lourds entraînent des charges dynamiques dues à l'oscillation verticale des roues, ce qui augmente les dégâts de la chaussée. L'amplitude des charges dynamiques est dépendante du niveau de la rugosité de surface, de ses caractéristiques, ses propriétés, et les vitesses des véhicules lourds. La mesure de charges dynamiques dans des conditions normales d'exploitation est coûteuse, et l'estimation de la dégradation de la chaussée qui en résulte est difficile à cause de la grande variation des caractéristiques mécaniques des véhicules lourds circulant sur le réseau.

La détérioration est remarquée dans le changement des caractéristiques du profil de surface, ces caractéristiques ont une influence déterminante sur la charge dynamique et le degré de sa répétabilité. Cette approche pourrait aider les autorités à identifier les sections de la route qui sont soumis à une forte charge dynamique et de prendre des mesures appropriées pour réduire son impact.

Il apparaît important d'améliorer les connaissances sur le phénomène de chargement dynamique des véhicules lourds sur les chaussées. Le phénomène des charges dynamiques n'est pas pris en compte lors du dimensionnement et de l'analyse des structures de chaussées, bien qu'il puisse avoir une importance significative sur la durée de vie des chaussées.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'effet du trafic de poids lourds sur la structure d'une chaussée souple et la résistance de cette dernière. Pour cela notre travail est divisé en cinq chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique sur les chaussées. Les structures des chaussées, les différents types de matériaux utilisés dans la construction des chaussées, etc.

Le deuxième chapitre est réservé aux différentes dégradations des chaussées et leurs causes, ainsi les différentes procédures d'auscultation.

Le troisième chapitre est consacré à la résistance mécanique des chaussée, ainsi que les différentes sollicitations exercées sur la chaussé (trafic et l'environnement).

Le quatrième chapitre, englobe la partie numérique de cette étude. Dans ce chapitre, sont présentés les différents modèles de comportement utilisés dans le logiciel de modélisation « PLAXIS 2D ».

Le cinquième chapitre est un chapitre récapitulatif, contenant toutes les interprétations des résultats obtenus lors des différentes simulations réalisées.

Ce projet de fin d'études est clôturé par une conclusion générale, où l'ensemble des résultats obtenus ont été synthétisés.

Chapitre 01

Généralités sur les chaussées

1.1. Introduction	3
1.2. Définition	3
1.3. Présentation géométrique d'une chaussée	3
1.3.1. Le tracé en plan.....	3
1.3.2 Le profil en long	4
1.3.3. Le profil en travers.....	4
1.4. Les couches principales de la chaussée	5
1.5. Différents types de chaussées	6
1.5.1 Chaussées souples.....	6
1.5.2 Les chaussées rigides	7
1.5.3. Chaussée semi-rigide	8
1.6 Les matériaux utilisés en géotechniques routière.....	9
1.6.1. Origine et nature des matériaux	9
1.6.2 Les matériaux de la plate-forme.....	9
1.6.3. Les matériaux de la couche de fondation	10
1.6.4. Les matériaux de la couche de base	11
1.6.5. Les matériaux de revêtement	12
1.7 Construction des chaussées souples.....	13
1.7.1. Couche de fondation	14
1.7.2. Couche de base	14
1.7.3. Couche de surface.....	15
1.8. Conclusion	15

1.1. Introduction

L'histoire de la route est indubitablement attachée au développement de l'humanité et des civilisations. Les premières véritables chaussées furent construites par les romains pour leurs voies impériales, avec un objectif essentiellement militaire.

Depuis les années 50, avec les nouvelles conditions de trafic, notamment les poids lourds, les anciennes solutions de type empierrement se sont avérées insuffisantes, et l'ont été amené à généraliser l'emploi de matériaux agglomérés par un liant tant pour le corps de chaussée que pour la surface.

Une chaussée peut être définie comme une structure plane, conçue et dimensionnée pour garantir l'écoulement du trafic dans de bonnes conditions de sécurité et de confort et d'assurer le bon fonctionnement pour une période de service.

Dimensionner une chaussée c'est optimiser le choix et les épaisseurs des couches de matériaux en tenant compte de toutes les contraintes.

1.2. Définition

Une chaussée est une structure composite, multicouche, souvent complexe, conçue et dimensionnée pour garantir l'écoulement de trafic dans des bonnes conditions de sécurité et de confort, et d'assurer le bon fonctionnement pour une période de service. (Brunel, 2004-2005) (Coquand, 1978) (Fauré, 1998)

La chaussée a pour objectif d'absorber les charges dues aux véhicules, de supporter le poinçonnement résultant des stationnements des véhicules, d'encaisser les variations journalières et saisonnières de température d'hygrométrie, et de rejeter les eaux de pluies vers l'extérieur.

1.3. Présentation géométrique d'une chaussée

Une chaussée est définie par son tracé de plan, son profil en long et son profil en travers.

1.3.1. Le tracé en plan

Projection de la chaussée sur un plan horizontal, il est constitué de courbes pour les virages et de segments droits pour les alignements droits. (Figure 1.1)

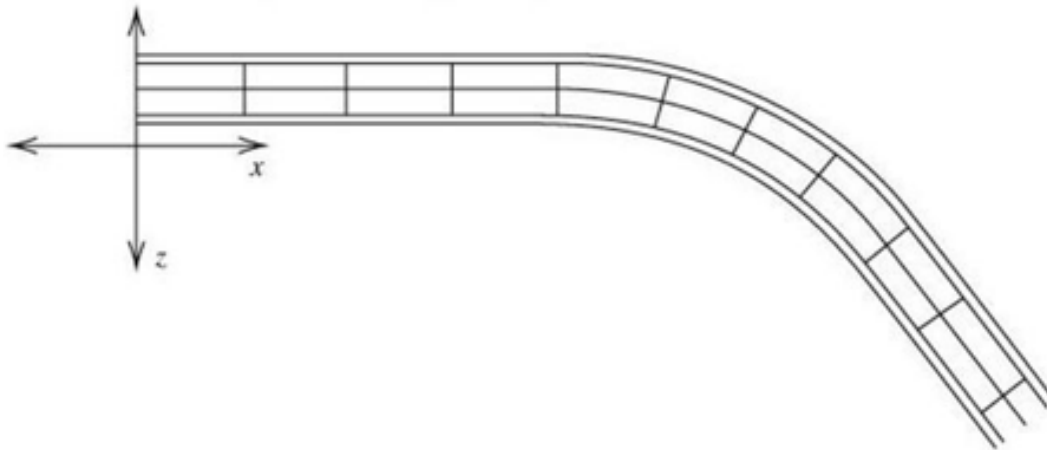


Figure 1.1. Le tracé en plan d'une chaussée

1.3.2 Le profil en long

Coupe du terrain suivant le plan vertical passant par l'axe de tracé, constitué aussi de courbes et de segments droits (montée, descente, palier,...). (Figure 1.2)

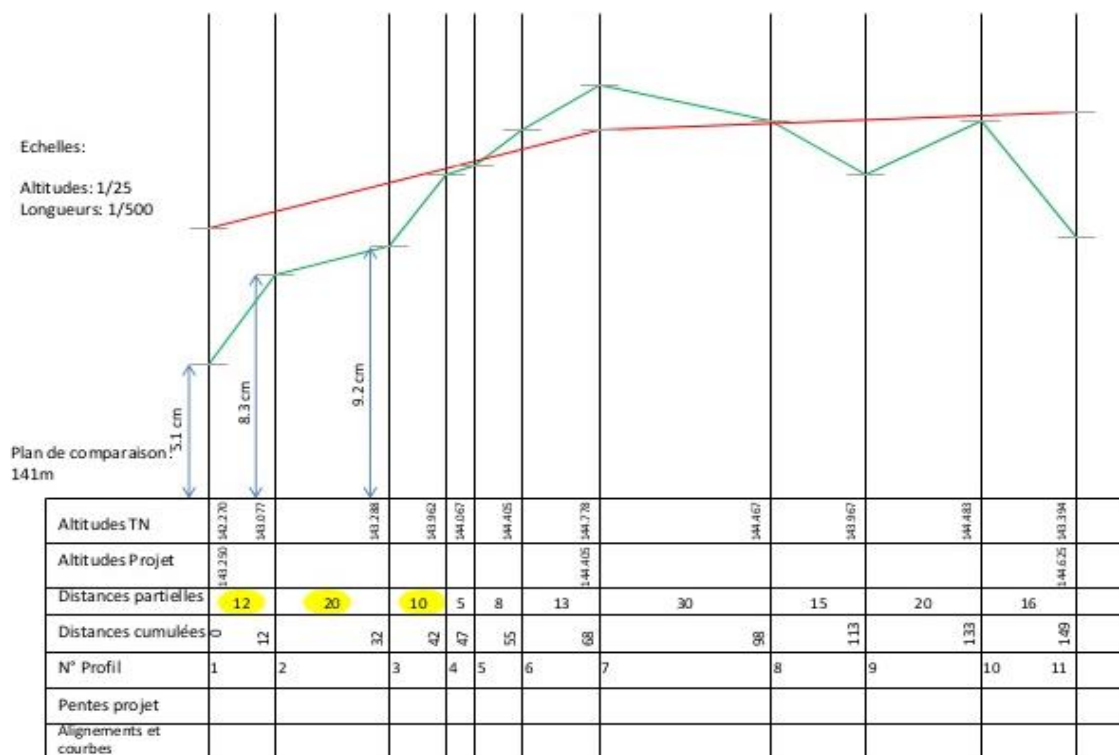


Figure 1.2. Le tracé en long d'une chaussée

1.3.3. Le profil en travers

Coupe transversale suivant un plan perpendiculaire à la chaussée, il illustre la largeur de la chaussée et celle des accotements, ainsi les pentes transversales. (Figure 1.3)

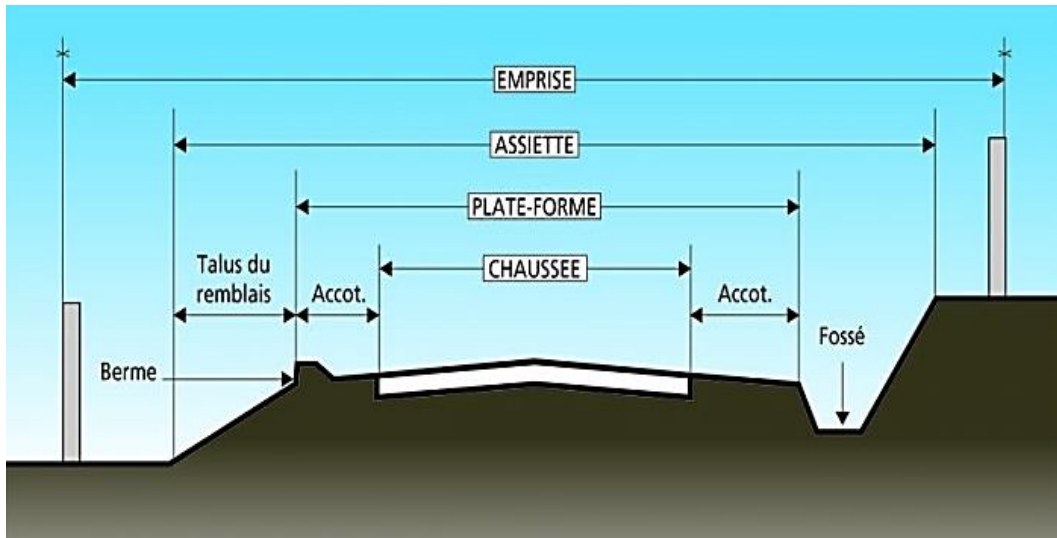


Figure 1.3. Le profil en travers d'une chaussée

Tableau 1.1. Terminologie

Eléments	Définitions
L'EMPRISE	Partie du terrain qui appartient à la collectivité et affectée à la route ainsi qu'à ses dépendances.
L'ASSIETTE	Surface du terrain réellement occupée par la route.
PLATE-FORME	Surface de la route qui comprend la chaussée et les accotements.
CHAUSSEE	Surface aménagée de la route sur laquelle circulent les véhicules.
ACCOTEMENTS	Zones latérales de la plate-forme qui bordent extérieurement la chaussée.

1.4. Les couches principales de la chaussée

Une chaussée routière se présente comme une structure composite réalisée par empilements successifs de couche de matériaux granulaires (couches de surfaces, couches d'assises et plate-forme support de chaussée). (Figure 1.4)

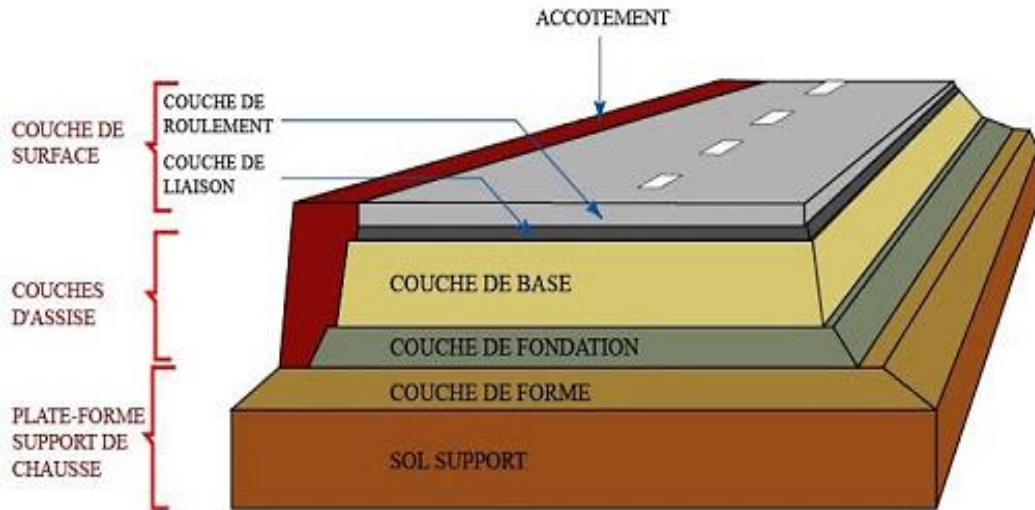


Figure 1.4. Coupe transversale d'un corps de chaussée (Emmanuel Mengie, 2015)

Le sol support est généralement surmonté d'une couche de forme pour former un ensemble appelé plate-forme support de chaussée. Cette dernière sert, comme son nom l'indique, de support au corps de chaussée. Pendant la phase de travaux, la couche de forme a pour rôle d'assurer une qualité de nivellement permettant la circulation des engins pour la réalisation du corps de chaussée. Vis-à-vis du fonctionnement mécanique de la chaussée, la couche de forme permet d'augmenter la capacité portante de la plate-forme support de chaussée. (Jeuffroy, 1974)

Les couches d'assises sont généralement constituées d'une couche de fondation surmontée d'une couche de base. Elles apportent à la structure de la 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.

La couche de surface est formée d'une couche de roulement surmontant éventuellement une couche de liaison intermédiaire. La couche de roulement assure la fonction d'étanchéité des couches d'assises vis-à-vis des infiltrations d'eau, et à travers ses caractéristiques de surface, elle garantit la sécurité et le confort des usagers. (Diakhate, 2007)

1.5. Différents types de chaussées

Du point de vue constructif, les chaussées peuvent être groupées en trois grandes catégories.

1.5.1 Chaussées souples

Les chaussées souples comportent une couverture bitumineuse relativement mince (inférieure à 15cm), parfois réduite à un enduit pour les chaussées à très faibles trafics,

reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités. L'épaisseur globale de la chaussée est généralement comprises entre 30 à 60 cm. (Figure1.5) (LCPC, SETRA, 1998)

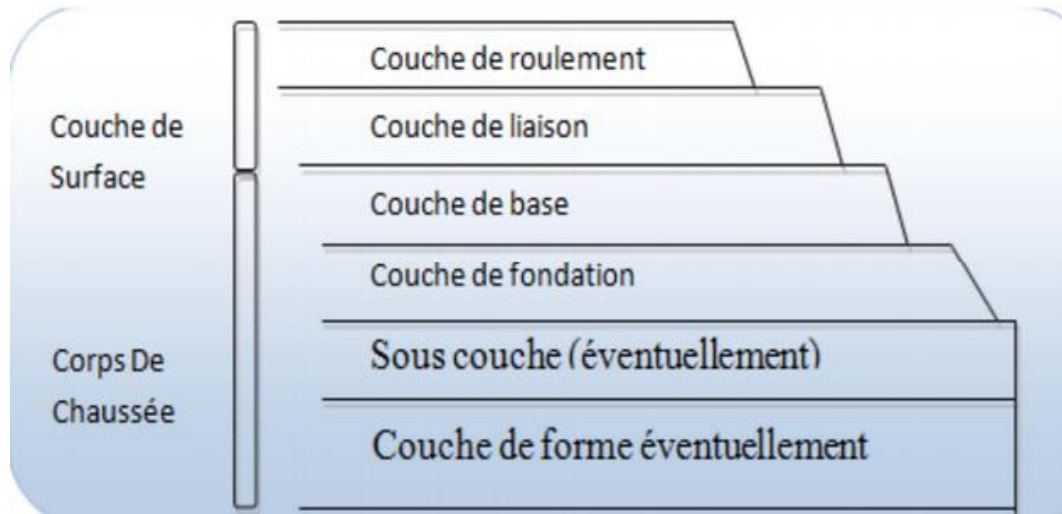


Figure 1.5. Structure d'une chaussée souple

1.5.2 Les chaussées rigides

Une chaussée rigide est constituée d'un revêtement en béton de ciment. En général, une chaussée en béton comporte, à partir du sol, les couches suivantes : une couche de forme, couche de fondation, et couche de roulement en béton de ciment (Figure 1.6). La dalle en béton peut ainsi être réalisée directement sur l'arase du terrassement ou sur la plate-forme support de chaussée.

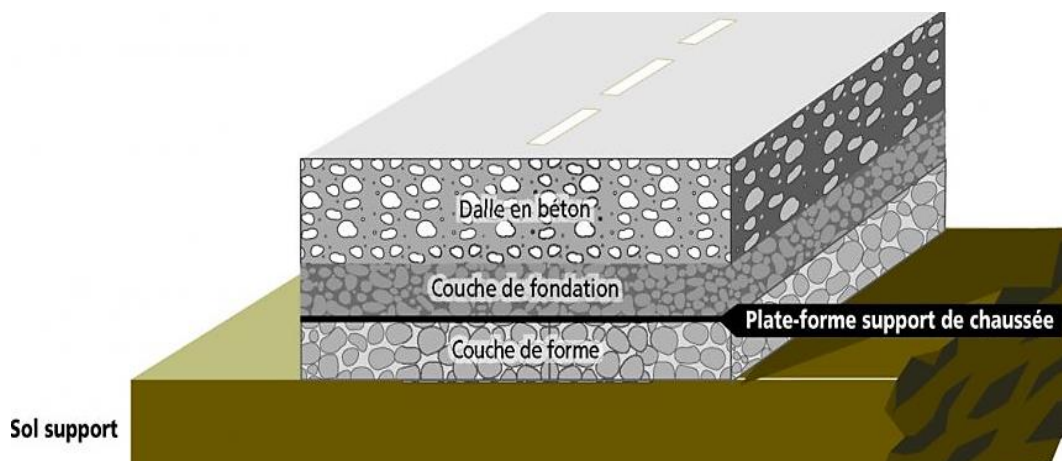


Figure 1.6. Structure type d'une chaussée rigide

1.5.3. Chaussée semi-rigide

C'est un cas intermédiaire entre les chaussées souples et les chaussées rigides comme les chaussées à structure mixte ou inverse. Elles comportent une couche de surface bitumineuse reposant sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposés en une couche (base) ou deux couches (base et fondation) (Figure 1.7)

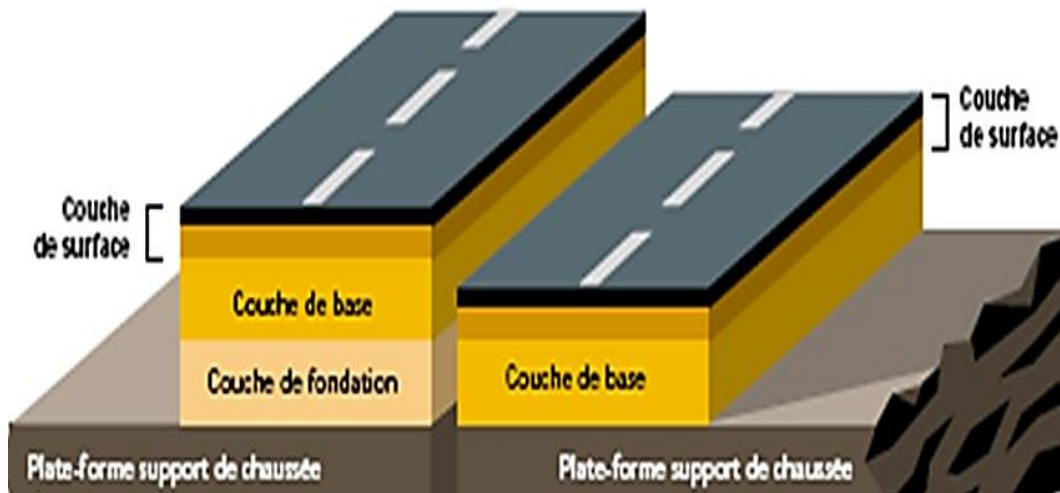


Figure 1.7. Structure type d'une chaussée semi-rigide

Le schéma ci-dessous (Figure 1.8) représente les différents types des chaussées.

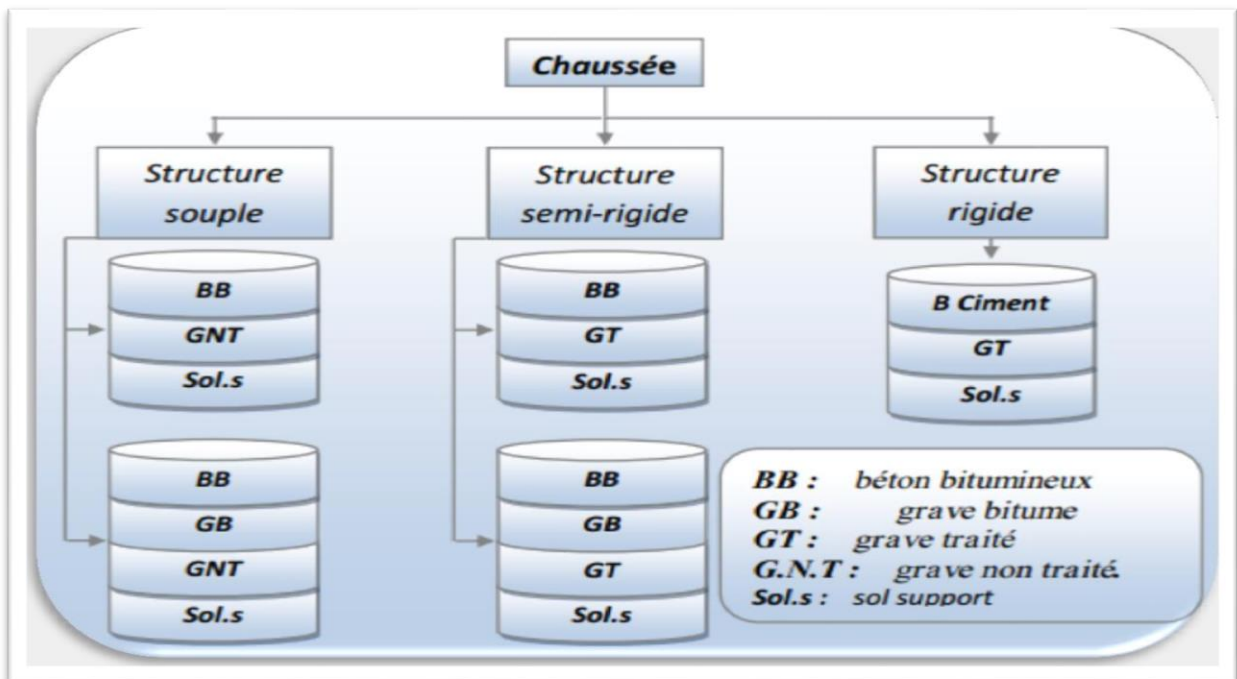


Figure 1.8. Schéma récapitulatif des types de chaussées

1.6 Les matériaux utilisés en géotechniques routière

Le domaine routier est un grand consommateur de matériaux granulaires non liés. Une construction routière nécessite, l'exploitation, la préparation et la mise en place d'une quantité considérable de matériaux de bonnes qualités.

1.6.1. Origine et nature des matériaux

Les matériaux utilisés sont des roches qui peuvent être :

- sédimentaires : sables, latérites, grés ;
- éruptives ou ignées : basaltes plus généralement, dolérite, granite parfois ;
- métamorphiques : quartzite, gneiss parfois.

Les matériaux sont souvent sous forme de :

- massif rocheux : ils sont alors exploités en carrière par concassage ;
- graveleux naturels : dans ce cas ils sont exploités en graviers pour les gisements latérites ou par dragage pour les dépôts lacustres et fluviaux.

1.6.2 Les matériaux de la plate-forme

La plate-forme constitue l'infrastructure de la chaussée. Sa mise en œuvre mérite une attention particulière car beaucoup de méthode de dimensionnement s'appuieront sur sa résistance au poinçonnement qui est la capacité portante (California Bearing Ratio (CBR)). Les niveaux de portance des sols de plate-forme ont été définis et devisé selon les intervalles de valeurs CBR (Tableau 1.2)

Tableau 1.2. Les différentes classes de portance des sols de la plate-forme

Les classes	Indice CBR	Qualité de l'infrastructure
S1	CBR < 5	Infrastructure faible
S2	5 < CBR < 10	Infrastructure moyenne
S3	10 < CBR < 15	Infrastructure bonne
S4	15 < CBR < 30	Infrastructure excellente
S5	CBR > 30	Infrastructure très excellente

➤ **Les sables naturels et améliorés**

Un sable naturel peut être défini par un granulat dont la dimension maximale exprimée en $(80 \mu\text{m} < 35\%)$. Si les propriétés du sable ne répondent pas aux exigences des cahiers de charges, on procède à des améliorations pour augmenter ses performances.

➤ **Matériaux synthétiques**

Les matériaux synthétiques sont des matériaux fabriqués apparus dans la construction des chaussées, depuis quelques années, destinés à des utilisations spécifiques.

Les géotextiles sont des matériaux en fibres de polyesters, peuvent être tissés ou non tissés. Elles peuvent être soit perméables, soit imperméables (géomembranes), livrés en rouleaux, ils peuvent assurer des fonctions de renforcement (armatures), de séparation (anti-contaminants), de filtration et de drainage.

1.6.3. Les matériaux de la couche de fondation

La couche de fondation est soumise à des contraintes et des déformations d'un niveau de qualité mécanique moins que celui de la couche de base.

a. Les sables traités

Nous avons deux types de traitement : le traitement au ciment et celui par le bitume. Le traitement s'opère par le ciment dans le cas où la couche de base est en grave ciment ou en grave bitume. Le traitement en bitume est utilisé pour les sols de bonne portance avec une faible teneur en eau. Son coût élevé fait qu'il est rarement utilisé.

b. Les graveleux latéritiques

La latérite est une roche résiduelle rougeâtre issue d'un processus d'altération de roches meubles silico-alumineuses avec départ de la silice et enrichissement relatif en alumine.

Les graveleux latéritiques sont les matériaux les plus utilisés en constructions routières plus généralement en Afrique. Dans le cas de leur utilisation, le critère principal sera celui de l'indice portant CBR.

c. Les graves

Ce sont des mélanges granulométriques continus de cailloux, de graviers et de sables avec généralement une petite proportion de particules fines.

La couche de fondation est constituée généralement de grave, un mélange naturel de gravier et de sable, le mélange pouvant être du tout-venant ou spécialement composé en centrale. Le

matériau peut être rond (déblais) ou concassée (exploitation carrière de roches massives ou d'excavation en rocher).

1.6.4. Les matériaux de la couche de base

La couche de base est plus proche de la surface de la chaussée, elle subit des contraintes et des déformations notables ; il est donc nécessaire qu'elle présente des caractéristiques mécaniques élevés.

a. Les matériaux non traités

Les graveleux latéritiques constituent les matériaux les plus utilisés en couche de base. A l'état cru son indice portatif doit être supérieur à 80% mesuré après 4 jours d'imbibition sur squelettes compactés à la teneur en eau optimale.

b. Les matériaux traités

Les matériaux traités sont des matériaux améliorés par le ciment (diminution de la sensibilité à l'eau, augmentation de la résistance et la portance) et Sables améliorés au bitume (pour les sols de mauvaise tenue à l'eau). On résume dans le (Tableau 1.3) les matériaux des couches d'assises.

Tableau 1.3. Matériaux des couches d'assise

Trafic	Couche de fondation	Couche de base
T₁ : de 300 à 750 PL/j	-Grave latéritique d'excellente qualité.	-Grave bitume ou grave ciment.
	-Sol bitume. -Sol traité à la centrale, à la chaud ou au ciment.	-Tout-venant de concassage 0/40. -Graves latéritiques.
T₂ : de 150 à 300 PL/j	-Grave latéritique de très bonne qualité.	-Grave latéritique d'excellente qualité.
	-Sol traité à la chaux ou au ciment. - Tout-venant de concassage 0/60	-Sol fins -Tout-venant de concassage 0/40.
T₃ : de 50 à 150 PL/j	-Sol traité au bitume.	-Grave latéritique de très bonne qualité.
	-Sol traité à la chaux ou au ciment. - Tout-venant de concassage 0/60	-Sol bitume. -Sol traité à la chaux ou au ciment.
T₄ : de 25 à 50 PL/j	-Graves latéritiques.	-Graves latéritiques ou améliorés.
	-Grave sableuse -Tout-venant de concassage 0/60	-Sable amélioré au ciment ou au bitume. -Tout-venant de concassage 0/40.

1.6.5. Les matériaux de revêtement**a. Les enduits superficiels**

Les enduits superficiels sont une structure monocouche ou bicouche à simple ou double gravillonnage constitué de granulats et de liants hydrocarbonés.

La granularité utilisée doit permettre de former une mosaïque de telle sorte que les granulats de petites dimensions remplissent les vides entre les gros granulats.

b. Les enrobés denses

Les enrobés denses sont des mélanges de liants (bitume) et de granulats en centrale posés à chaud. La température minimale de pose est de 120°. Elles assurent les rôles de rugosité, d'étanchéité et d'uni de la couche de roulement.

Le genre de projet et les conditions climatiques nous aident à choisir le type de bitume approprié. Ainsi les bitumes routiers les plus utilisés sont le 40/50 et le 60/70.

c. Les bétons bitumineux

Le béton bitumineux est un mélange, parfaitement contrôlé et de haute qualité, réalisé à chaud. Il est constitué de granulats de bonne qualité provenant de roches massives et de bitume pur.

Les bétons représentent l'une des solutions technique les plus avancées pour la réalisation des couches de roulement des chaussées revêtus.

Le béton bitumineux présente les avantages suivants :

- une meilleure homogénéité d'ensemble ;
- une meilleure étanchéité ;
- une grande stabilité ;
- une meilleure résistance au glissement.

Suivant le pourcentage des vides et la granulométrie, on distingue les bétons bitumineux des enrobés denses comme représenté dans le (Tableau 1.4).

Tableau 1.4 Composites des mélanges bétons bitumineux et enrobés denses

Type de mélange	Granulats	Liants
Bétons bitumineux	-Concassés (sable peu rond)	-Bitume ou bitume-goudron
	-Roche dure -Forme cubique, propre -% vides de 4 à 6	en pourcentage dépendent du pourcentage de filler
Enrobés denses	-Concassés, ronds ou	-Bitume de 4 à 5 %
	mélanges de deux	
	-Fuseau large -% vides de 8 à 12	

1.7 Construction des chaussées souples

Les chaussées souples sont constituées par des couches superposées des matériaux au sein desquels la répartition des charges se fait par des mécanismes classiques de distributions des contraintes dans les sols. Les couches supérieures sont plus résistantes et moins déformables que les couches inférieures. Une chaussée souple est constituée de trois couches principales : la couche de fondations, les couches de base et de surface. Les couches de base et de fondation constituent les assises de chaussée éventuellement complétés par des sous-couches :

- une couche de forme employée lorsque le terrain naturel présente les caractéristiques particulièrement médiocres et hétérogènes. Cette couche est réalisée par terrassement du terrain naturel. Lors des travaux, elle protège le sol support, contribue au nivellement, permet la circulation des engins de chantier, de rendre plus homogènes les caractéristiques du sol terrassé ;
- une sous couche de fondation qui peut être anti contaminant (environ 10cm) qui empêche la contamination par les particules lors du compactage ou en service ;
- sous couche anticapillaire pour limiter la remontée capillaire en présence d'une nappe aquifère ;
- sous couche drainante qui assure le drainage.

1.7.1. Couche de fondation

Dans la couche de fondation, les qualités de résistance aux déformations permanentes et celles de rigidités doivent se conserver sous l'effet de trafic. Pour cela les granulats doivent résister à la fragmentation et à l'attrition. Cette couche doit rester insensible à l'eau, au gel et aux fortes températures pour que ces qualités demeurent quelles que soit les conditions climatiques.

En général, la réalisation des couches de fondations ne pose pas assez de difficulté car un grand nombre de matériaux sont convenables, soit amélioré par un traitement approprié, soit simplement apportés. On peut utiliser les graves concassés ou le tout-venant d'oued, ces matériaux doivent satisfaire les conditions suivantes :

- être peu sensible à l'eau, pour cela, il faut que la proportion d'éléments fins surtout d'argile soit faible. Ces matériaux doivent être d'indice de plasticité nul ou inférieur à cinq (5) ;
- conserver dans les conditions hygrométriques les plus défavorables, une portance suffisante ;
- être plus compacté par des vibrations et des compressions qui conduisent à un aménagement stable des grains correspondant à une quantité de vides réduites et à une forte densité sèche.

1.7.2. Couche de base

Epaisse généralement de 10 à 20 centimètres, elle doit être construite avec beaucoup de soin, car c'est à l'intérieur de laquelle les pressions élevées dues aux charges s'atténuent suffisamment pour être supportées soit par le terrain, soit presque toujours par une ou plusieurs couches de fondations beaucoup plus grossières. Pour cela l'emploi d'un matériau compactable pour la réalisation d'une couche de base doit faire l'objet d'un contrôle particulier. Cette couche qui est protégée superficiellement par la couche de surface est généralement constituée par des graves concassés.

- le matériau doit avoir une grosseur maximale de 40mm. Sinon on s'expose à une ségrégation dans la mise en œuvre et à des arrachements en surface, quand la chaussée sera mise en service ;
- il faut éviter d'employer les matériaux tendres, dont l'écrasement modifie rapidement la granulométrie et la plasticité.

1.7.3. Couche de surface

Dans une chaussée, la couche de surface joue un rôle important, de son choix dépendront les choix au niveau des couches inférieures. Elle sert de protection pour les couches de base, résiste au cisaillement et absorbe les efforts horizontaux. Cette couche est constituée de :

- la couche de roulement qui est la couche supérieure de la chaussée sur laquelle s'exerce directement les agressions conjuguées de trafic et de climat. Elle est enrobée dense en bétons bitumineux ;
- la couche de liaison entre les couches d'assises et la couche de roulement enrobée semi-dense en béton bitumineux.

La qualité d'usage de la chaussée dépend en majeure partie des caractéristiques de surface de la couche de roulement, donc de sa nature et de son état. Par l'étanchéité qu'elle apporte, elle contribue à la pérennité de la chaussée. Les fonctions qu'elle assure cette couche font que son choix doit résulter de la prise en considération des paramètres suivants :

- la sécurité et les confort des usagers en relation avec les caractéristiques de surface ;
- le maintien de l'intégrité de la structure par la protection des couches d'assises à l'égard d'infiltration des eaux pluviales ;
- l'impact sur l'environnement.

1.8. Conclusion

La structure d'une chaussée est en général composée de trois groupes de couches superposées : la plate-forme support, les couches d'assises et les couches de surface.

Les couches d'assises constituent le corps de la chaussée et servent à répartir les chargements mécaniques induits par le trafic et les transmettre à la plate-forme support. Les couches de surface comprennent essentiellement la couche de roulement, qui a pour rôle de protéger les couches d'assises des infiltrations et d'améliorer la qualité de la surface de la chaussée.

La chaussée est soumise aux diverses sollicitations telles que : le trafic lourd, les conditions climatiques et autres liées à la nature et à l'épaisseur des matériaux utilisés et à leurs conditions de fabrication et de mise en œuvre.

Chapitre 02

Les dégradations des chaussées et procédures d'auscultation

2.1. Introduction	16
2.2. Les dégradations des chaussées.....	16
2.2.1. Tassements	16
2.2.2. Glissements.....	17
2.2.3. Retraits-gonflements.....	18
2.2.4. Autres dégradations	18
2.2.4.1. Les déformations	18
2.2.4.2. Les fissurations	22
2.2.4.3. Les arrachements	25
2.2.4.4. Dégradations en milieu urbain.....	28
2.3. Procédures d'auscultation.....	30
2.3.1. Auscultation visuelle	30
2.3.2. Auscultation par mesure de déflexion	30
2.3.3. Auscultation par le GERPHO.....	30
2.3.4. Auscultation par sondage.....	31
2.4. Conclusion.....	31

2.1. Introduction

Toutes les chaussées anciennes ont été construites pour une circulation peu intense, de façon absolument empirique, en prenant simplement quelques précautions lorsque le terrain était visiblement peu résistant. Il en résulte que la plupart d'entre elles sont incapables de supporter la circulation lourde en progression rapide, et, si on ne prenait aucune mesure, évolueraient très rapidement vers la ruine.

L'évaluation de la chaussée repose sur une série de mesure et d'observations visuelles qui permettent d'établir la condition de la structure, de diagnostiquer les causes des dégradations apparentes et de cibler les solutions les plus appropriées. Ces dégradations apparentes sont caractérisées par deux grandeurs importantes qui sont :

- l'étendue : qui permet de rendre compte de l'importance d'apparition du désordre, c'est la partie de la chaussée affectée par le défaut. Elle exprime la longueur endommagée par rapport à la longueur totale de la section du relevé pour les dégradations linéaires ou la surface endommagée par rapport à la surface totale, pour les dégradations bidimensionnelles ;
- la gravité : pour signaler le degré de sévérité (faible, moyen et majeur) de la dégradation.

2.2. Les dégradations des chaussées

2.2.1. Tassements

Le tassement d'un sol est sa déformation verticale due à l'application des contraintes extérieures telles que les remblais, les fondations ou son propre poids. Les tassements peuvent être uniformes, ou différents d'un point, à un autre selon la nature du sol en place. Dans les sols non saturés, les tassements sont presque instantanés, mais dans les sols saturés, ils peuvent s'étendre sur quelques secondes dans les sols sableux-graveleux, jusqu'à plusieurs dizaines d'années dans les argiles peu perméables.



Figure 2.1. Tassement

2.2.2. Glissements

Ces mouvements au sens large du terme, consistent en un déplacement plus ou moins continu d'un versant instable de montagne ou de colline (Figure 2.2).

Le mouvement est engendré par l'action de la gravité, de forces extérieures (hydraulique ou sismiques) ou d'une modification des conditions aux limites.

La masse de matériaux meubles, ou rocheux fracturés se détache suivant une ou plusieurs surfaces de rupture par cisaillement, qui correspondent souvent à des discontinuités préexistantes, visibles ou non et de formes diverses.



Figure 2.2. Glissement

2.2.3. Retraits-gonflements

Le retrait-gonflement est un mouvement de tassement différentiel du sol. La variation de volume d'un terrain est consécutive à l'alternance des périodes de sécheresse (déshydratation superficielle) et des périodes pluvieuses (réhydratation), et elle provoque des désordres dans les constructions (fissuration, décollement d'élément jointifs). (Figure 2.3)



Figure 2.3. Retrait gonflement d'une chaussée

2.2.4. Autres dégradations

Les dégradations des chaussées souples peuvent être classées en quatre familles :

- les déformations ;
- les fissurations ;
- les arrachements ;
- les dégradations en milieu urbain.

2.2.4.1. Les 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.

a. Orniérage

C'est une déformation permanente longitudinale qui se crée sous le passage des roues (Figure 2.4).



Figure 2.4. Orniéage

➤ **Causes probables**

- vieillissement (accumulation des déformations permanentes) ;
- compactage insuffisant dans les couches de granulaire à la construction ;
- capacité structurale insuffisante de la chaussée ;
- usure ;
- mauvais drainage des matériaux granulaires de la chaussée (ex : période de dégel).

b. Affaissement

C'est un tassement vertical au bord des accotements sur la chaussée (Figure 2.5).



Figure 2.5. Affaissements

➤ **Causes probables**

- instabilité du remblai ;
- la présence de matériaux inadéquats ou mal compacté ;
- zone de déblai argileux ou secteurs marécageux ;
- affouillement ou assèchement du sol support ;
- le mauvais état des réseaux souterrains (milieu urbain).

c. Soulèvement différentiel

Le soulèvement différentiel est défini par le gonflement localisé de la chaussée en période de gel, aussi bien parallèle que perpendiculaire à l'axe de la chaussée (Figure 2.6).



Figure 2.6. Soulèvement différentiel

➤ **Causes probables**

- infrastructure gélive, phénomène hivernal récurrent ;
- matériaux sensibles à l'humidité, phénomène permanent ;
- nappe phréatique élevée et présence d'eau aux abords de la chaussée ;
- hétérogénéité des matériaux ou transition inadéquate dans la chaussée ;
- conduites souterraines à faibles profondeur (milieu urbain).

d. Désordre de profil

Le désordre de profil est observé en cas des pentes et géométrie inappropriées favorisant l'accumulation des eaux de ruissèlement en flaques sur la surface de la chaussée (Figure 2.7).



Figure 2.7. Désordre du profil

➤ **Causes probables**

Les phénomènes qui provoquent les désordres de profil sont généralement les points bas non drainés, l'affaissement le long des bordures.

e. Flache

C'est une dépression de forme arrondie d'un point faible du corps de chaussée (Figure 2.8).

➤ **Causes probables**

- compactage localement insuffisant de la couche de base ou de la couche de surface;
- pollution localisée du corps de chaussée ;
- présence d'eau dans la couche de base ou le sol support.

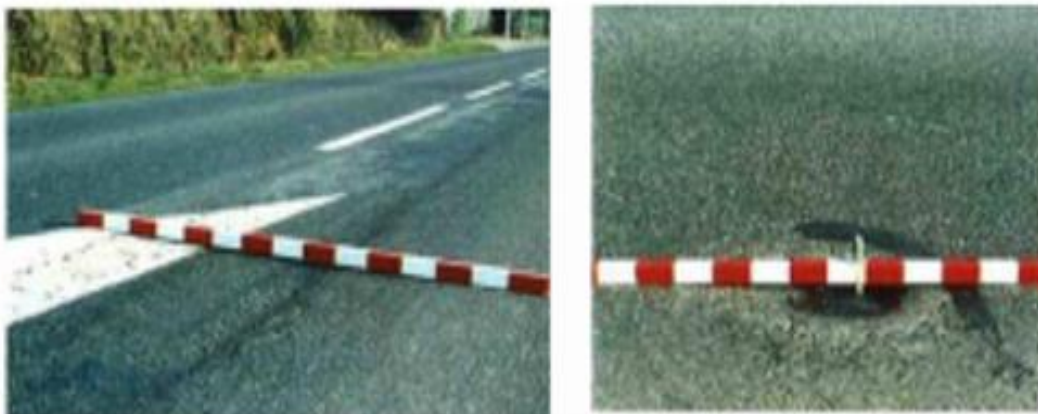


Figure 2.8. Flache

f. Bourrelet

C'est un renflement plus au moins accentué apparaissant à la surface de la chaussée (Figure 2.9).

➤ Causes probables

- excès de liant ayant flué sous l'effet de la circulation (zone de freinage etc....).



Figure 2.9. Bourrelet

2.2.4.2. Les fissurations

Une fissuration est une ligne de rupture apparaissant à la surface de la chaussée.

On peut rencontrer plusieurs fissures :

a. Fissuration transversale

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 2.10).



Figure 2.10. Fissure transversale

➤ **Causes probables**

- retrait thermique ;
- vieillissement et fragilisation du bitume ;
- joint de construction mal exécuté (arrêt et reprise des travaux de pose d'enrobé) ;
- diminution de la section du revêtement.

b. Fissuration longitudinales

Elles sont caractérisées par la rupture du revêtement parallèle à la direction de la route et située dans les pistes de roues (Figure 2.11).



Figure 2.11. Fissurations longitudinales

➤ **Causes probables**

- fatigue du revêtement (trafic lourd) ;
- capacité structurale insuffisante de la chaussée ;
- mauvais drainage des couches granulaires de la chaussée (ex : pendant le dégel) ;
- qualité médiocre de certains matériaux.

c. Fissure d'adaptation

Fissures provenant de mouvement de sols (tassement, glissement du remblai...). (Figure 2.12)



Figure 2.12. Fissure d'adaptation

➤ **Causes probables**

- glissement de terrain ;
- tassement de remblai (instabilité) ;
- retrait hydrique du sol support (argiles, limons, marnes).

d. Faièncage

Le faièncage est un ensemble de fissures plus au moins rapprochées formant des mailles, se produisant sur les couches de surface. (LCPC, 1998)



Figure 2.13. Faièncage à mailles fines

➤ **Causes probables**

- fatigue de la chaussée (due à un sous dimensionnement) ;
- durcissement et retrait de l'enrobé ;
- rupture de la couche superficielle due aux sollicitations de la circulation, à la fatigue et au vieillissement dans le cas d'une trop faible épaisseur ;

- mauvais accrochage de la couche de roulement sur la couche de base ;
- dégradations de couches inférieures (couche de base principalement) ;
- perméabilité de la couche de base inférieure à celle de la couche de roulement.

2.2.4.3. Les arrachements

L'arrachement est un départ de gravillon sous l'effet du trafic, c'est un désordre affectant en général la couche de roulement.

a. Pelade

Arrachement (décollement) de la couche de surface (roulement) par plaque. (LCPC, 1998,

b)



Figure 2.14. Pelade

➤ Causes probables

- mauvaise adhérence de la couche de surface (ex : manque de liant d'accrochage, incompatibilité chimique, saleté entre les couches) ;
- épaisseur insuffisante de la couche de surface ;
- chaussée fortement sollicitée par le trafic.

b. Nid de poule

Cavité circulaire créée à la surface de la chaussée par enlèvement des matériaux de chaussée. (LCPC, 1998, b).



Figure 2.15. Nid de poule

➤ **Causes probables**

Les nids de poules sont provoqués par la faiblesse ponctuelle de la fondation, l'insuffisance de l'épaisseur du revêtement, le défaut de portance (drainage, poche d'argile, etc.). Ils peuvent aussi avoir lieu lorsque la chaussée est fortement sollicitée par le trafic lourd, en cas d'un défaut localisé de la couche de surface ou de base qui est souvent due à une mauvaise qualité à la fabrication ou à la mise en œuvre des matériaux.

c. Plumage

L'arrachement des gravillons du revêtement, ce qui rend la chaussée plus glissante et plus perméable.



Figure 2.16. Plumage

d. Désenrobage

Est l'érosion et perte des gros granulats en surface produisant une détérioration progressive du revêtement.



Figure 2.17. Désenrobage

➤ **Causes probables**

- usure par trafic intense ;
- sous dosage du bitume ;
- utilisation d'agrégats hydrophiles ;
- compactage insuffisant ;
- surchauffe ou vieillissement de l'enrobé (oxydation et fragilisation) ;
- stagnation d'eau sur la chaussée.

e. Ressuage

Le ressuage est une remontée de bitume à la surface du revêtement, accentuée dans les pistes de roues (Figure 2.18).



Figure 2.18. Ressuage

➤ **Causes probables**

- surdosage du bitume ;
- excès de liants d'accrochage ;
- effet combiné de la température élevée du revêtement et des sollicitations du trafic.

2.2.4.4. Dégradations en milieu urbain

a. Fissuration autour des regards et des puisards

Elle est décrite par la rupture du revêtement suivant un tracé circulaire et/ou radial.



Figure 2.19. Fissuration autour des regards

➤ **Causes probables**

- consolidation ou tassement de la chaussée ;
- les cycles de gel et de dégel ;
- la désagrégation de la cheminée par la saumure ;
- la perte de matériaux autour de la structure.

b. Coupe et tranchée

C'est une fissuration ou affaissement dans la tranchée ou dans son voisinage.



Figure 2.20. Coupe ou tranchée sur une chaussée

➤ **Causes probables**

- le compactage insuffisant des matériaux de remblayage de la tranchée ;
- l'hétérogénéité des matériaux de tranchées et celle de chaussées existantes ;
- le remblayage incomplet sous les bords du revêtement ;
- le manque d'étanchéité du joint de coupe.

c. Dénivellation des regards et des puisards

C'est une inégalité entre la surface du revêtement et le dessus d'un puisard ou d'un regard.



Figure 2.21. Dénivellation des regards

➤ **Causes probables**

- consolidation ou tassement de la chaussée ;
- cycles de gel et de dégel engendrant des déformations permanentes ;
- désagrégation de la cheminée en présence de saumure ;
- perte de matériaux autour de la structure.

2.3. Procédures d'auscultation

La description précise des défauts d'une chaussée est incontestablement un des éléments importants à prendre en compte pour établir le diagnostic et choisir la technique d'entretien à mettre en œuvre.

2.3.1. Auscultation visuelle

L'analyse de l'état de dégradation doit être faite sur la base d'une inspection visuelle détaillée qui doit porter sur un relevé systématique du type de chaque dégradation, de son étendue et de sa gravité.

Pour ce faire, le technicien chargé du relevé devra parcourir la section à bord d'un véhicule avec une vitesse très réduite qui lui permettra de noter toutes les dégradations et de s'y arrêter pour effectuer les mesures nécessaires.

Les moyens matériels dont il doit disposer pour mener son travail sont :

- un véhicule muni d'un compteur métrique ;
- les feuilles de routes ;
- une règle droite de 2m équipée d'un dispositif pour mesurer les profondeurs de déformations ;
- un calibre pour mesurer les largeurs des fissurations.

2.3.2. Auscultation par mesure de déflexion

Les déflectomètres à impulsion et à vibration permettent de reproduire l'effet du passage d'essieux sur une chaussée. Des capteurs fournissent les déformations verticales de la surface de chaussée, les déformations enregistrées donnent le bassin de déflexion.

La forme et l'amplitude du bassin nous renseignent alors sur la capacité et la condition structurale de la chaussée.

2.3.3. Auscultation par le GERPHO

Cet appareil sert à relever les dégradations sous la forme de photos. C'est un appareil intéressant pour les sections de routes très dégradées avec un trafic très important, ce qui rend les relevés visuels difficiles et dangereux. Malheureusement l'analyse des images qui se fait manuellement ou plutôt visuellement est longue, difficile et fastidieuse.

2.3.4. Auscultation par sondage

L'auscultation par sondage du corps de chaussée et sous accotements permet :

- de déterminer l'épaisseur des différentes couches et la nature des matériaux rencontrés ;
- de connaître les propriétés géotechniques de ces matériaux (teneur en bitume, analyse granulométrique, compacité, résistance mécanique) ;
- d'apprécier l'état hydrique de ces sols ;
- de déterminer la nature et les caractéristiques des sols supports.

2.4. Conclusion

Le diagnostic des données permettant de déterminer les causes les plus probables des dégradations dans les chaussées souples. Ces dégradations sont principalement causées par :

- le trafic (efforts verticaux, efforts tangentiels, dus aux véhicules poids lourds) ;
- l'influence des conditions climatiques (action de l'eau, effet de la température) ;
- les malfaçons (sous-dimensionnement par rapport au trafic et sol support, la répartition inadéquate du liant, la contamination des granulats, l'insuffisance de compactage).

Chapitre 03

Résistance mécanique des chaussées

3.1. Introduction	32
3.2. Résistance mécanique des chaussées.....	32
3.3. Sollicitations des couches de chaussées	32
3.3.1. Actions des véhicules sur les chaussées	33
a. Efforts verticaux.....	33
b. Sollicitations tangentielles	33
c. Efforts de cisaillement	34
d. Actions dynamiques.....	35
e. Les vibrations.....	35
f. Durée d'application des charges.....	35
g. Répétitions des charges.....	35
3.3.2. L'environnement	36
3.4. Causes de rupture des chaussées souples	36
3.4.1. Le trafic	36
3.4.2. Les conditions climatiques	38
3.4.3. Les malfaçons	39
3.4.4. Les accidents et les incidents.....	39
3.5. Charges dynamiques et statiques.....	39
3.6. Mécanique d'un véhicule	40
3.6.1. Type de suspension.....	40
3.6.2. Le pneumatique	41
3.6.3. Types d'essieux	41
3.7. Effet du mouvement de la charge sur la chaussée	42
3.7.1. Evolution de la charge lors du passage d'un véhicule.....	43
3.7.2. Temps de réaction de la chaussée.....	44
3.7.3. Oscillation de charge	44
3.8. Conclusion.....	45

3.1. Introduction

Le passage répété des poids lourds entraîne progressivement l'endommagement dans le temps des structures de chaussée. Ces structures en service, sont soumises à des sollicitations très complexes. La circulation automobile et les conditions climatiques ont une influence sur la durabilité mécanique des matériaux de chaussées.

L'étude du trafic est un élément essentiel au préalable de chaque projet de réalisation ou d'aménagement d'infrastructure routière, elle permet de déterminer le type d'aménagement qui convient et les caractéristiques des voies à créer ainsi que les caractéristiques des chaussées.

Cette étude impactera directement au choix possible pour le développement de réseaux routier, parmi ces choix on peut citer :

- dimensionnement des chaussées en fonction des trafics poids lourds cumulés ;
- géométrie des carrefours ;
- position des échangeurs ;
- choix du tracé par rapport aux zones bâties.

3.2. Résistance mécanique des chaussées

Pour étudier la résistance mécanique d'une chaussée, il faut d'une part connaître la circulation que la route devra supporter, notamment la valeur des plus lourdes charges admises et la fréquence des passages de chaque catégorie de véhicule, tout spécialement des véhicules lourds.

D'autre part, il est indispensable de caractériser de façon aussi précise que possible les qualités du terrain sur lequel la chaussée devra être établie, ces qualités qui conditionnent « la portance » du sol.

Il faut connaître, les risques d'imbibition et de dessiccation auxquels est exposée la chaussée, il faut aussi tenir compte des risques de gel qui, pour certains sols, sont extrêmement grave.

3.3. Sollicitations des couches de chaussées

Sous l'effet des sollicitations externes, les structures de chaussées sont soumises à des phénomènes complexes (les phénomènes mécaniques, thermiques, physiques et chimiques) qui apparaissent souvent de manière couplée.

Les principales sollicitations auxquelles sont soumises les structures routières sont liées aux contraintes imposées par le passage des véhicules (effet du trafic) et aux effets créés par les changements en raison des variations de température (effet thermique).

3.3.1. Actions des véhicules sur les chaussées

Le passage d'un véhicule engendre une déformation en flexion des couches de la structure. Cette flexion entraîne des sollicitations en compression et en traction à la base des couches d'enrobé. Pour cela, la surface de chaussée doit résister à un certain nombre de sollicitation.

a. Efforts verticaux

Les véhicules exercent sur la chaussée une contrainte verticale, la charge maximale de référence sur un jumelage isolé est de 6,6 Tonnes, soit un essieu standard de 13 Tonnes. La chaussée a pour rôle de répartir ces efforts pour éviter des désordres structurels au sol support. (Emmanuel Mengue, 2015).

Les compressions répétées sous le passage de la charge peuvent créer des déformations permanentes à la surface de la chaussée (Figure 3.1), imputables au tassement des couches de béton ou aux déformations des couches inférieures non traitées.

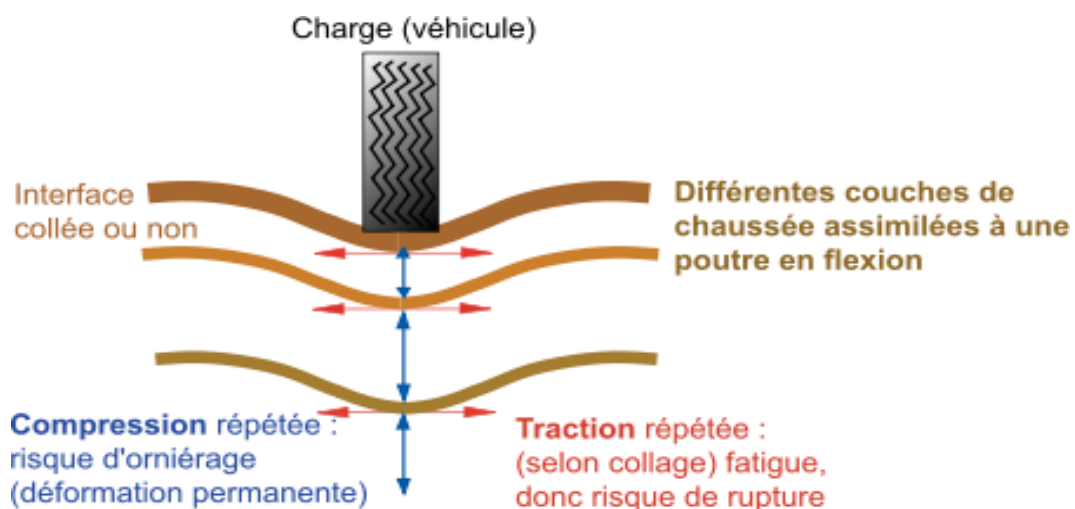


Figure 3.1. Fonctionnement d'une structure de chaussée sous l'application d'une charge roulante

b. Sollicitations tangentielles

Un véhicule en mouvement génère des contraintes tangentielles (latérales et longitudinales), imputables à :

- la transmission de l'effort moteur ou du freinage ;
- la mise en rotation des roues non motrices ;

- la résistance aux efforts transversaux.

Des efforts parasites sont dus à l'élasticité du pneumatique, et notamment aux causes suivantes :

- du fait de l'aplatissement de celui-ci, le rayon de roulement (rayon fictif d'une roue circulaire qui roulerait avec la même vitesse angulaire) et à la fois inférieur au rayon de la roue à vide et supérieur à la hauteur de l'essieu au-dessus de la chaussée ; (Meziani, 2008) ;
- si un effort sollicite transversalement le véhicule (vent, dévers, bombement, etc.), il se produit le phénomène de survirage ou dérive des pneumatiques. (Coquand, 1985)

Tous ces phénomènes s'accompagnent de frottements qui usent les pneus et les routes.

Ces contraintes génèrent des efforts de traction à la base des couches liées (Figure 3.2), qui créent les micros dégradations qui s'accumulent et peuvent entraîner la ruine du matériau. Il s'agit du phénomène de fatigue qui s'observe pour de nombreux matériaux.

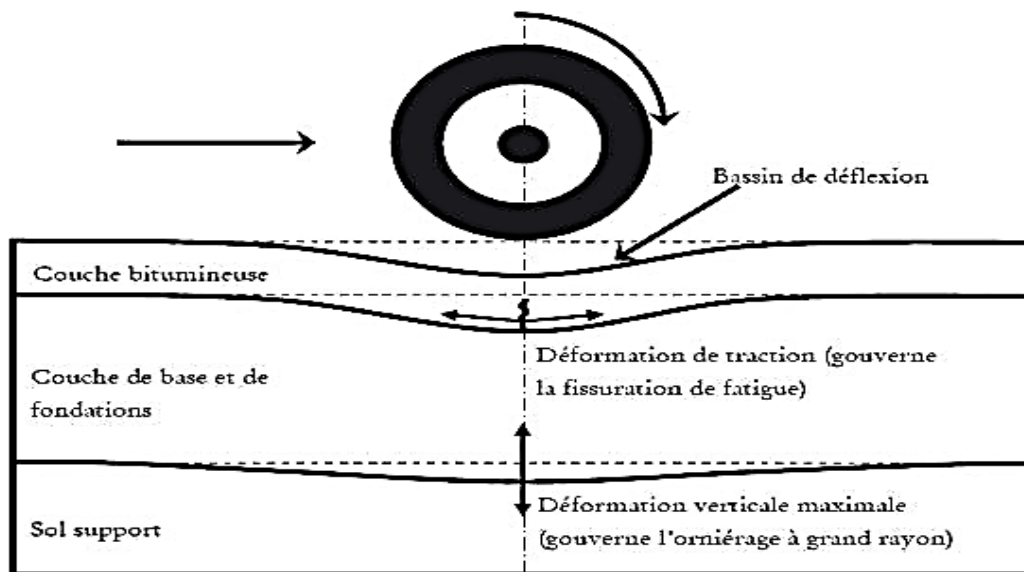


Figure 3.2. Fonctionnement d'une chaussée sous sollicitations liées au trafic

c. Efforts de cisaillement

Le passage d'un véhicule sur une chaussée provoque parfois le cisaillement de la dernière (cisaillement vertical et cisaillement horizontal).

- **Cisaillement vertical** : le cisaillement vertical d'une chaussée rencontré au sein des structures réalisées à base de dalles de béton existantes, assainies avec une couche d'enrobé bitumineux.

- **Cisaillement horizontal** : le cisaillement horizontal d'une chaussée est lié à des contraintes internes aux couches inférieures de la structure. Ce mode reste peu fréquent.

d. Actions dynamiques

Le véhicule automobile comporte une infrastructure (essieux) sur laquelle repose, par l'intermédiaire d'organe de suspension, le cadre rigide qui porte le moteur, la carrosserie, etc.

Les organes de suspension sont des ressorts qui se déforment sous l'action des forces statiques et surtout des actions dynamiques corrélatives au franchissement des obstacles.

Lorsque le mouvement régulier d'une roue est modifié par la rencontre d'un obstacle ou d'une dénivellation, cette roue se trouve instantanément surchargée ou déchargée du fait de l'élasticité du pneumatique, des oscillations se produisent engendrant une série de surcharges positives ou négatives avec des valeurs maximales pouvant atteindre 1.5 à 1.8 fois la charge statique. (Coquand, 1978).

e. Les vibrations

Le passage du trafic (poids lourds) sur les chaussées provoque des vibrations, ces vibrations ont une période propre à la section de la route (nature, épaisseur).

L'intensité de ces vibrations est en fonction de la nature des roues et de la surface de chaussée (nature du revêtement).

f. Durée d'application des charges

Les charges des véhicules appliquées sur les chaussées sont très variables avec la durée pendant laquelle elles s'exercent, et les déformations (plastique ou élastique) de la chaussée dépendant aussi de cette durée.

La déformation des liants hydrocarbonés sous des sollicitations de courte durée est presque négligeable.

g. Répétitions des charges

La répétition des charges du trafic (généralement les poids lourds) influence sur la résistance des chaussées.

La valeur maximale des charges appliquées sur les chaussées n'est pas la seule qui influence sur la résistance de cette dernière, il y a aussi la répétition des charges (nombre d'application des charges) et surtout les poids lourds.

La chaussée doit supporter les efforts verticaux, qui peuvent être supérieurs à la charge normale des roues et les efforts tangentiels de toutes natures.

La chaussée doit rester rugueuse pour permettre une bonne adhérence.

3.3.2. L'environnement

Si le champ de température est en général découplé des actions mécaniques, les champs de contraintes et déformations sont fortement dépendant de la température.

La température à deux efforts mécanique principaux :

- à basse température, le bitume possède un comportement fragile. Sous l'effet des conditions climatiques, l'enrobé est susceptible de se fissurer. L'utilisation d'un grave bitume de grade élevé permet d'éviter la fissuration. Néanmoins, un bitume de grade trop élevé devient (mou) à température élevée, l'enrobé rencontre alors des problèmes d'orniérage ;
- le deuxième effet mécanique principal de la température se manifeste lors des changements de température par la création de contraintes et de déformations au sein du matériau en raison des dilatations-contractions thermiques.

3.4. Causes de rupture des chaussées souples

Une chaussée souple bien dimensionnée devrait diminuer énormément les pressions au niveau du sol de fondation. D'autre part il faut que les matériaux de chaque couche soient aptes à encaisser les efforts qui les sollicitent.

La rupture d'une chaussée souple fait intervenir les quatre facteurs suivants :

- le trafic ;
- les conditions climatiques ;
- les malfaçons ;
- les accidents et les incidents.

3.4.1. Le trafic

Le trafic est un élément essentiel du dimensionnement de la chaussée. Le poids des véhicules est transmis au sol par l'intermédiaire des pneumatiques sous forme d'une pression.

Les matériaux situés sous les roues subissent des efforts très différents lors du passage d'un véhicule léger ou d'un véhicule lourd. Seul ce dernier est pris en compte pour déterminer les classes de trafic. (Joseph Abdo, 2009)

➤ **Les différentes classes de trafic**

Les classes de trafic sont définies par le trafic moyen journalier des poids lourds qui circulent sur la chaussée.

Tableau 3.1. Classes de trafic en fonction des poids lourds qui circulent

Catégories des routes	Les classes de trafic	Poids lourds qui circulent
Les Voiries à faible trafic	Classe T6	de 0 à 10PL/j
	Classe T5	de 10 à 25 PL/j
	Classe T4	de 25 à 50 PL/j
Les Voiries à moyen trafic	Classe T3-	de 50 à 100 PL/j
	Classe T3+	de 100 à 150 PL/j
	Classe T3	de 50 à 150 PL/j
Les Voiries à fort trafic	Classe T2	de 150 à 300 PL/j
	Classe T1	de 300 à 750 PL/j
	Classe T0	de 750 à 2000 PL/j

➤ **Effet du passage du trafic sur les chaussées**

L'action répétée du passage de trafic sur la chaussée fait apparaître quatre types de dommages :

- une usure superficielle de la couche de roulement due aux efforts tangentiels ;
- la formation d'ornières par fluage des couches liées, sous l'effet des contraintes verticales et des efforts tangentiels ;
- une fatigue des couches, provoquée par leur flexion sous l'effet des charges ;
- une accumulation des déformations permanentes au niveau du support ou des couches non liées.

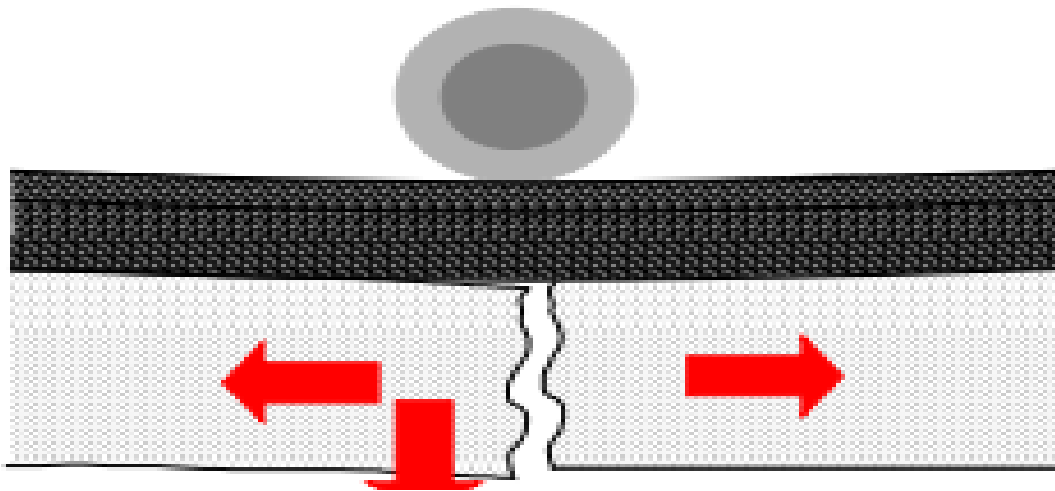


Figure 3.3. Passage d'une charge roulante

3.4.2. Les conditions climatiques

Le paramètre le plus nuisible sur le corps de chaussée est la présence de l'eau. L'eau pénètre dans le corps de chaussée par infiltration, percolation ou remontée.

La teneur en eau d'un sol si elle est trop élevée peut provoquer des désordres importants en modifiant la portance ou en favorisant l'attrition de certains granulats comme les latérites. En effet, l'eau peut s'interposer entre les granulats et les liants lorsque la qualité du collage entre eux n'est pas suffisante.

De même, les variations des températures et dans une moindre mesure, l'action du soleil accélèrent le vieillissement des bitumes et celui des chaussées.

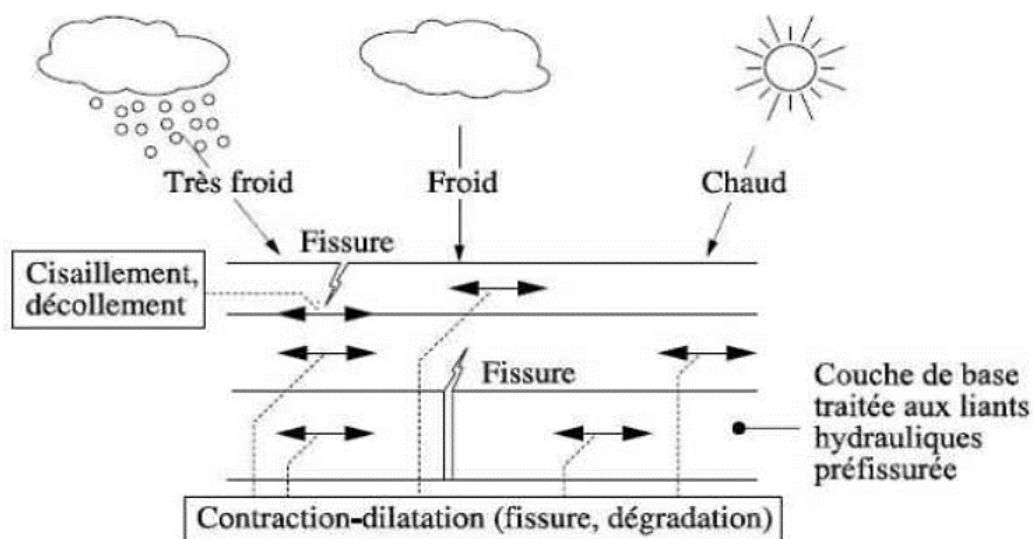


Figure 3.4. Mouvement sous variation thermique

3.4.3. Les malfaçons

Les malfaçons d'origines diverses lors de la construction (mauvais matériaux, mise en œuvre, épaisseur insuffisante, etc...) et également les tranchées exécutées ultérieurement sont causes de désordre.

La qualité des matériaux joue un rôle important dans la résistance d'une chaussée. Elle est fonction de sa dureté, de sa granulométrie, de son pourcentage de fine et de sa propreté.

Quant à la mise en œuvre, le critère prépondérant est le compactage. En effet, il faut que l'indice des vides soit faible, pour éviter les tassements sous l'effet du trafic.

Suite au développement des transports routiers, les essieux des poids lourds de nos jours sont de plus en plus agressifs, c'est pourquoi les erreurs de sous dimensionnement sont impardonnables.

3.4.4. Les accidents et les incidents

La rupture d'une chaussée peut être causée suite à des accidents de circulation ou des utilisations anormales du domaine public.

3.5. Charges dynamiques et statiques

Lors de la conception d'une route, le calcul réalisé pour le choix de matériau et l'épaisseur des couches de la chaussée utilise généralement l'hypothèse que les véhicules appliquent une charge statique verticale. Dans la réalité, les charges verticales à l'essieu du véhicule sont constituées d'une composante statique et d'une composante dynamique.

La première résulte de la distribution de la masse du véhicule sur les essieux du véhicule, tandis que la composante dynamique est induite par irrégularité de la chaussée qui soumet le véhicule à des oscillations verticales et qui dépend du profil de la route, des caractéristiques du véhicule, la suspension des pneus et de sa vitesse.

Le passage d'un véhicule sur une irrégularité de chaussée engendre trois principaux types de forces dynamiques (Figure 3.5).

- les forces d'impact des différentes parties de la bande de roulement ;
- les forces d'impact liées à la masse non suspendue du véhicule (les essieux, les roues et les pneus) ;
- les forces d'impact liées à la fréquence fondamentale du véhicule.

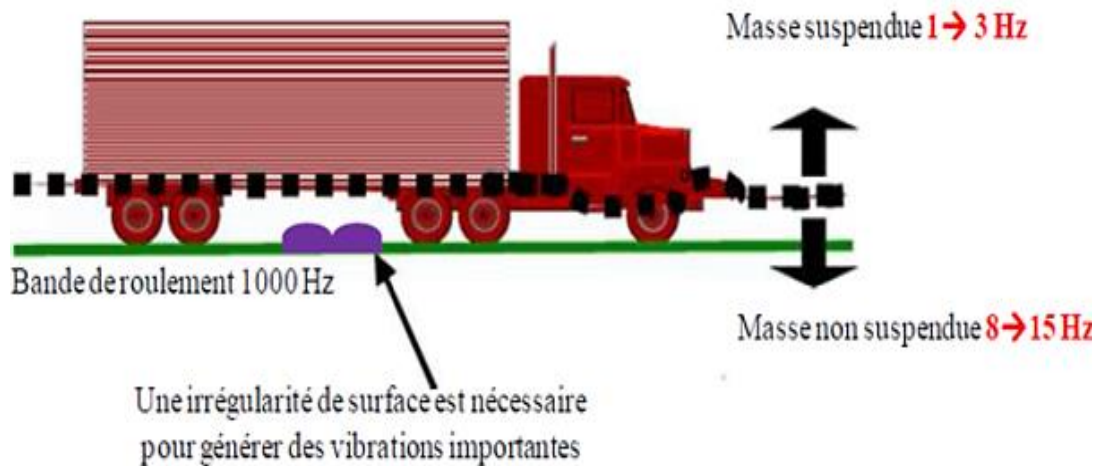


Figure 3.5. Composante du véhicule et contenu fréquentiel des vibrations induites (Fahimi Jida).

3.6. Mécanique d'un véhicule

Il est important de savoir que la force réelle sur la route n'est pas égale à la charge statique à l'essieu, mais varie en raison de la dynamique du véhicule et que plusieurs aspects de la mécanique d'un véhicule ont un impact sur cette charge dynamique. Plusieurs études ont été effectuées pour optimiser les caractéristiques d'un véhicule « road-friendly » afin de diminuer la force appliquée sur les structures de la chaussée. Les paramètres basiques qui ont fait un objet de différentes études sont le type de suspension, la charge des essieux et le type de liaison entre eux ainsi que le type de pneu.

3.6.1. Type de suspension

Les infrastructures routières sont principalement dimensionnées en fonction du trafic de poids lourds, donc les performances des systèmes de suspension équipant les véhicules sont déterminantes dans l'évaluation de cet impact. Les constructeurs améliorent les performances des véhicules depuis plusieurs décennies, notamment sur les techniques de suspension, les détériorations subies par les chaussées suite au passage d'un poids lourd se sont atténuées. L'intervention du politique dans le champ technique a contribué à cette amélioration.

Les suspensions d'un véhicule sont les éléments permettant de relier les masses non suspendues (typiquement la roue, les pièces d'entraînement de roue, souvent les systèmes de freinage, etc.) aux masses suspendues (typiquement le châssis, le moteur et tous les composants du véhicule fixés au châssis).

Une différence de la charge dynamique est observée en modifiant le type de suspension ainsi que ses paramètres. En général, la charge dynamique augmente avec la raideur du ressort et elle est sensible au facteur d'amortissement.

3.6.2. Le pneumatique

Le pneumatique est l'objet de perfectionnements continus afin de répondre à différentes fonctions principales (supporter toute la charge du véhicule, assurer le comportement du véhicule aux ordres du conducteur, réduire le bruit et les vibrations, etc.). Malgré les différents modèles de pneumatique, leur constitution reste relativement la même (Figure 3.6).

Selon Cebon, les pneus sont également décrits par un système de ressort-amortisseur. La taille de l'empreinte du pneu varie entre 0.1 et 0.35m ; le contact entre le pneu et la chaussée peut être ainsi considéré comme un point de contact.

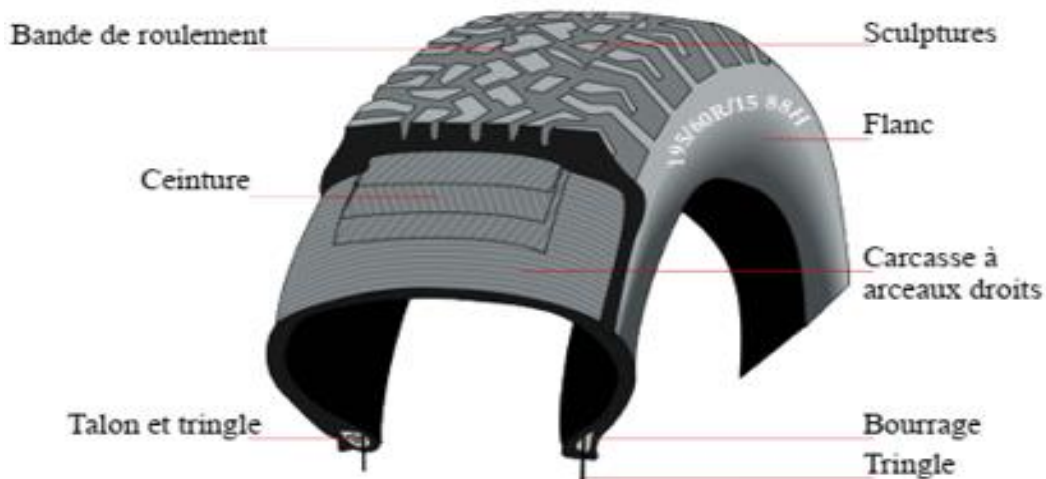

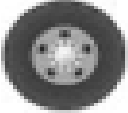
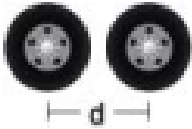



Figure 3.6. Constitution d'un pneumatique (Michelin (2002))

3.6.3. Types d'essieux

Selon leur disposition, les essieux sont dits simples, tandem ou tridem. Un essieu simple est un ensemble de roues disposées symétriquement sur un même axe transversal du véhicule. Tandis qu'un système de deux essieux distants de 1.3 à 1.8m s'appelle un tandem. Enfin, un ensemble de trois essieux est un tridem. Il est généralement conclu que pour les dommages des chaussées flexible, les groupes tandem peuvent transporter plus de poids que le même nombre d'essieux simples largement espacés, car les surfaces d'intervention des essieux proches se chevauchent (Cebon, 1999).

Tableau 3.2. Les catégories d'essieux et charges de référence poids lourds

Catégorie d'essieux	Charge maximale prévu par le règlement
Essieu avant	
Un essieu avant 	90 KN
Essieux arrière	
Essieu simple 	190 KN
Tandem  $d \geq 1,2m$	140 KN
Trois essieux 	120 KN

3.7. Effet du mouvement de la charge sur la chaussée

La (Figure 3.7) représente de façon simplifiée la distribution des charges et le type de contrainte développée dans une structure de chaussée au passage d'un véhicule.

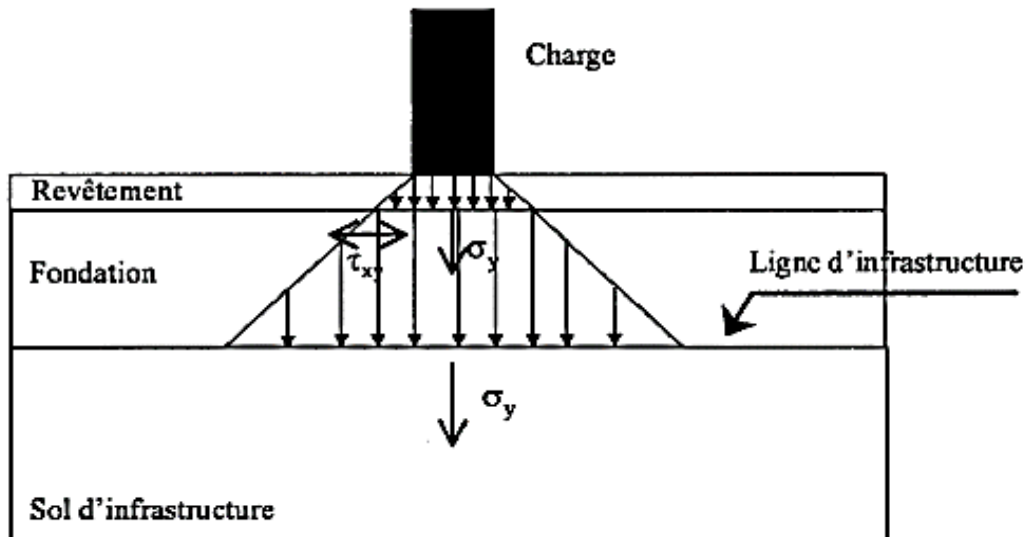


Figure 3.7. Distribution des charges et développement des contraintes verticales et de cisaillement

Doré et al, regroupent la charge appliquée par un véhicule en mouvement en trois catégories :

- l'évolution de la contrainte auquel la chaussée est soumise relativement à la position de la roue ;
- la vitesse de réponse des matériaux en fonction du temps ;
- les contraintes induites par l'oscillation de la roue sur son système de suspension.

3.7.1. Evolution de la charge lors du passage d'un véhicule

La (Figure 3.8) représente l'évolution de la contrainte en un point de la chaussée par rapport à la position de la roue se déplaçant sur la chaussée. En approchant d'un point donné, les contraintes (σ_1 et σ_3) augmentent jusqu'à ce que la roue soit au-dessus du point considéré et diminuent en s'éloignant de celui-ci. Une contrainte de cisaillement est générée qui augmente aussi en approchant du point considéré et s'annule au moment où la roue est au-dessus de celui-ci. Cette contrainte est renversée quand la charge s'éloigne du point fixé. Ce phénomène est appelé rotation des contraintes.

Au niveau de la couche de revêtement, la roue, en approchant du point donné, va d'abord provoquer des contraintes de compression suivies d'une forte augmentation de la contrainte de traction. La valeur maximale de la contrainte de traction se produit lorsque la charge est à la verticale du point considéré.

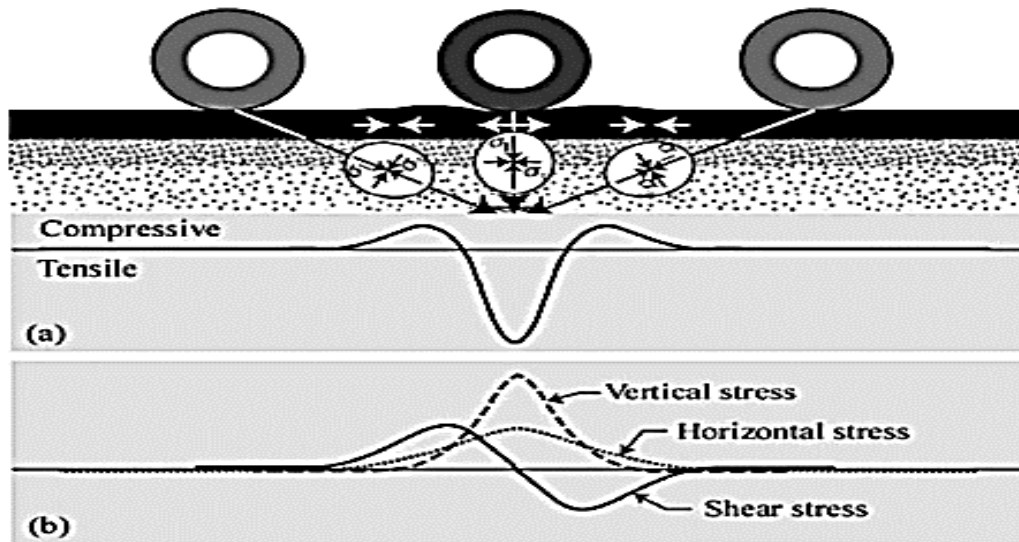


Figure 3.8. Évolution de la contrainte en un point par rapport à la position de la roue (Fahimi Jida).

3.7.2. Temps de réaction de la chaussée

Lors du passage d'un véhicule, les structures de la chaussée se déforment. Deux modèles sont utilisés pour clarifier le comportement des matériaux de la chaussée en se basant sur la théorie d'élasticité : viscoélastique ou visco-élastoplastique. Le passage d'un véhicule provoque des déformations instantanées importantes. L'enrobé prend un certain temps pour revenir à son état initial lorsque la charge est retirée.

Les déformations de la chaussée dépendent de la vitesse du véhicule, qui est en fonction du comportement visqueux du liant bitumineux qui rend la couche d'enrobé sensible à la température et à la fréquence d'application de charge.

3.7.3. Oscillation de charge

Les interactions dynamiques des véhicules avec les chaussées relativement mauvais génèrent des oscillations de la roue. Comme il a été mentionné précédemment, l'amplitude des oscillations verticales des roues et des charges dynamiques transmises à la chaussée est, en fonction des dimensions des véhicules, des charges par essieux ainsi que les types de suspensions. (Figure 3.9)

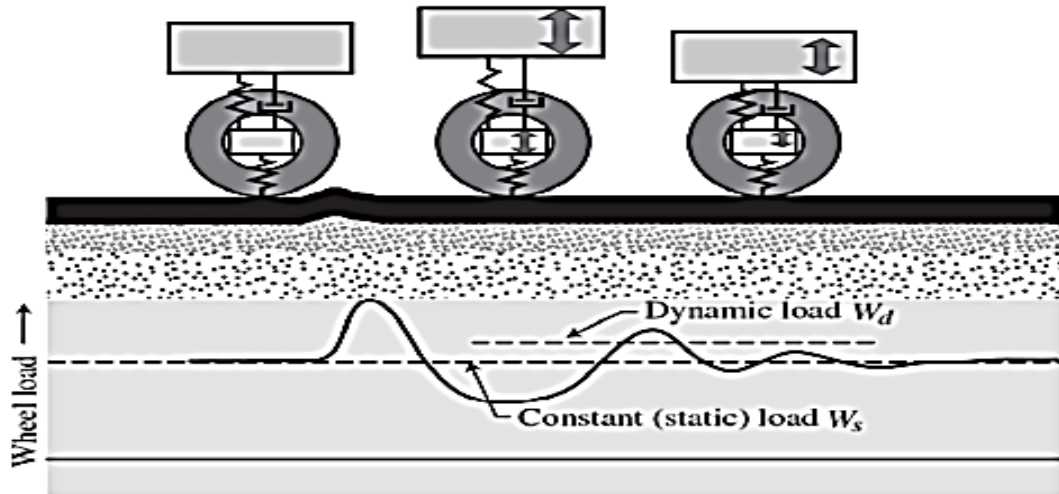


Figure 3.9. Oscillation d'une roue due une chaussée non uniforme (Fahimi Jida).

3.8. Conclusion

La conception des structures de la chaussée et le développement des matériaux routiers utilisés sont fondés sur l'hypothèse que le chargement des véhicules lourds est statique. Or, lorsqu'un véhicule est en mouvement sur un profil de route imparfait, il se produit une oscillation du châssis dans l'axe vertical due à la réaction du système de suspension aux imperfections de la surface de la chaussée. Cette oscillation induit un chargement dynamique à l'interface entre les pneus et le revêtement, ce niveau de chargement pouvant significativement dépassé le niveau de chargement constant associé au transfert du poids du véhicule chargé à chaque essieu.

La charge dynamique d'un véhicule lourd est en fonction de la vitesse de circulation du véhicule, des caractéristiques de sa suspension, de la configuration des essieux et de la pression des pneus.

Chapitre 04

Présentation du logiciel « PLAXIS »

4.1. Introduction	46
4.2. Présentation du logiciel (PLAXIS).....	46
4.3. Les sous programmes de Plaxis.....	47
4.3.1. Le programme d'entrée de données (Input).....	47
4.3.2. Le programme de calcul	47
4.3.3. Le programme des résultats (Output)	48
4.3.4. Le programme courbe (Curves).....	50
4.4. Etapes de modélisation	50
4.4.1 La géométrie	50
4.4.2. Les conditions aux limites	51
4.4.3. Définition des paramètres des matériaux.....	51
4.4.4. Le maillage	51
4.4.5. Les conditions initiales	51
4.4.6. Phase de calcul.....	52
4.4.7. Visualisation des résultats	52
4.5. Les modèles de comportement utilisés dans « PLAXIS ».....	54
4.5.1. Modèle élastique linéaire	54
4.5.2. Modèle de Mohr-Coulomb	54
4.5.3. Modèle pour les sols mous « Soft Soil Model »	56
4.5.4. Modèle de sol avec écrouissage « Hardening Soil Model »	56
4.5.5. Modèle pour les sols mous avec fluage « Soft Soil Creep Model »	57
4.5.6. Modèle pour les roches fracturées « Jointed Rock Model »	57
4.6. Conclusion	57

4.1. Introduction

L'analyse de projets géotechniques est possible grâce à de nombreux codes de calcul en éléments finis. L'ingénieur ayant de l'expérience en ce domaine sait que, le poids des hypothèses permettant le passage de la réalité au modèle est difficile à évaluer. Il sait que le jargon éléments finis est parfois rebutant-il souhaiterait ne pas avoir à intervenir sur la numérotation des nœuds, des éléments, sur certains choix réservés au numéricien. Il voudrait disposer du code sur le PC gérant sa bureautique et sa technique quotidiennes, afin de faire une étude paramétrique des problèmes délicats. Il exige avant tout que ses journées ne soient pas encombrées par de laborieuses entrées de données et interprétations de fichiers. Conçu par des géotechniciens numériciens, le code éléments finis : Plaxis 2D.

Le logiciel Plaxis bidimensionnel de géotechnique a été développé en premier lieu à l'université technique de Delft (Pays bas) en 1987, pour analyser initialement les digues en sols mous (argileux).

Au cours des années PLAXIS a été étendu à la plupart des autres domaines de l'ingénierie géotechnique. En 1998, la première version du PLAXIS a été publiée pour Windows, elle peut résoudre des différents problèmes comme les fondations superficielles, les soutènements, les remblais et les excavations. Durant la même période une version 3D du logiciel a été développée. Après quelques années de développement le logiciel 3D PLAXIS Tunnel program est sorti en 2001.

4.2. Présentation du logiciel (PLAXIS)

Plaxis est un programme d'éléments finis en deux dimensions ou en trois dimensions spécialement conçu pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour différents types d'applications géotechniques. Les situations réelles peuvent être représentées par un modèle plan ou axisymétrique. Le programme utilise une interface graphique pratique permettant aux utilisateurs de générer rapidement un modèle géométrique et un maillage d'éléments finis basés sur la coupe verticale de l'ouvrage à étudier

L'algorithme général du code Plaxis consiste à résoudre un système d'équations algébriques non linéaire selon un processus itératif pour déterminer les champs de déplacements aux différents nœuds du maillage, les champs contraintes et les états de rupture du sol.

4.3. Les sous programmes de Plaxis

L'interface d'utilisation du logiciel Plaxis se compose de quatre sous programmes (Input, calculs, output, Curves).

4.3.1. Le programme d'entrée de données (Input)

Ce programme contient des options nécessaires à la création et à la modification d'un modèle géométrique. Pour réaliser une analyse d'une structure avec PLAXIS, il faut d'abord créer un modèle numérique et spécifier les propriétés des matériaux et les conditions aux limites. (Brinkgreave, 2003) (Figure 4.1)

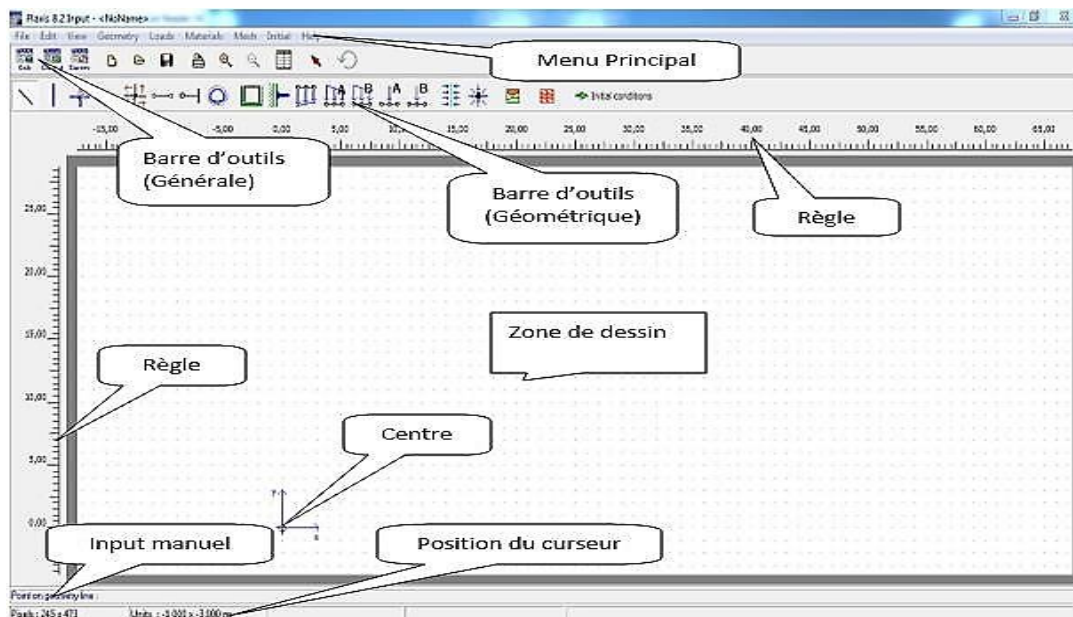


Figure 4.1. Fenêtre principale du programme d'entrée des données

4.3.2. Le programme de calcul

Après la définition d'un modèle aux éléments finis, des calculs peuvent être effectués à l'aide du sous-programme de calcul. Il est nécessaire de définir le type des calculs à réaliser ainsi que le cas de chargement.

Le programme de calcul ne traite que l'analyse des déformations et permet de réaliser un calcul plastique, une analyse de consolidation, un calcul de coefficient de sécurité et un calcul dynamique.

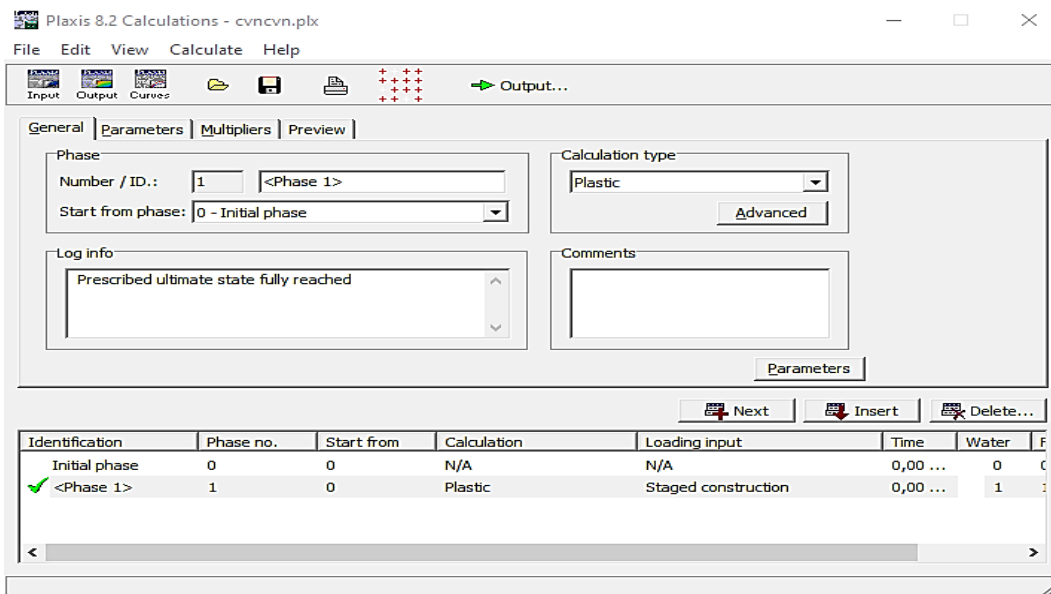


Figure 4.2. Fenêtre principale du programme de calcul

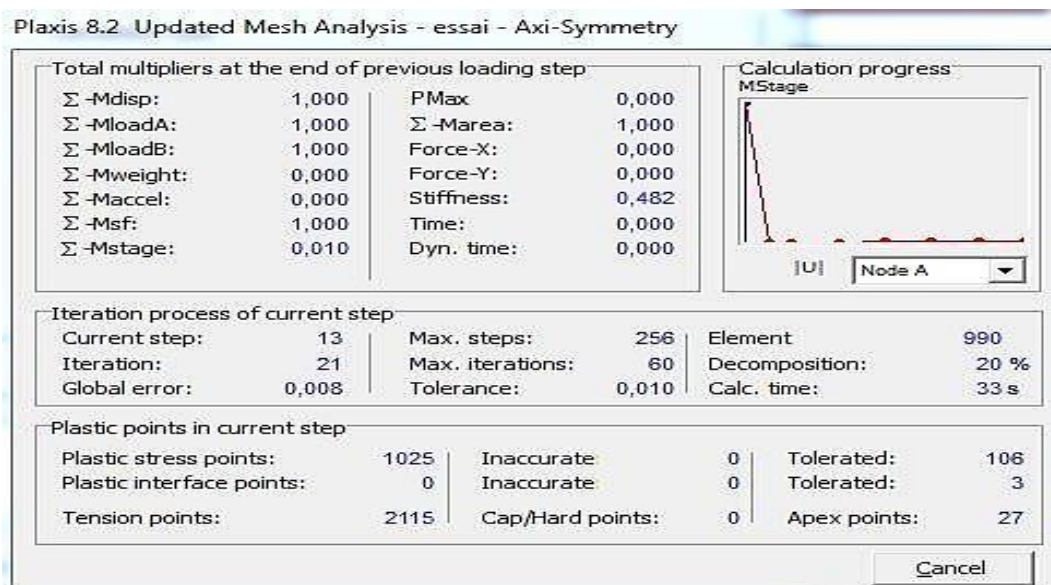


Figure 4.3. Fenêtre de calcul

4.3.3. Le programme des résultats (Output)

Le sous-programme Output permet de voir les résultats des données générées et des calculs d'éléments finis. Les principaux résultats d'un calcul d'éléments finis sont les contraintes et les déformations (Figure 4.4).

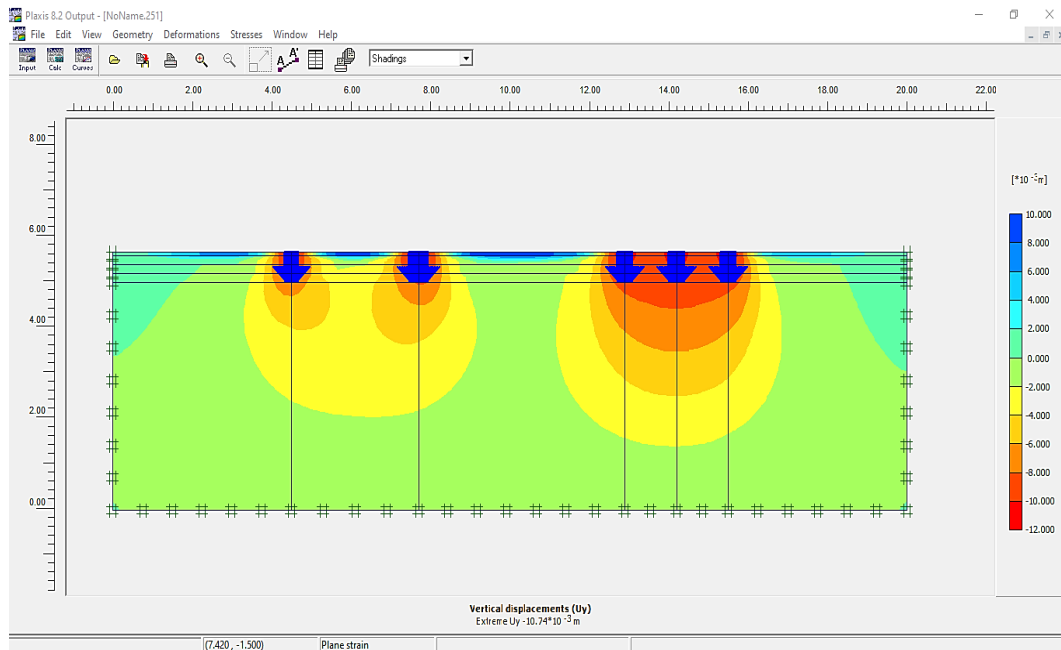


Figure 4.4. La fenêtre principale du programme des résultats

a. Les contraintes

Le programme présente les différentes options pour voir l'état de contrainte d'un modèle d'éléments finis. (Brinkgreave, 2003)

- Les contraintes effectives sont développées dans la géométrie relative aux calculs en cours, elles sont affichées sur une présentation de la géométrie non déformée.
- Les contraintes totales sont les contraintes effectives auxquelles on ajoute les pressions interstitielles.

b. Les déformations

Pour ce qui concerne les déformations, plusieurs options peuvent être présentées.

- **Le maillage déformé** : c'est la présentation du maillage d'éléments finis dans leurs formes déformées, superposé à une représentation de la géométrie non déformée.
- Les déplacements totaux sont les déplacements au niveau de tous les nœuds à la fin de calcul. Il est possible aussi de voir séparément les déplacements verticaux (tassement) et les déplacements horizontaux.
- **Les déformations totales** : ce sont des déformations obtenues à la fin du calcul, elles sont affichées sur une représentation de la géométrie.

4.3.4. Le programme courbe (Curves)

La fenêtre (curves) est utilisée pour visualiser les courbes charges-déplacements, contraintes-déformations et les chemins de contrainte ou de déformation pour les différents points choisis dans la géométrie.

- **Courbes charges-déplacement** : elles permettent de visualiser la relation entre la charge appliquée et le déplacement résultant.
- **Courbes contraintes-déformations** : elles permettent de visualiser le comportement contrainte-déformations dans le sol.
- **Chemin de contrainte et chemin de déplacement** : il représente la manière dont se développe l'état de contraintes en un point dans la géométrie, de la même manière, un chemin de déformations représente l'évolution des déformations.

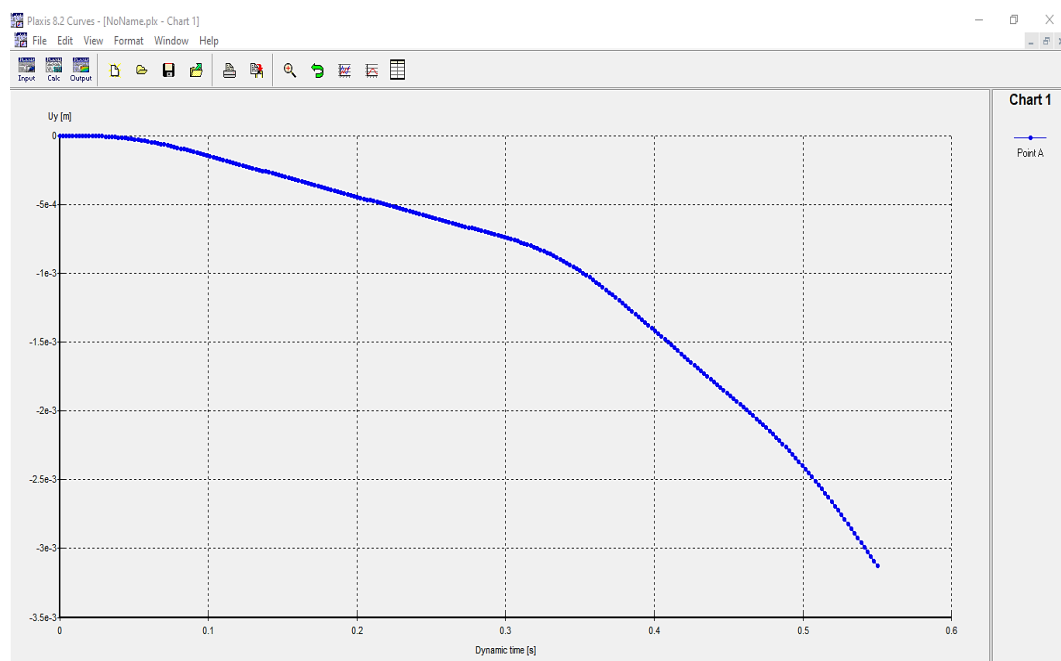


Figure 4.5. Interface graphique curves

4.4. Etapes de modélisation

La modélisation avec Plaxis passe par plusieurs étapes :

4.4.1 La géométrie

C'est la première étape, plusieurs propriétés sont disponibles :

- les lignes géométriques qui sont là pour dessiner les surfaces du sol ;
- les « plates » permettent de dessiner les structures qui possèdent une résistance en traction, en compression et en flexion ;
- « Anchor » sert à modéliser les liaisons entre les éléments ;
- « Tunnel » permet de modéliser un tunnel prenant en compte les facteurs qui concernent ce type d'ouvrage.

4.4.2. Les conditions aux limites

Après la définition de la géométrie, il faut entrer les conditions aux limites, c'est-à-dire les déplacements et les contraintes imposées aux limites extérieures de la géométrie.

Si aucune condition au limite n'est fixée, Plaxis par défaut considère que le sol n'est soumis à aucune force extérieure, donc il est libre de se déplacer dans toutes les directions.

4.4.3. Définition des paramètres des matériaux

Après les conditions aux limites, il convient de définir les différentes propriétés des matériaux selon son type de sol, le modèle de comportement et les différents paramètres permettant de le définir. Pour les sols, en plus de la définition des caractéristiques mécaniques, leurs interfaces avec les autres types d'éléments peuvent être paramétrés, il faut également définir le comportement hydraulique du sol (drainer, non drainer ou non-poreux).

4.4.4. Le maillage

Plaxis génère le maillage automatiquement, l'opérateur peut paramétrer la finesse du maillage entre différentes options (très grossier, moyen, fin, très fin), l'opérateur peut également décider de mailler plus finement une certaine région du sol ou le voisinage d'un élément grâce aux options refine dans le mesh menu.

4.4.5. Les conditions initiales

La définition des conditions initiales se fait en deux étapes distinctes. Tout d'abord, lorsque la fenêtre des conditions initiales s'ouvre, seul le sol est activé.

L'opérateur active les éléments constructifs (déplacements, et/ou contraintes, ancrage, plaques...) qui correspondent à l'instant initial. Il désactive les éléments de sol qui ne correspondent pas à cet instant initial. (Brinkgreave, 2003)

Un bouton d'allumage permet d'accéder à deux fenêtres différentes chacune représentant la géométrie de la modélisation :

- la première qui s'appelle « initiale pore pressure », permet de définir un niveau de nappe phréatique initial (si besoin), et de générer les pressions interstitielles correspondantes ;
- la deuxième fenêtre permet de générer les conditions initiales à l'intérieur du massif (poids propre et sous pression).

4.4.6. Phase de calcul

Après avoir entré tous les paramètres, on peut accéder aux calculs en cliquant sur le bouton « calculate ». Une nouvelle interface de calcul s'affiche. Une phase 0 est déjà calculée, cette phase correspond à l'état initial de la structure. Cette interface permet de définir le phasage de la modélisation de la construction.

De nouvelles phases de calcul peuvent être créées basées sur une phase existante. On peut donc effectuer des changements uniquement en activant ou désactivant des éléments (niveau de la nappe, propriétés de matériaux,...).

Les courbes de résultats de Plaxis seront calculées en ces points. Après avoir appuyé sur « calculate » les calculs se lancent. Une fois terminée, les résultats sont visibles grâce à la touche « output ».

4.4.7. Visualisation des résultats

Plaxis contient plusieurs outils pour visualiser et analyser les résultats concernant le sol soit en déformations (maillage déformé, déplacements et déformations totaux) soit en contraintes (contraintes effectives, contraintes totales, les points plastiques, les pressions interstitielles).

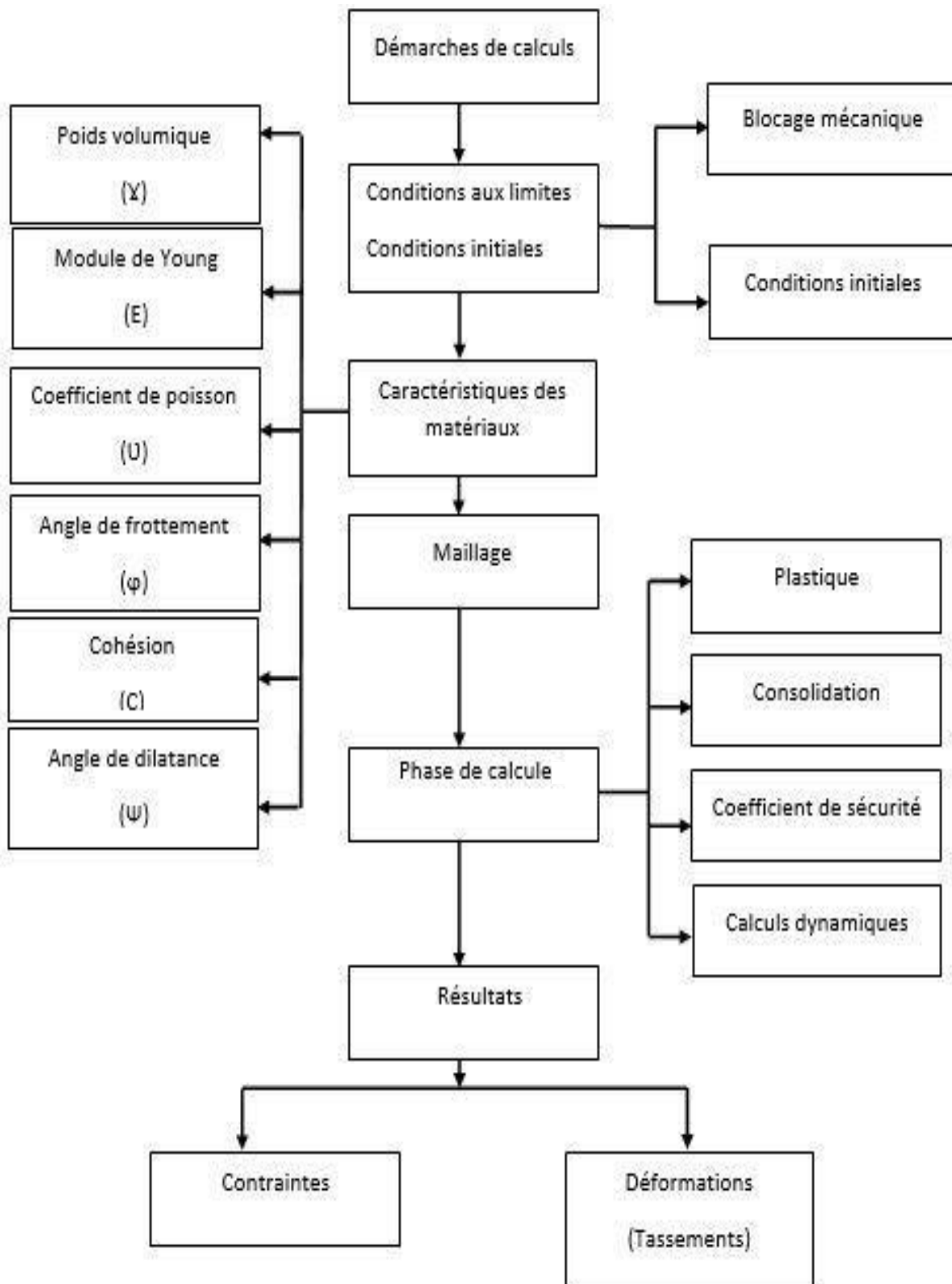


Figure 4.6. Organigramme de modélisation avec PLAXIS

4.5. Les modèles de comportement utilisés dans « PLAXIS »

4.5.1. Modèle élastique linéaire

Le modèle élastique linéaire utilisé dans Plaxis est classique, il comporte deux paramètres de rigidité élastiques, le module de Young E , et le coefficient de poisson ν . le modèle linéaire élastique est très limité pour simuler le comportement d'un sol, il peut être employé surtout pour modéliser les éléments de structure béton ou métal en interaction avec le sol et aussi pour les problèmes de mécanique des roches. (Koiter, 1960)

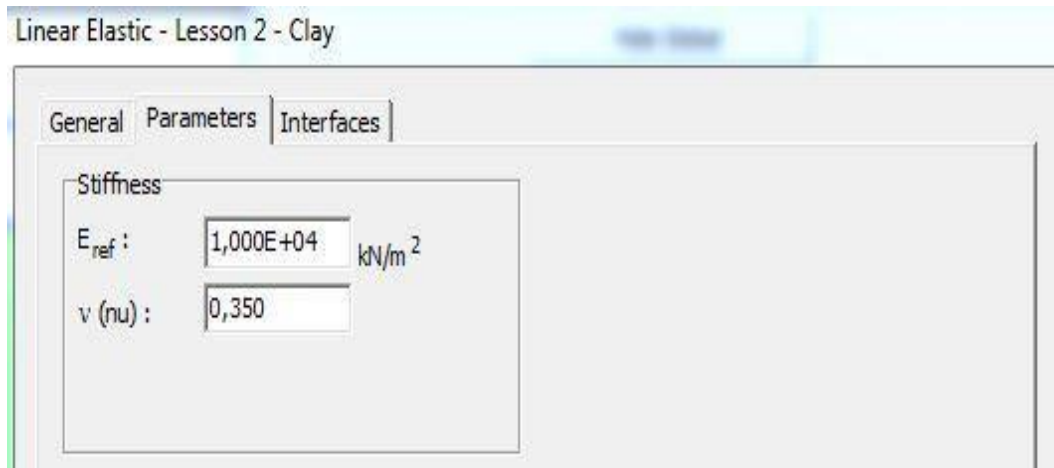


Figure 4.7. Fenêtre des paramètres des modèles élastique linéaire

4.5.2. Modèle de Mohr-Coulomb

Ce modèle est utilisé généralement pour une première approximation du comportement d'un sol. C'est un modèle élastique parfaitement plastique (sans écrouissage) nécessite la détermination de cinq paramètres qui sont : le module de Young E , coefficient de poisson μ , la cohésion C , l'angle de frottement φ , l'angle de dilatance ψ .

Les deux premiers (E , ν) sont des paramètres intrinsèques élastiques, les deux autres (φ , C) sont des caractéristiques mécaniques de résistance. L'angle de dilatance ψ est un paramètre relatif à la règle d'écoulement plastique. (Lamri, 2008)

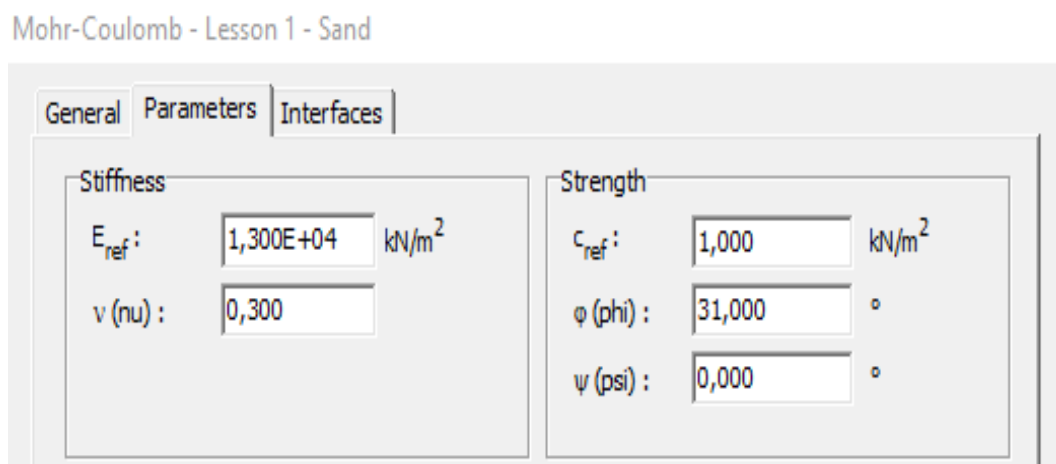


Figure 4.8. Fenêtre des paramètres du modèle de Mohr-Coulomb

Tableau 4.1. Les paramètres intégrés dans le modèle de Mohr-Coulomb.

Paramètres	Module de Young	Coefficient de poisson	cohésion	L'angle de frottement	L'angle de dilatance	Poids volumique
Symboles	E	μ	C	φ	ψ	γ
Unités	KN/m ²	/	KN/m ²	degré	degré	KN/m ³

A. Le module de Young « E »

PLAXIS utilise le module de Young comme module de déformation de référence dans le modèle élastique et le modèle de Mohr-Coulomb. Ce module varie en fonction de la déformation et de la contrainte moyenne. Dans le module de Mohr-Coulomb, le module de Young est constant.

B. Coefficient de poisson « ν »

On conseille une valeur de 0.2 à 0.4 pour le coefficient de poisson. Celle-ci est réaliste pour l'application du poids propre (procédure K_0 ou chargement gravitaires). Pour certains problèmes, notamment en décharge, on peut utiliser des valeurs plus faibles. Pour des sols incompressibles, le coefficient de poisson s'approche de 0.5 sans cette valeur soit utilisable.

C. L'angle de frottement « φ »

L'angle de frottement est constant. Il est indépendant de la contrainte moyenne. Il peut être celui de frottement de pic ou celui de frottement du palier.

Le temps de calcul varie exponentiellement avec l'angle de frottement. Par conséquent, les angles de frottement élevés devraient être évités lors des calculs préliminaires pour un projet. Le temps de calcul deviendra important si des angles de frottement supérieurs à 35 degrés sont utilisés.

D. La cohésion « C »

Plaxis peut manipuler des sables sans cohésion, mais certaines options ne fonctionneront pas bien. Pour éviter les complications, il est conseillé aux utilisateurs peu expérimentés d'entrer au moins une valeur faible ($C > 0.2 \text{ KN/m}^2$). Plaxis propose une option spéciale pour les couches dans lesquelles la cohésion croît avec la profondeur.

E. Angle de dilatance « ψ »

Elle est donnée en degré. Sauf pour les couches très sûres consolidées, les sols argileux ne présentent aucune dilatance ($\psi=0$). Il peut être facilement évalué par la règle suivante :

$$\Psi = \varphi - 30^\circ, \text{ pour } \varphi > 30^\circ ;$$

$$\Psi = 0^\circ, \text{ pour } \varphi < 30^\circ ;$$

$$\Psi < 0^\circ, \text{ pour les sables très lâches.}$$

4.5.3. Modèle pour les sols mous « Soft Soil Model »

Ce modèle (en abrégé SSM) est un modèle dérivé du Cam-Clay. Historiquement le modèle Cam Clay a été développé à Cambridge dans les années 60 par Roscoe, Sheffield et al. L'idée de base de ce modèle est de prendre en compte l'effet d'écrouissage que provoque sur les argiles la pression moyenne. Sous l'effet d'une pression moyenne, la teneur en eau diminue et l'argile devient plus résistante. Il s'agit d'un modèle élasto-plastique avec une surface de charge. Sous la surface de charge, le matériau reste élastique, tandis que si le point représentatif de l'état de contrainte effectif atteint non réversible. Une surface de plasticité, associée, limite l'espace entre les états admissibles et non admissibles.

4.5.4. Modèle de sol avec écrouissage « Hardening Soil Model »

C'est un modèle hyperbolique de type élasto-plastique formulé dans le cadre de la plasticité avec écrouissage en cisaillement. De plus, ce modèle prend en compte l'écrouissage en compression pour simuler le compactage irréversible d'un sol sous son premier chargement en compression. Ce modèle du deuxième ordre permet de simuler le comportement des sables, des graves, mais aussi de sols plus mous comme les argiles et les limons.

4.5.5. Modèle pour les sols mous avec fluage « Soft Soil Creep Model »

C'est un modèle de viscoplasticité. Il permet de simuler le comportement des sols mous, comme les argiles ou les tourbes normalement consolidées, en fonction du temps. (Lamri, 2008)

4.5.6. Modèle pour les roches fracturées « Jointed Rock Model »

« Jointed Rock Model » est un modèle élasto-plastique anisotrope, pour lequel le cisaillement plastique peut se produire seulement dans un nombre limité de directions de cisaillement. Ce modèle peut être utilisé pour simuler le comportement des roches stratifiées ou fracturées.

4.6. Conclusion

Ce rapide tour d'horizon des différents modèles utilisés dans Plaxis 2D montre qu'il s'agit de modèles suffisamment simples pour qu'il soit possible d'en déterminer les paramètres avec une étude géotechnique classique ou avec des corrélations. Il n'y a dans ces modèles aucun paramètre de calage ou sans signification physique comme on en rencontre souvent dans des modèles sophistiqués. Souvent la détermination des paramètres nécessite des techniques d'optimisation. Ces modèles appartiennent au domaine de recherche.

L'utilisateur doit se concentrer sur deux choix : l'un est inhérent à la géotechnique en général, l'autre concerne la simulation numérique.

La détermination des paramètres géotechniques à entrer dans Plaxis 2D n'est pas différente d'un choix de paramètre de calcul « manuel » pour un calcul de tassement ou de stabilité : à partir d'essais, il est indispensable d'arriver à ce que l'on pourrait appeler un modèle géotechnique de terrain. Certains des paramètres sont différents dans leurs expressions, mais toujours reliés à des paramètres géotechniques classiques. Le choix du modèle de comportement dépend en fait du problème posé : soutènement, tassement de remblai, fondation sur sol en pente, chaussées, tunnel : quel modèle de comportement utiliser pour quel problème géotechnique ? La question n'est pas simple car il n'existe pas de modèle « universel »

Le logiciel Plaxis offre la possibilité d'étudier et d'analyser le comportement d'un corps de chaussée sous l'effet de passage du trafic.

Chapitre 05

Résultats et interprétations

5.1. Introduction	58
5.2. Modélisation numérique.....	58
5.2.1. Modèle géométrique.....	58
5.2.2. Lois de comportement utilisées	58
5.2.3. Maillage et conditions aux limites.....	59
5.2.4. Les conditions initiales	60
5.3. Influence du trafic sur les tassements de la chaussée	61
5.4. Simulation du chargement du trafic	63
5.4.1. Cas 01 : Passage d'un camion porteur à deux essieux (CP2E).....	63
5.4.2. Cas 02 : Passage d'un camion Porteur à trois essieux (CP3E).....	69
5.4.3. Cas 03 : Passage d'un camion tracteur et semi-remorque à 4 essieux (TSR4E)	75
5.4.4. Cas 04 : Passage d'un camion tracteur et semi-remorque à 5 essieux (TSR5E)	81
5.5. Tassements sous la roue du P[ES ₁] dans les 4 cas de chargement	89
5.6 Conclusion.....	93

5.1. Introduction

Le passage répété des poids lourds entraîne progressivement l'endommagement dans le temps des structures de chaussée. Ces structures en service, sont soumises à des sollicitations très complexes (multiples essieux). L'agressivité de ces véhicules à essieux multiples cause de plusieurs dégâts dans la chaussée, elle permet à l'ingénieur de quantifier ces dégâts causés, par des simulations numériques sur (Plaxis 2D) pour une meilleure représentation de la géométrie de l'ouvrage et afin de déterminer les déplacements du corps de chaussée sous les paramètres du modèle de comportement.

5.2. Modélisation numérique

5.2.1. Modèle géométrique

Le modèle géométrique choisi pour la modélisation de la chaussée est présenté dans la figure 5.1.

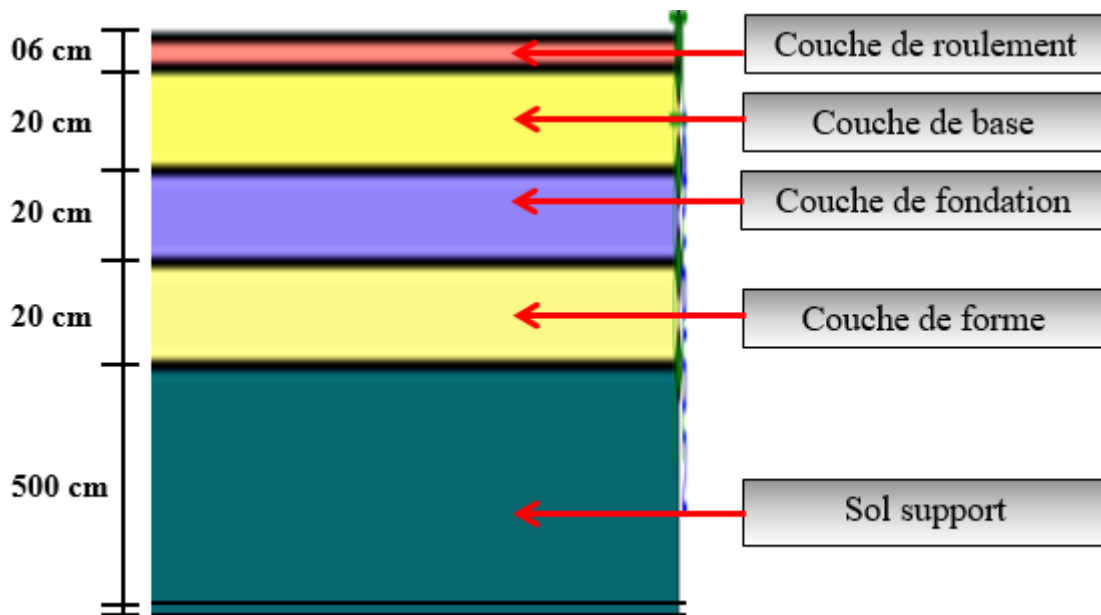


Figure 5.1. Modèle géométrique du corps de chaussée

5.2.2. Lois de comportement utilisées

Les lois de comportement utilisées sont, le modèle élasto-plastique de Mohr-coulomb pour le corps de chaussée et le sol support, avec des paramètres différents et la loi élastique pour la couche de roulement.

Ces modèles ont été utilisés dans les calculs, avec des paramètres géotechniques données dans le tableau 5.1

Tableau 5.1. Paramètres géotechniques des différentes couches de chaussée.

Matériaux	Couche de roulement (CR)	Couche de base (CB)	Couche de fondation (CF)	Couche de forme (CFR)	Sol support (SS)
Épaisseur (m)	0.06	0.2	0.2	0.2	5
Module de Young [E] (KN/m ²)	5.4 10 ⁵	2.5 10 ⁵	3 10 ⁵	1.4 10 ⁵	1.4 10 ⁵
Coefficient de Poisson [ν]	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Le poids volumique [γ] (KN/m ³)	25	21.3	22	22	20
Cohésion [C] (KN/m ²)	/	30	20	20	20
Angle de frottement [φ] (degré)	/	43	44	36	36
Angle de dilataance [ψ] (degré)	/	13	14	6	6

5.2.3. Maillage et conditions aux limites

Les éléments utilisés pour le maillage sont des éléments triangulaires à 15 nœuds. Ce maillage nous donne une distribution plus fine des nœuds (Figure 5.2), ce qui implique que les résultats vont être plus précis par rapport au même maillage avec 6 nœuds. Cependant l'utilisation d'éléments à 15 nœuds prend plus de temps.

Les conditions aux limites dans un problème sont souvent complexes et elles conditionnent naturellement la qualité et la précision de la modélisation. Les conditions aux limites mécaniques se basent sur les équations d'équilibre mécanique (soit cinématique, soit statique), dans notre cas, les déplacements sont imposés nuls (un blocage total qui est la combinaison des blocages horizontaux et blocages verticaux ($u_x = u_y = 0$)) (Figure 5.2).

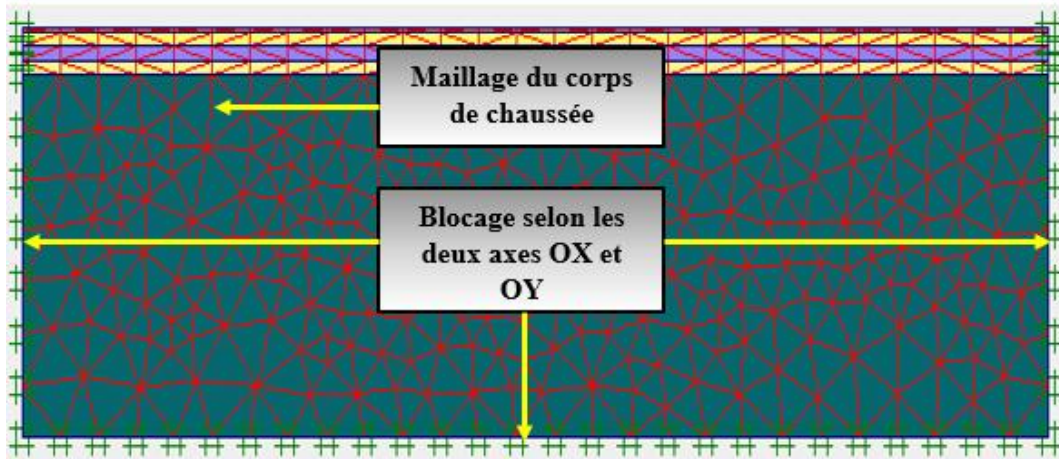


Figure 5.2. Maillage et conditions aux limites du corps de chaussée

5.2.4. Les conditions initiales

Les conditions initiales ont pour but de déterminer les pressions interstitielles initiales et les contraintes initiales.

➤ **Conditions hydrauliques**

C'est la définition du niveau de la nappe phréatique. La nappe phréatique est positionnée à la base du sol support. (Figure 5.3)

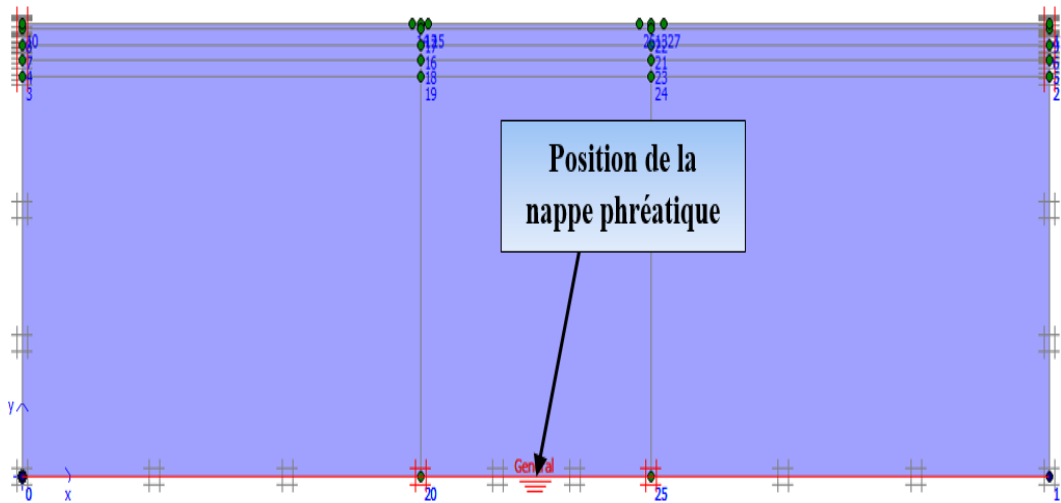


Figure 5.3. Position de la nappe phréatique

➤ **Contraintes initiales**

La génération du champ de contraintes initiales dû au poids des terres se fait par la fixation d'une valeur particulière du coefficient du poids des terres au repos K_0 ($K_0=1-\sin\phi$), et puis activé le poids du sol intégralement. (Figure 5.4)

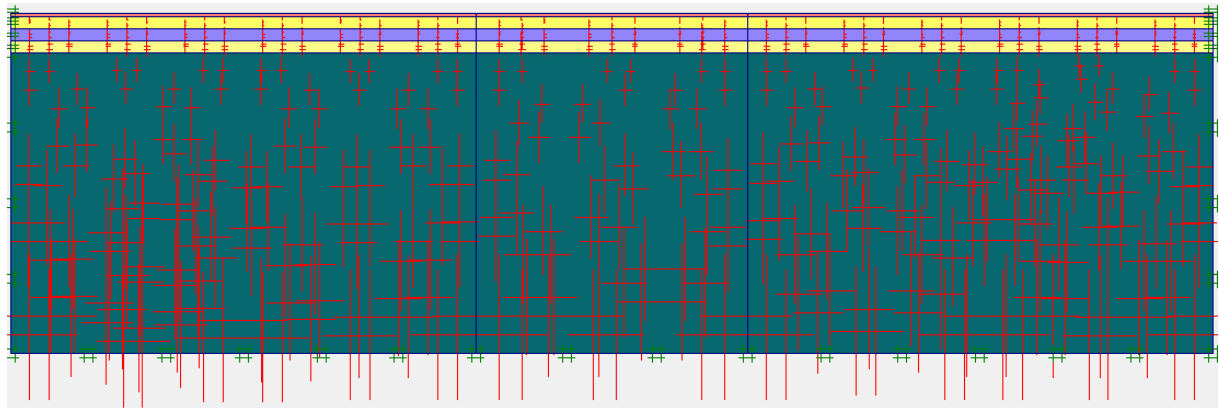


Figure 5.4. Génération des contraintes

5.3. Influence du trafic sur les tassements de la chaussée

Le poids des véhicules est transmis à la chaussée sous forme de pressions par l’intermédiaire des pneumatiques qui exercent des efforts sur la surface de contact pneu-chaussée. L’étape initiale de la modélisation consiste à déterminer les dimensions de la section d’empreinte pour laquelle chaque roue du poids lourd exerce une pression normale **de 0,662 MPa** (pour la roue isolée, le tandem à roues isolées et le tridem à roue isolées) uniformément répartie sur la section de son empreinte. En modélisation 2D, la surface de contact pneu-chaussée est représentée par deux demi-cercles et un rectangle (Figure 5.5). Elle est convertie en rectangle équivalent, de surface **0,5227L²** et de largeur **0,6L** (Figure 5.5) ; L étant fonction de la charge (Q) et de la pression de contact (q) (Huang, 1993) :

$$L = \sqrt{\left(\frac{Q}{q \cdot 0.5257}\right)} \dots\dots\dots(5.1)$$

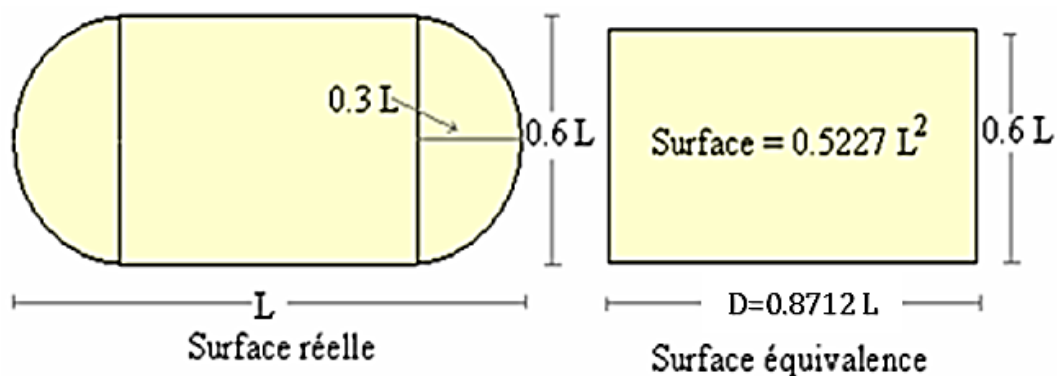
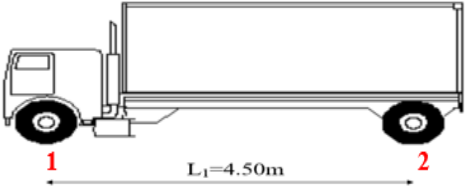
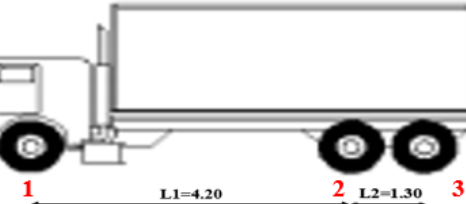
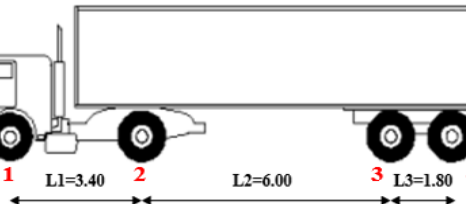
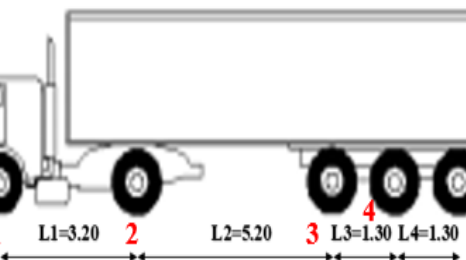


Figure 5.5. Simplification de la surface de contact pneu-chaussée (Huang, 1993)

le tableau 5.2 récapitule les différentes charges de références prisent en compte dans les calculs [Q], la longueur équivalente de chaque roue d'un essieu [D], les différentes longueurs entre les essieux [L] et les différents temps de passage des roues des essieux sur le même point (au-dessous des essieux) [T].

Tableau 5.2. Caractéristiques des camions fréquents

Les différents cas	Longueur équivalente de chaque roue d'un essieu	Charge d'essieu fréquente (kN)	Le temps T (s)
<p>Camion porteur à deux essieux (CP2E)</p> 	<p>$D_1 = 31\text{cm}$ $D_2 = 46\text{cm}$</p>	<p>$Q_1 = 90$ $Q_2 = 190$</p>	<p>$T_1 = 0.2$</p>
<p>Camion porteur à trois essieux (CP3E)</p> 	<p>$D_1 = 30\text{cm}$ $D_2 = D_3 = 39\text{cm}$</p>	<p>$Q_1 = 80$ $Q_2 = 140$ $Q_3 = 140$</p>	<p>$T_1 = 0.19$ $T_2 = 0.06$</p>
<p>Camion tracteur et semi-remorque à 4 essieux (TSR4E)</p> 	<p>$D_1 = 31\text{cm}$ $D_2 = 46\text{cm}$ $D_3 = D_4 = 39\text{cm}$</p>	<p>$Q_1 = 90$ $Q_2 = 190$ $Q_3 = 140$ $Q_4 = 140$</p>	<p>$T_1 = 0.15$ $T_2 = 0.27$ $T_3 = 0.08$</p>
<p>Véhicule tracteur et semi-remorque à 5 essieux (TSR5E)</p> 	<p>$D_1 = 31\text{cm}$ $D_2 = 44\text{cm}$ $D_3 = D_4 = D_5 = 36\text{cm}$</p>	<p>$Q_1 = 90$ $Q_2 = 180$ $Q_3 = 120$ $Q_4 = 120$ $Q_5 = 120$</p>	<p>$T_1 = 0.14$ $T_2 = 0.23$ $T_3 = 0.06$ $T_4 = 0.06$</p>

Les tassements des couches de chaussée sont présentés sur les interfaces supérieures de chaque couche (Figure 5.6).

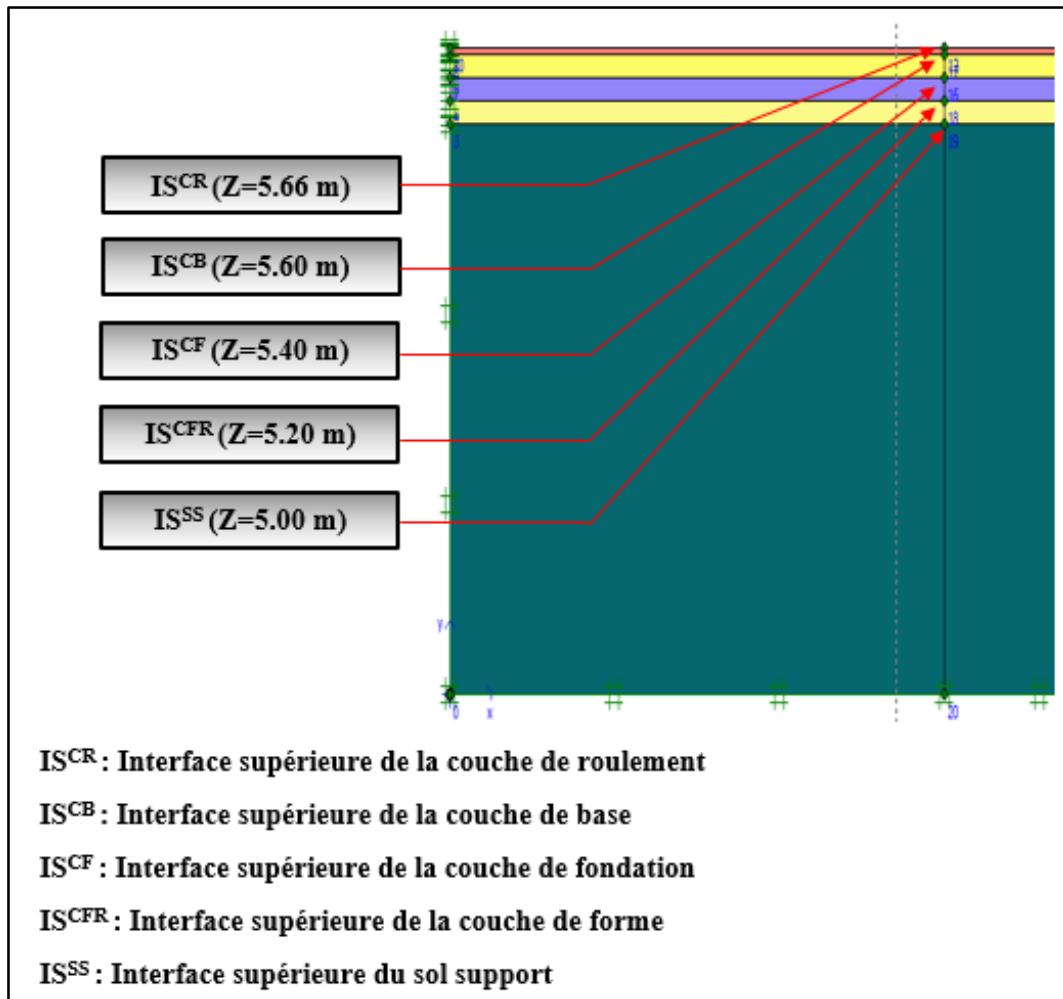


Figure 5.6. Interfaces supérieures des couches du corps de chaussée

5.4. Simulation du chargement du trafic

5.4.1. Cas 01 : Passage d'un camion porteur à deux essieux (CP2E)

Le passage d'un camion porteur à deux essieux sur la chaussée engendre des tassements qui se concentrent au-dessous de chaque roue d'un profil (P[ES₁] et P[ES₂]) (Figure 5.7).

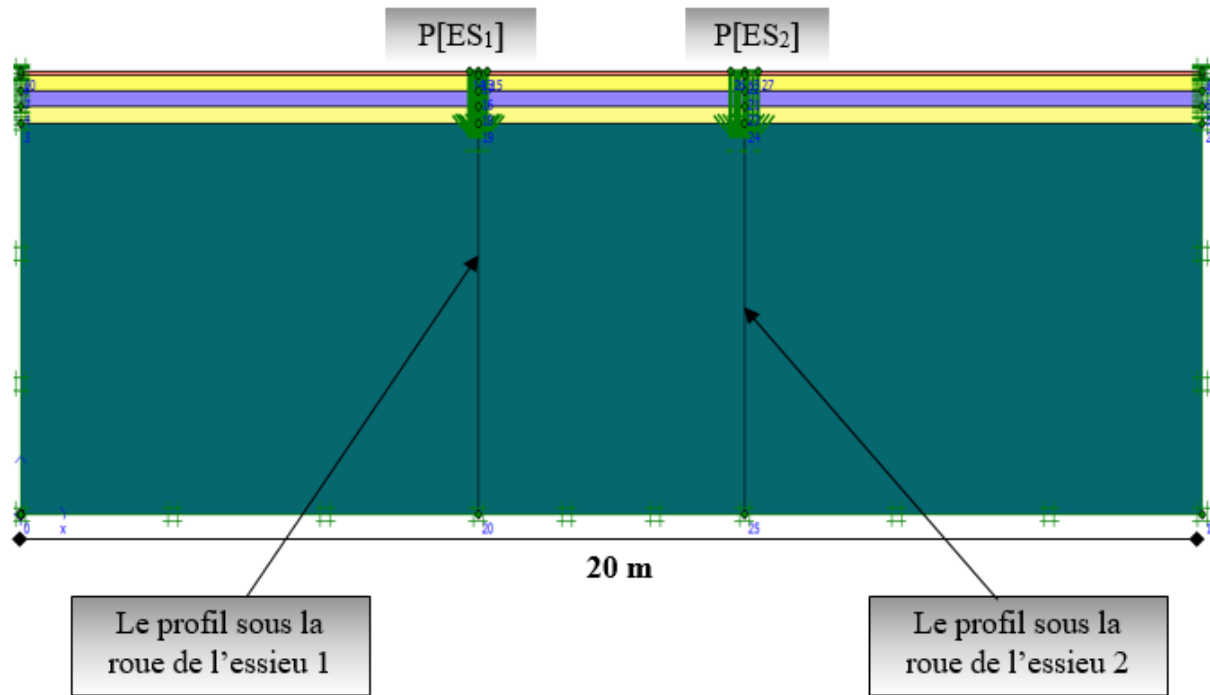


Figure 5.7. Tassements au-dessous des roues sous un déplacement imposé

La simulation de la charge dynamique du passage des camions est effectuée avec un déplacement imposé qui suit l'évolution illustrée dans la figure 5.8. (Ambassa, 2013)

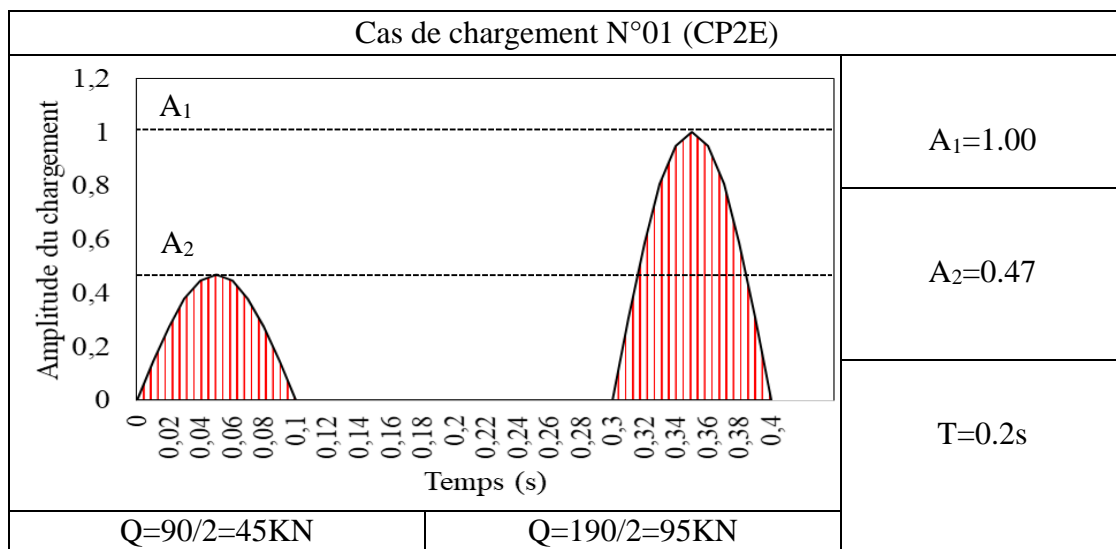


Figure 5.8. Chargement dynamique du passage du camion

a. Les tassements suivant le profil en long

Le passage du camion engendre des tassements sur les interfaces supérieures des couches du corps de chaussée représentés dans les figures suivantes (Figure 5.9 à 5.13).

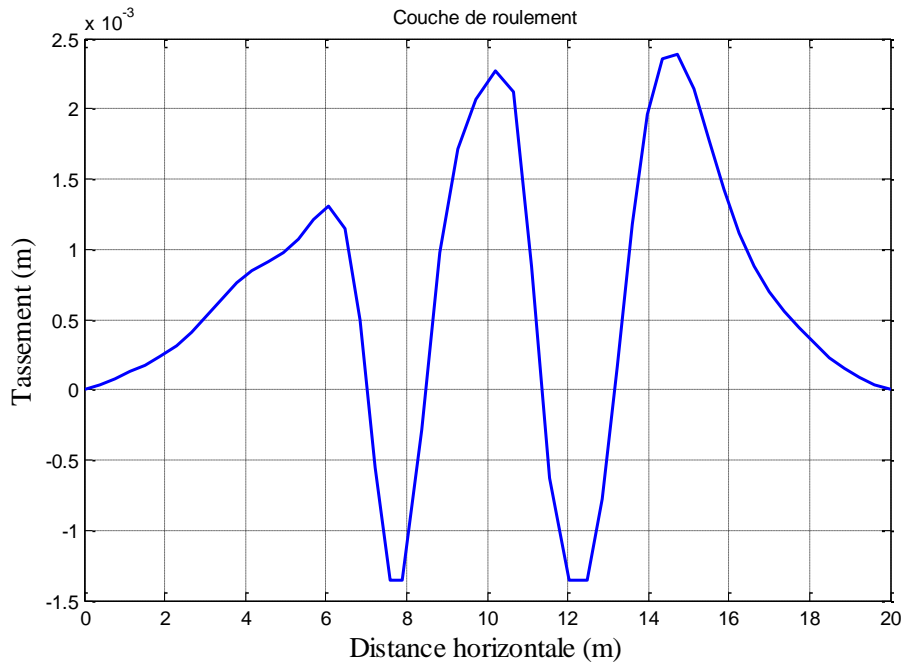


Figure 5.9. Variation des tassements sur ISCR (Z=5.66m)

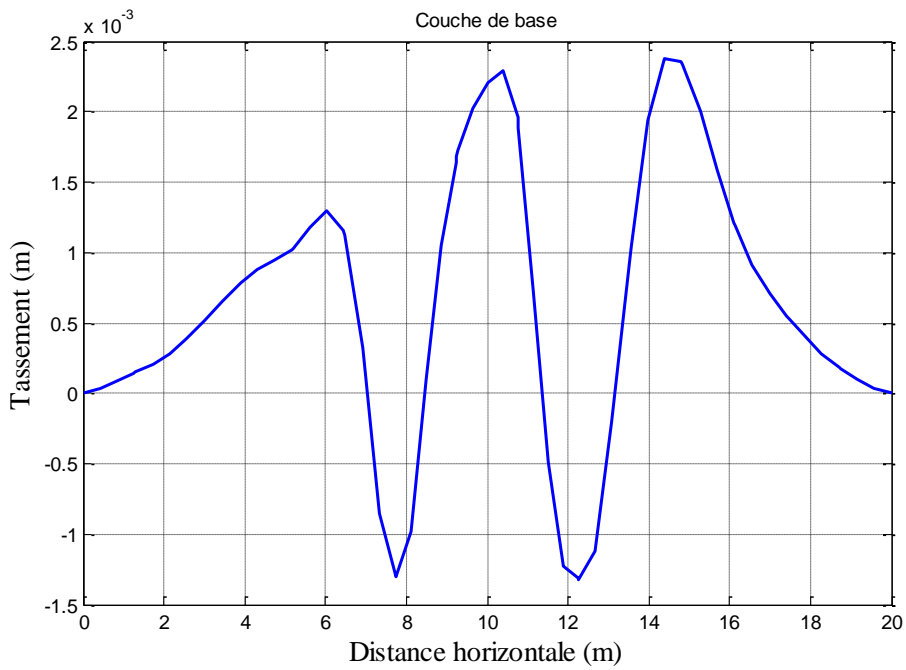


Figure 5.10. Variation des tassements sur ISCB (Z=5.60m)

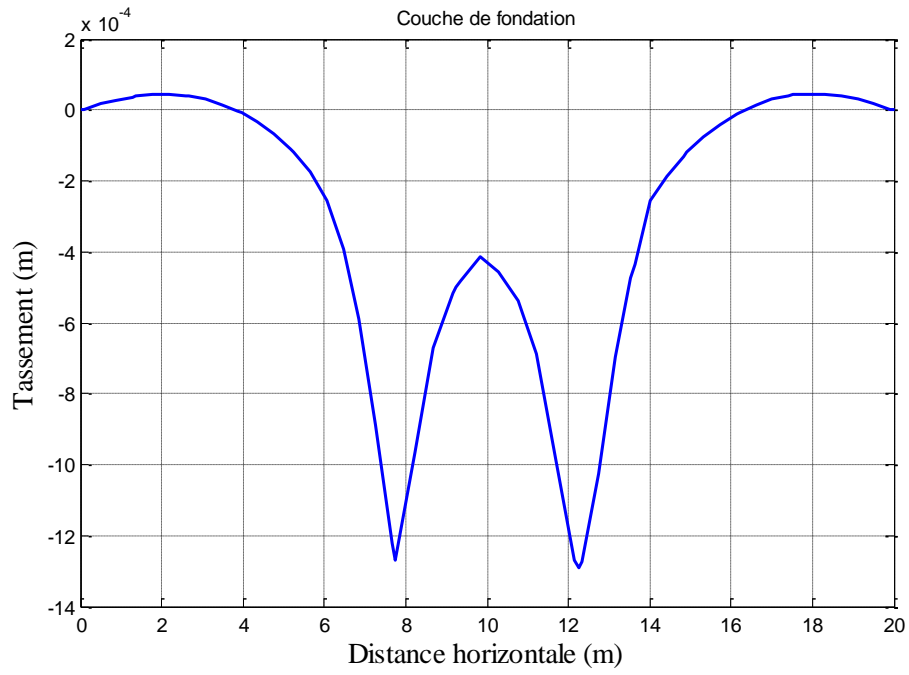


Figure 5.11. Variation des tassements IS^{CF} (Z=5.40m)

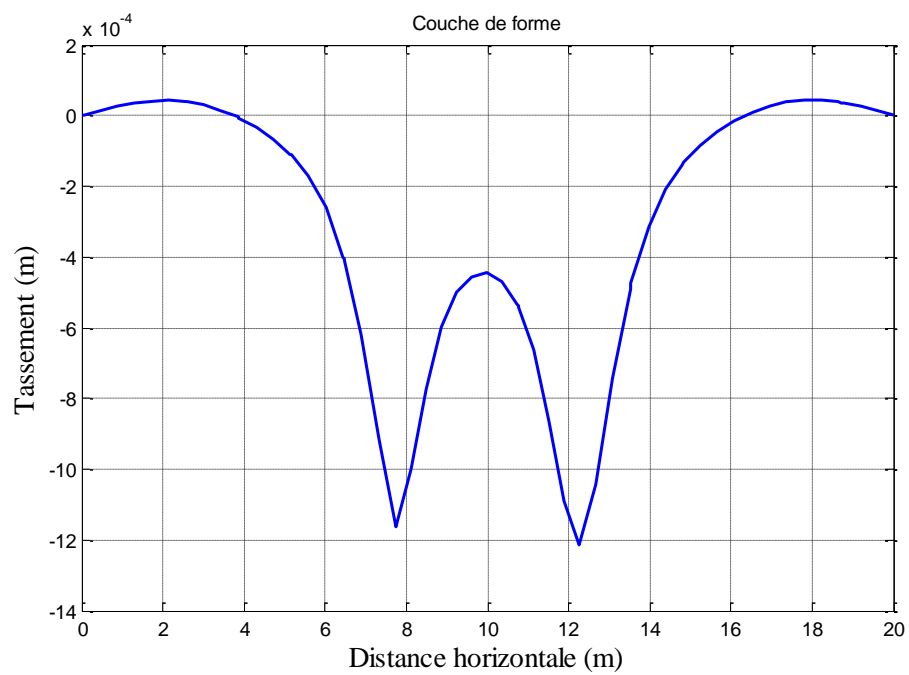


Figure 5.12. Variation des tassements sur ISCFR (Z=5.20m)

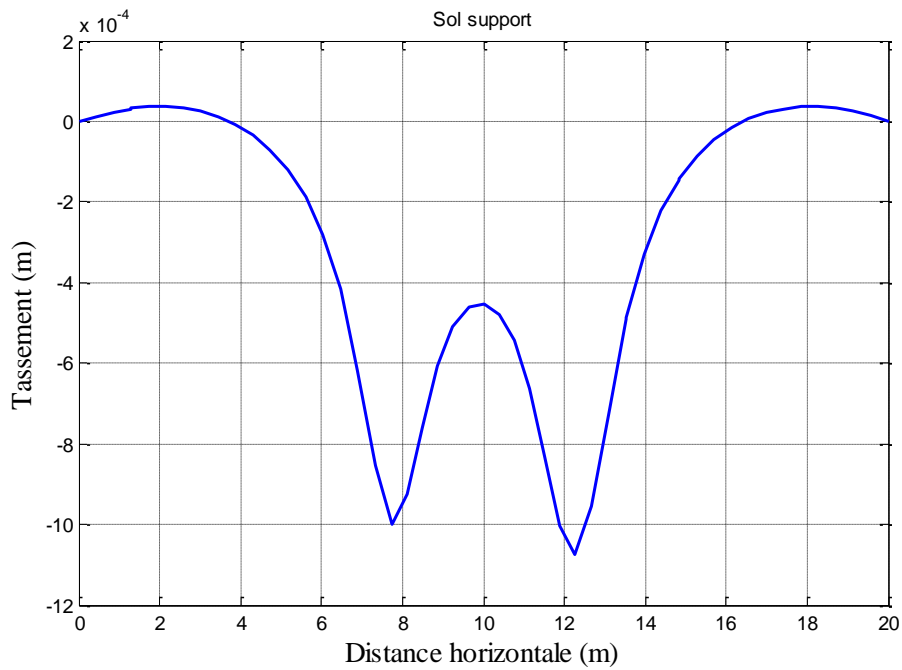


Figure 5.13. Variation des tassements sur IS^{SS} (Z=5.00m)

Les figures (5.9 à 5.13) représentent la variation des tassements sur les interfaces supérieures des couches du corps de chaussée. Selon le cas étudié (CP2E), les tassements maximaux sont localisés au-dessous des roues. L'interface la plus sollicitée en terme de déplacement (tassement) est la couche de roulement $U_z = 1.35 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ (Figure 5.14).

b. Tassements suivant la hauteur de la chaussée

Les tassements du corps de chaussée après le passage d'un camion porteur à 2 essieux sont en mode décroissant d'une couche à une autre (Figure 5.14) (Tableau 5.3).

Tableau 5.3. Tassements maximaux sur les interfaces supérieures des profils P[ES₁] et P[ES₂]

Interfaces	IS ^{CR} (Z=5.66m)	IS ^{CB} (Z=5.60m)	IS ^{CF} (Z=5.40m)	IS ^{CFR} (Z=5.20m)	IS ^{SS} (Z=5.00m)
Tassements sous la roue de P[ES ₁] (m)	$1.35 \cdot 10^{-3}$	$1.30 \cdot 10^{-3}$	$1.28 \cdot 10^{-3}$	$1.16 \cdot 10^{-3}$	$1.00 \cdot 10^{-3}$
Tassements sous la roue de P[ES ₂] (m)	$1.35 \cdot 10^{-3}$	$1.31 \cdot 10^{-3}$	$1.30 \cdot 10^{-3}$	$1.21 \cdot 10^{-3}$	$1.08 \cdot 10^{-3}$

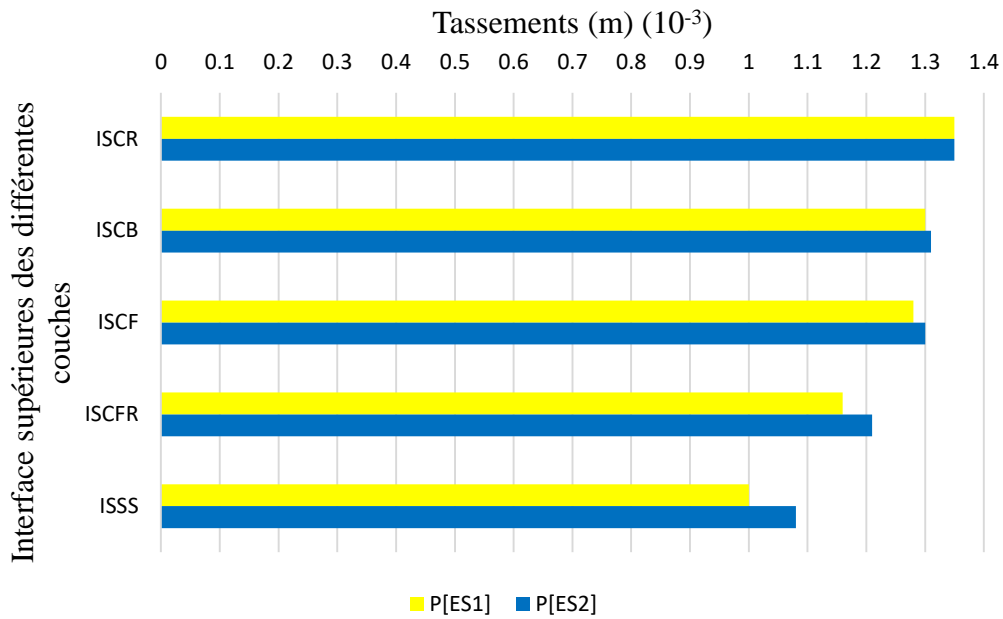


Figure 5.14. Tassements maximaux sur les interfaces supérieures des couches aux profils P[ES1] et P[ES2]

A travers le tableau 5.3 et la figure 5.14, les Tassements sous P[ES2] sont plus importants que ceux de P[ES1] sauf dans (**IS^{CR}**), ils ont le même tassement ($U_z = 1.35 \cdot 10^{-3} \text{m}$).

Les figures (5.15 et 5.16), représentent l'évolution des tassements sur les profils P[ES1] et P[ES2]. Le tassement maximal obtenu se trouve à une profondeur $Z=5.66\text{m}$ qui correspond à $U_z = 1.35 \cdot 10^{-3} \text{m}$ et diminue en fonction de la profondeur pour s'annuler à $Z=0\text{m}$.

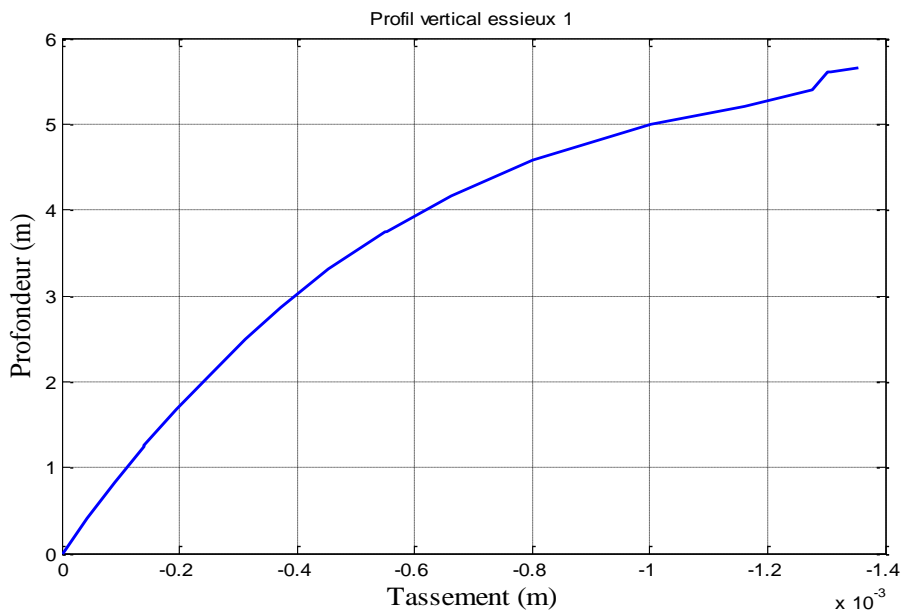


Figure 5.15. Evolution des tassements sous le profil P[ES1]

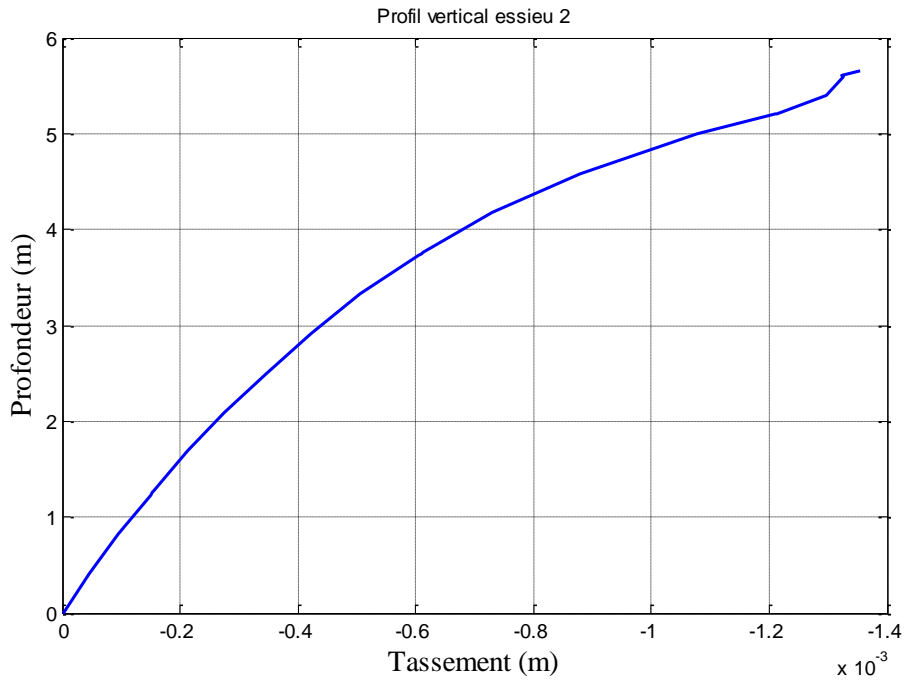


Figure 5.16. Evolution des tassements sous le profil P[ES2]

5.4.2. Cas 02 : Passage d'un camion Porteur à trois essieux (CP3E)

Le passage d'un camion porteur à trois essieux sur une chaussée engendre des tassements qui se concentrent au-dessous de chaque roue (Figure 5.17).

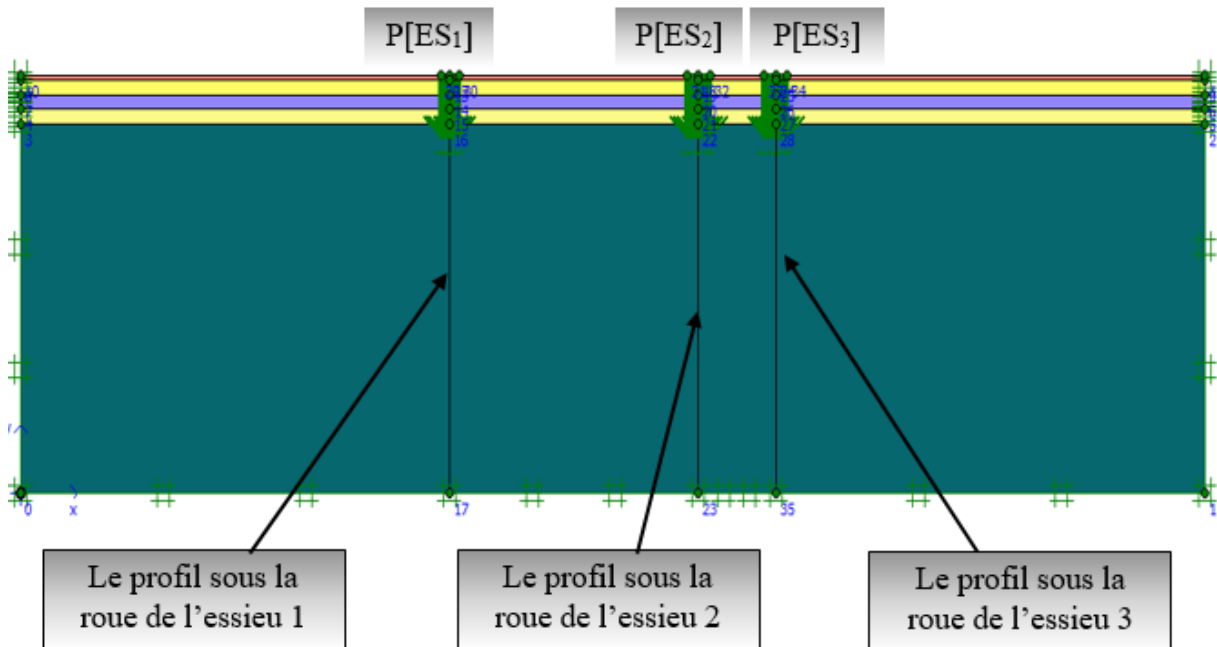


Figure 5.17. Tassements au-dessous des roues sous un déplacement imposé

La simulation de la charge dynamique du passage des camions est effectuée avec un déplacement imposé qui suit l'évolution illustrée dans la figure 5.18. (Ambassa, 2013)

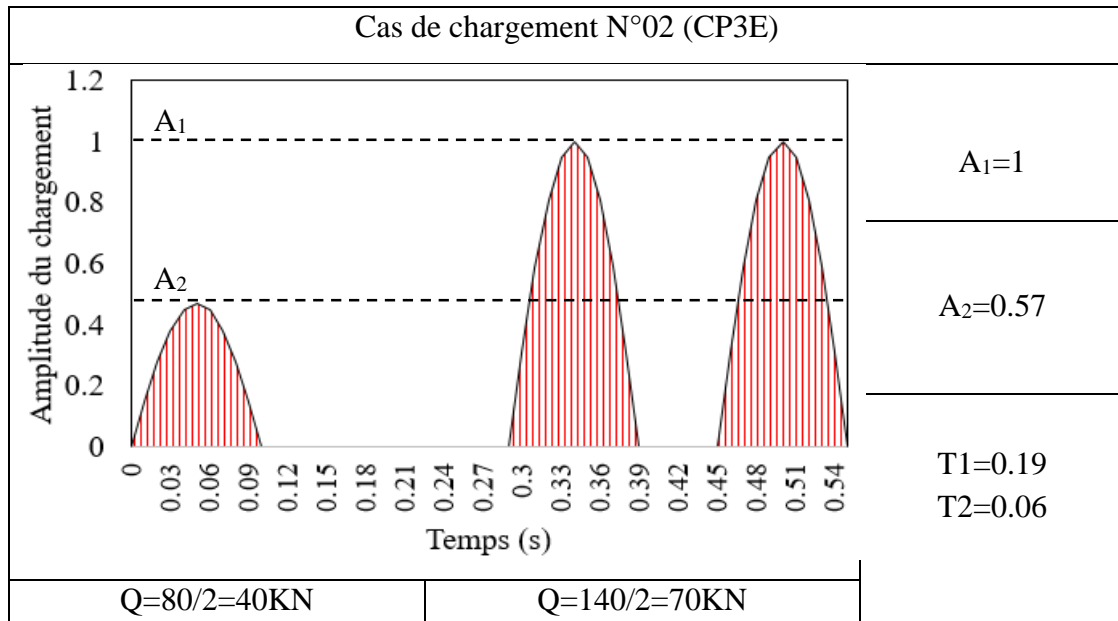


Figure 5.18. Chargement dynamique du passage du camion

a. Les tassements suivant le profil en long

Le passage du camion engendre des tassements sur les interfaces supérieures des couches du corps de chaussée représentés dans les figures suivantes (Figure 5.19 à 5.23).

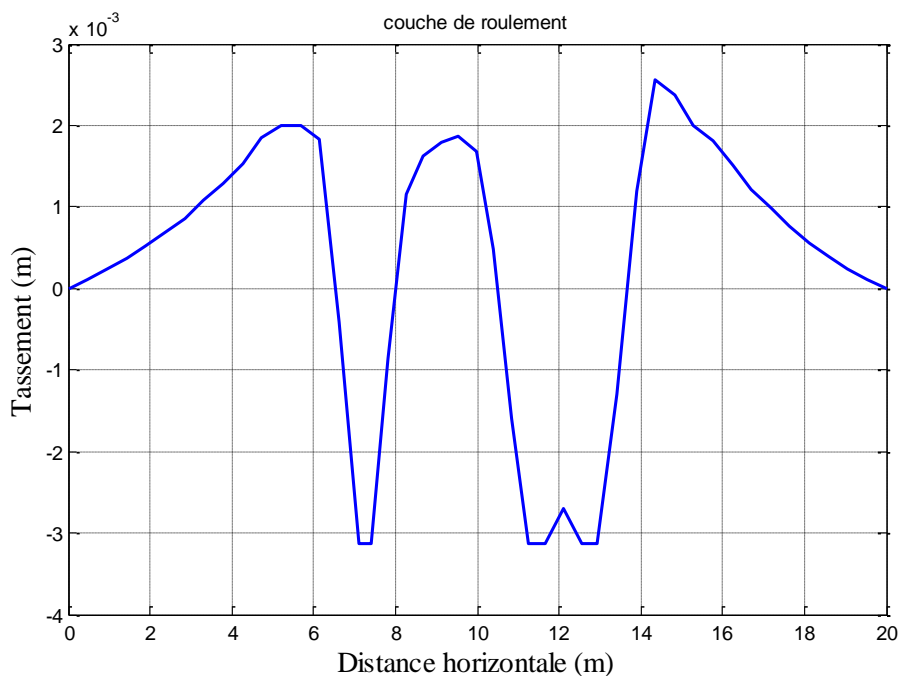


Figure 5.19. Variation des tassements sur IS^{CR} ($Z=5.66\text{m}$)

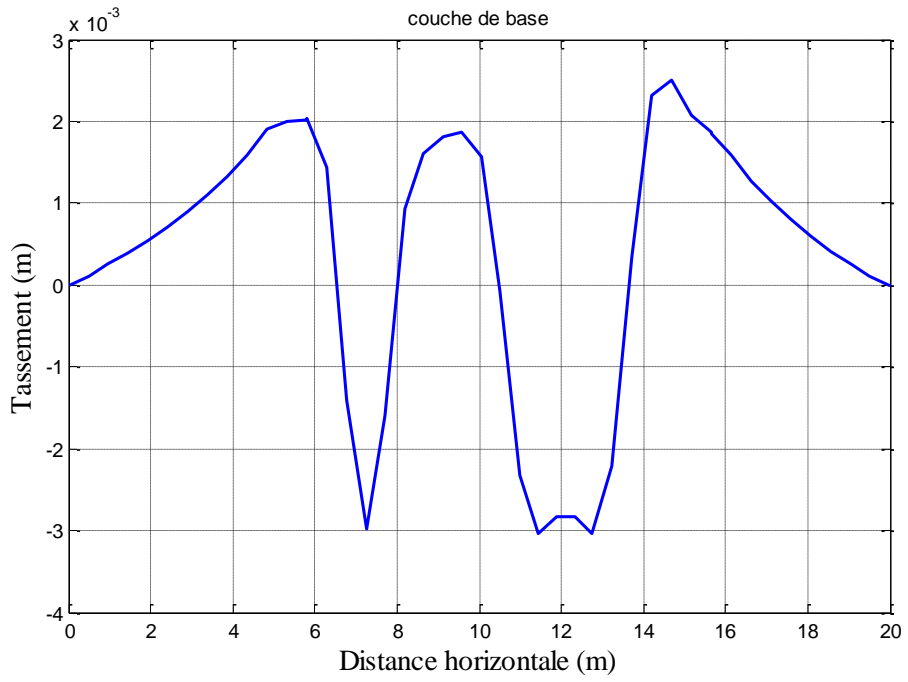


Figure 5.20. Variation des tassements sur IS^{CB} ($Z=5.60\text{m}$)

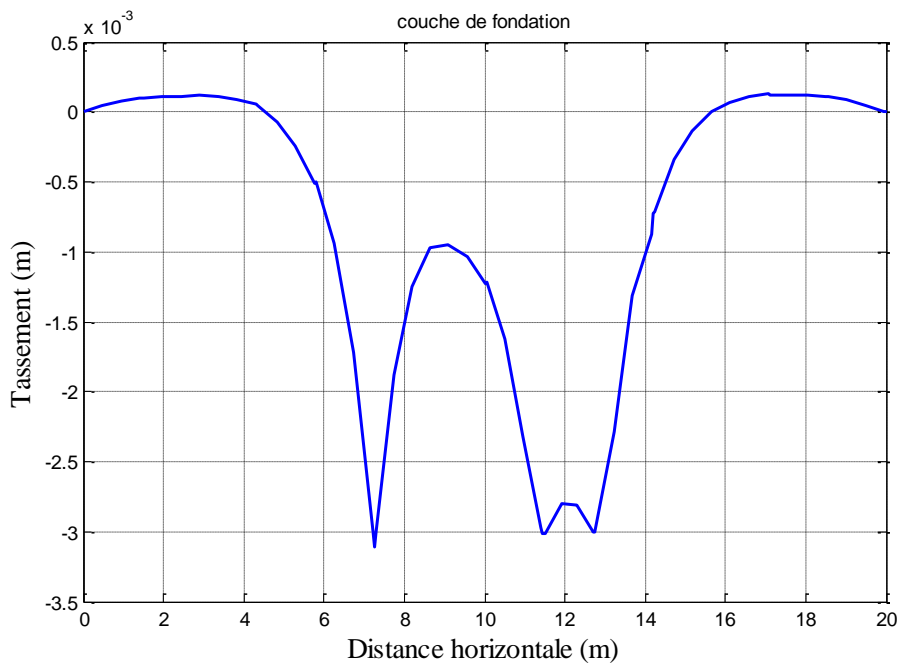


Figure 5.21. Variation des tassements sur IS^{CF} ($Z=5.40\text{m}$)

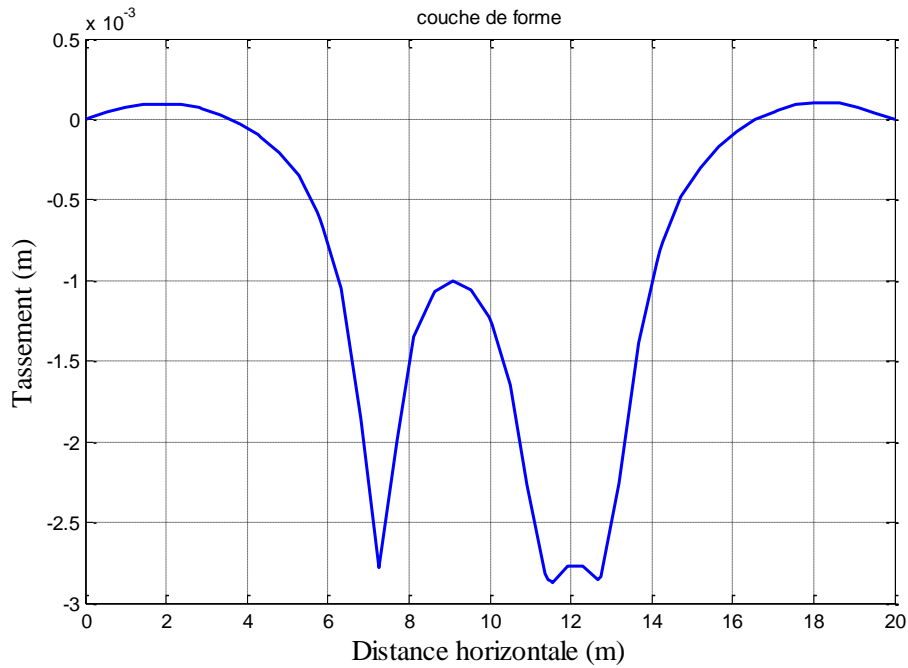


Figure 5.22. Variation des tassements sur IS^{CFR} (Z=5.20m)

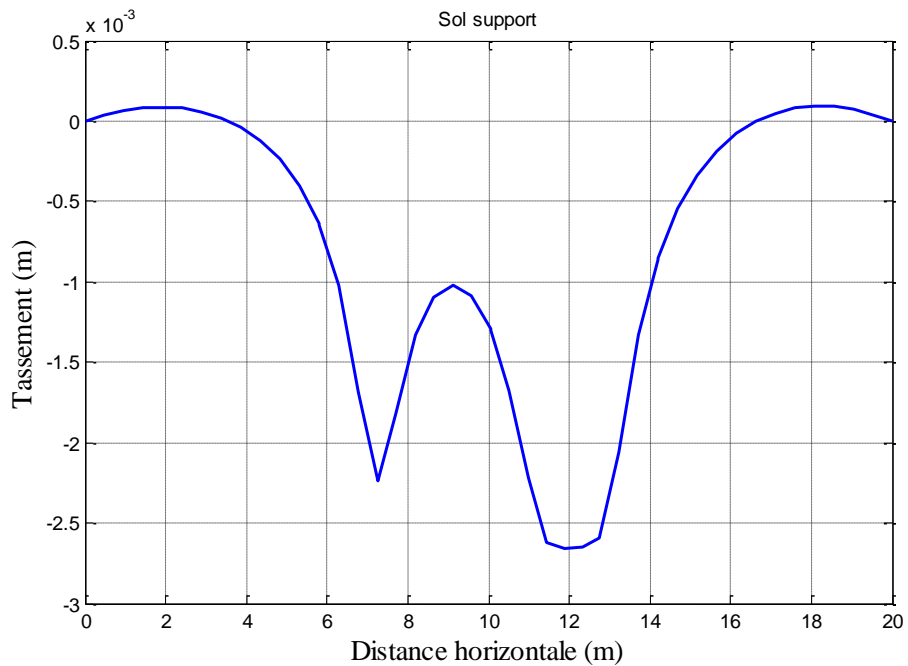


Figure 5.23. Variation des tassements sur IS^{SS} (Z=5.00m)

Sur les figures (5.19 à 5.23), les tassements maximaux sont localisés au-dessous des roues. L'interface la plus sollicitée en terme de déplacement (tassement) est la couche de roulement $U_z = 3.13 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ (Figure 5.24).

b. Tassements suivant la hauteur de la chaussée

Le tableau 5.4, représente l'évolution des tassements max aux interfaces supérieures de chaque couche du corps de chaussée. Ils sont en mode décroissant d'une couche à une autre. (Figure 5.24)

Tableau 5.4. Tassements maximaux sur les interfaces supérieures des profils P[ES₁], P[ES₂] et P[ES₃]

Interfaces	IS ^{CR} (Z=5.66m)	IS ^{CB} (Z=5.60m)	IS ^{CF} (Z=5.40m)	IS ^{CFR} (Z=5.20m)	IS ^{SS} (Z=5.00m)
Tassements sous la roue de P[ES ₁] (m)	3.13 10 ⁻³	2.97 10 ⁻³	3.12 10 ⁻³	2.76 10 ⁻³	2.25 10 ⁻³
Tassements sous la roue P[ES ₂] (m)	3.13 10 ⁻³	3.04 10 ⁻³	3.01 10 ⁻³	2.85 10 ⁻³	2.62 10 ⁻³
Tassements sous la roue P[ES ₃] (m)	3.13 10 ⁻³	3.04 10 ⁻³	3.00 10 ⁻³	2.83 10 ⁻³	2.60 10 ⁻³

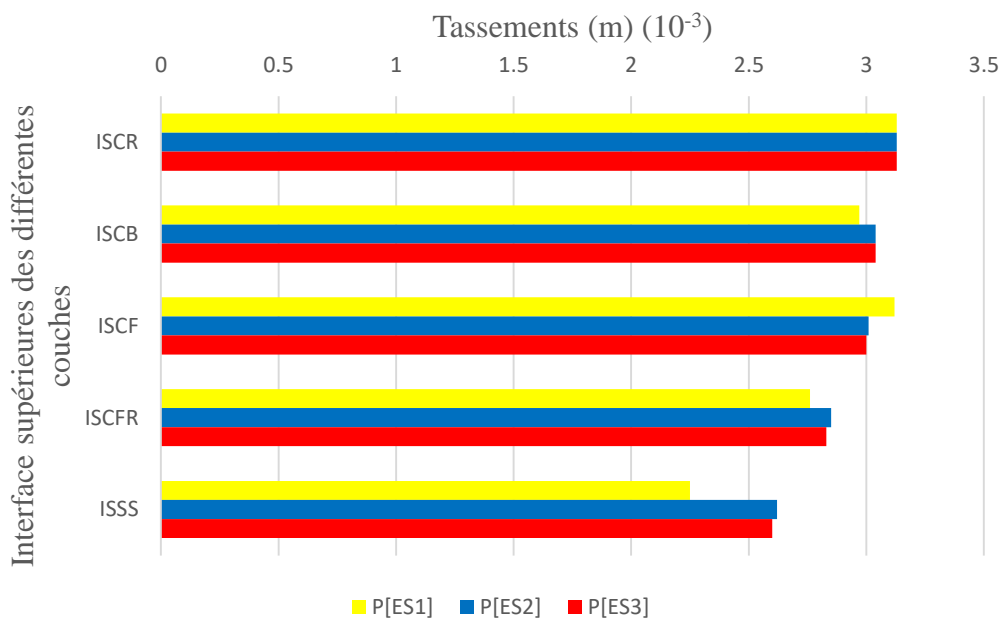


Figure 5.24. Tassements maximaux sur les interfaces supérieures des couches aux profils P[ES₁], P[ES₂] et P[ES₃]

A travers le tableau 5.4 et la figure 5.24, les Tassements sous la roue P[ES₂] sont plus élevés que ceux de P[ES₁] et P[ES₃]. Pour l'interface supérieure de la couche de roulement, on a les mêmes tassements sur tous les profils ($U_z = 3.13 \cdot 10^{-3}$ m).

Les figures (5.25, 5.26 et 5.27), représentent l'évolution des tassements sous les profils P[ES₁], P[ES₂] et P[ES₃]. Le tassement maximal obtenu se trouve à une profondeur Z=5.66m

qui correspond à $U_z = 3.13 \cdot 10^{-3} \text{m}$ et il diminue en fonction de la profondeur pour s'annuler à $Z=0\text{m}$.

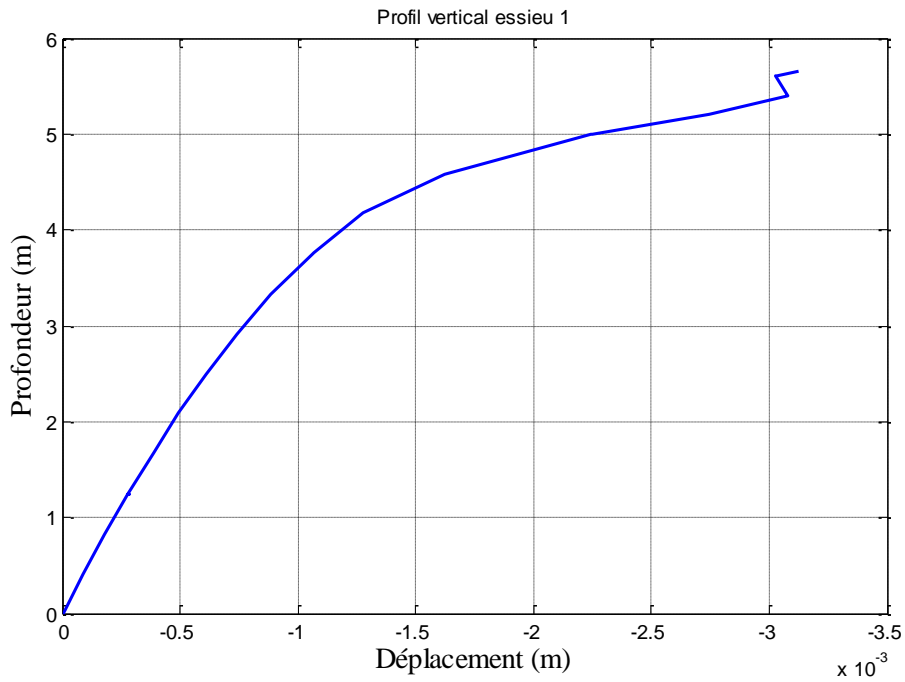


Figure 5.25. Evolution des tassements sous le profil P[ES1]

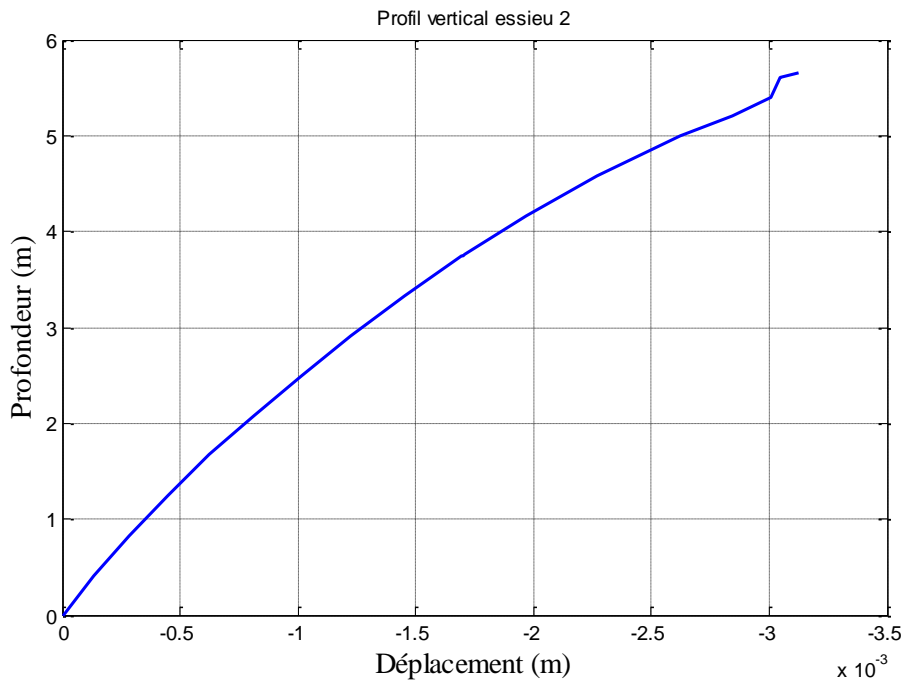


Figure 5.26. Evolution des tassements sous le profil P[ES2]

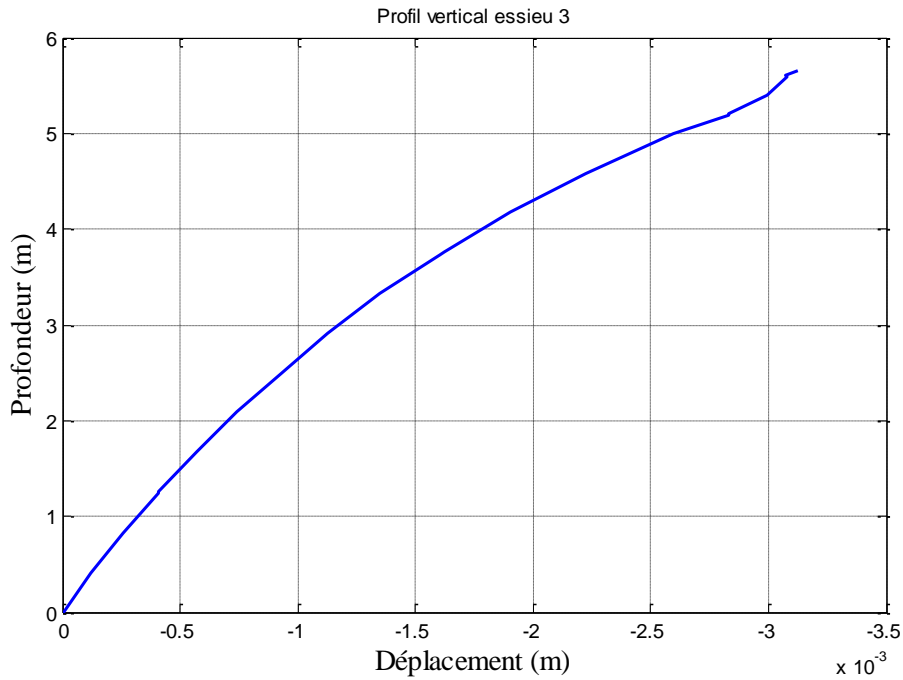


Figure 5.27. Evolution des tassements sous le profil P[ES₃]

5.4.3. Cas 03 : Passage d'un camion tracteur et semi-remorque à 4 essieux (TSR4E)

Le passage d'un camion tracteur et semi-remorque à 4 essieux sur une chaussée engendre des tassements qui se concentrent au-dessous de chaque roue (Figure 5.28).

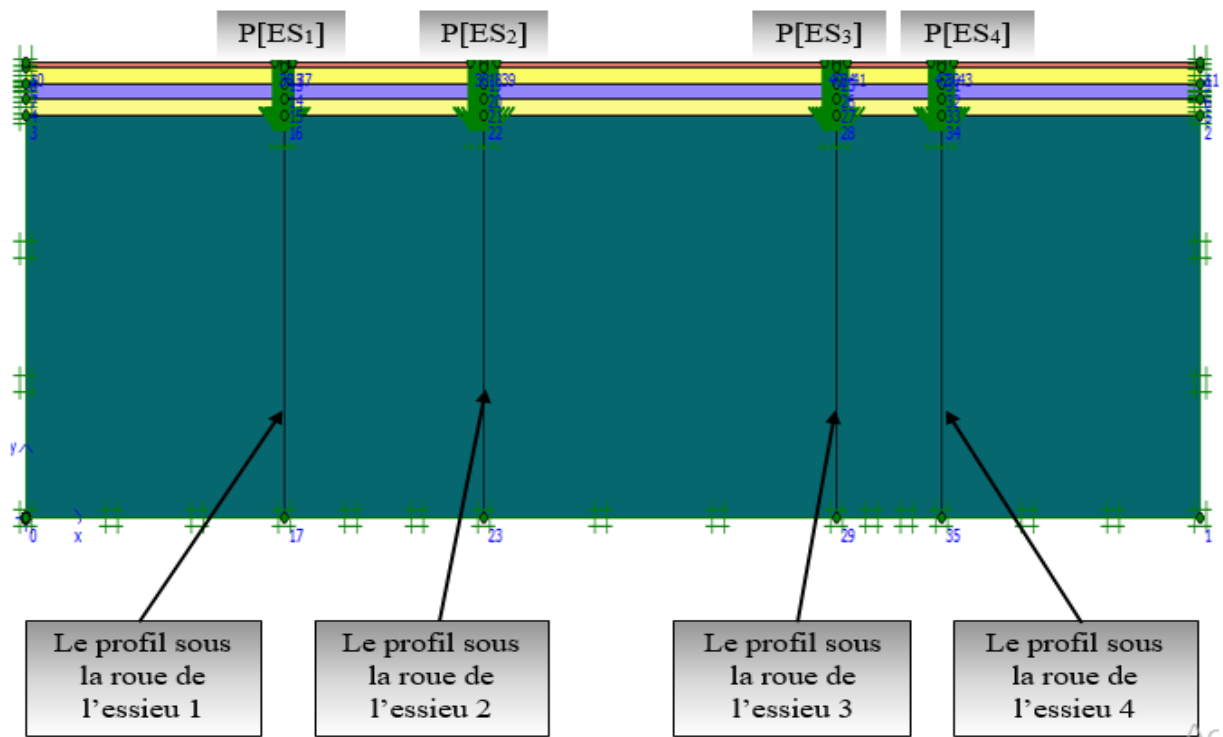


Figure 5.28. Tassements au-dessous des roues sous un déplacement imposé

La simulation de la charge dynamique du passage des camions est effectuée avec un déplacement imposé qui suit l'évolution illustrée dans la figure 5.29. (Ambassa, 2013)

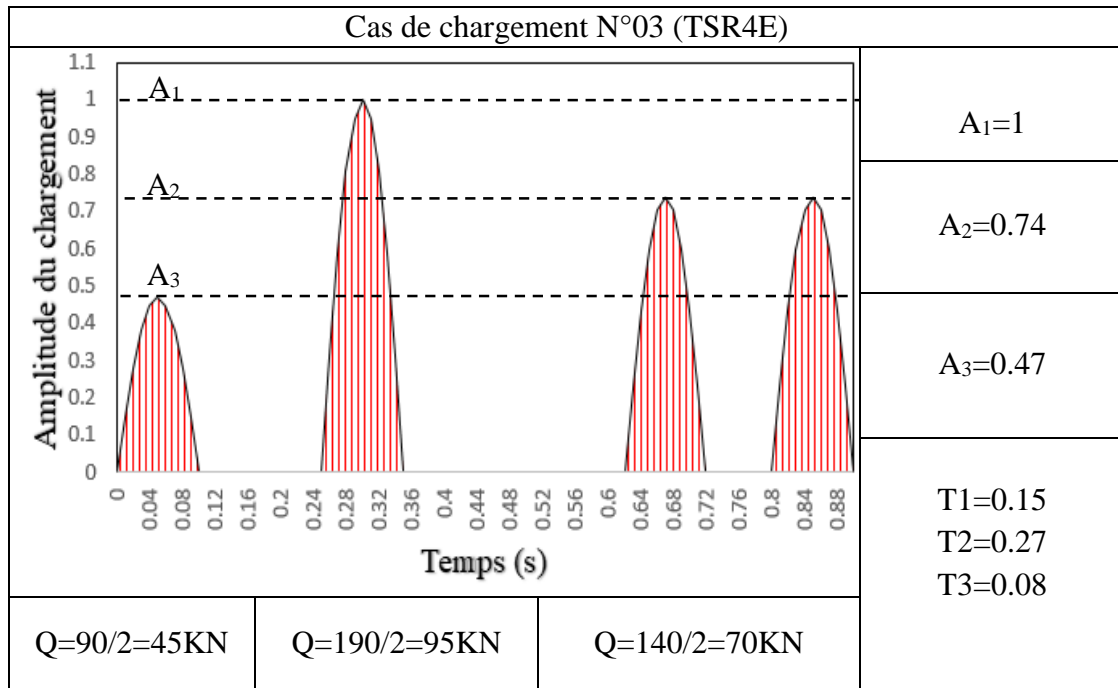


Figure 5.29. Chargement dynamique du passage du camion

a. Les tassements suivant le profil en long

Le passage du camion engendre des tassements sur les interfaces supérieures des couches du corps de chaussée représentés dans les figures suivantes (Figure 5.30 à 5.34).

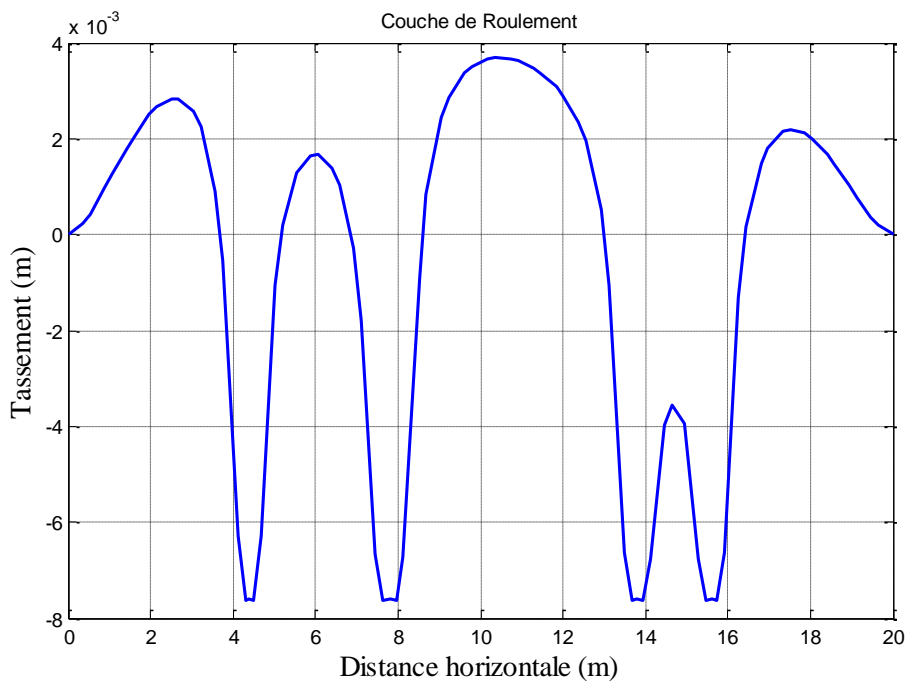


Figure 5.30. Variation des tassements sur IS^{CR} (Z=5.66m)

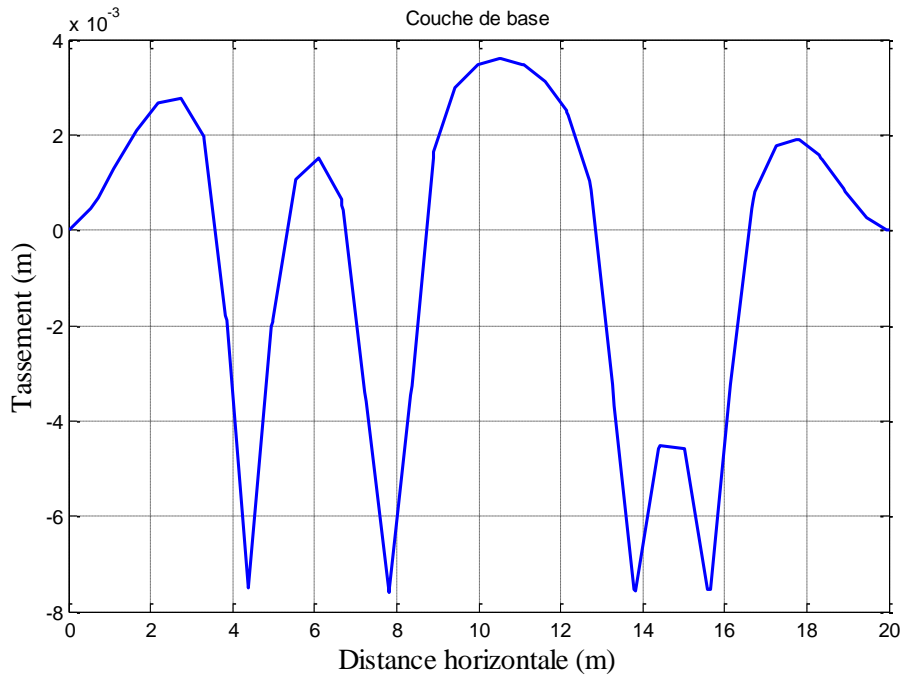


Figure 5.31. Variation des tassements sur IS^{CB} (Z=5.60m)

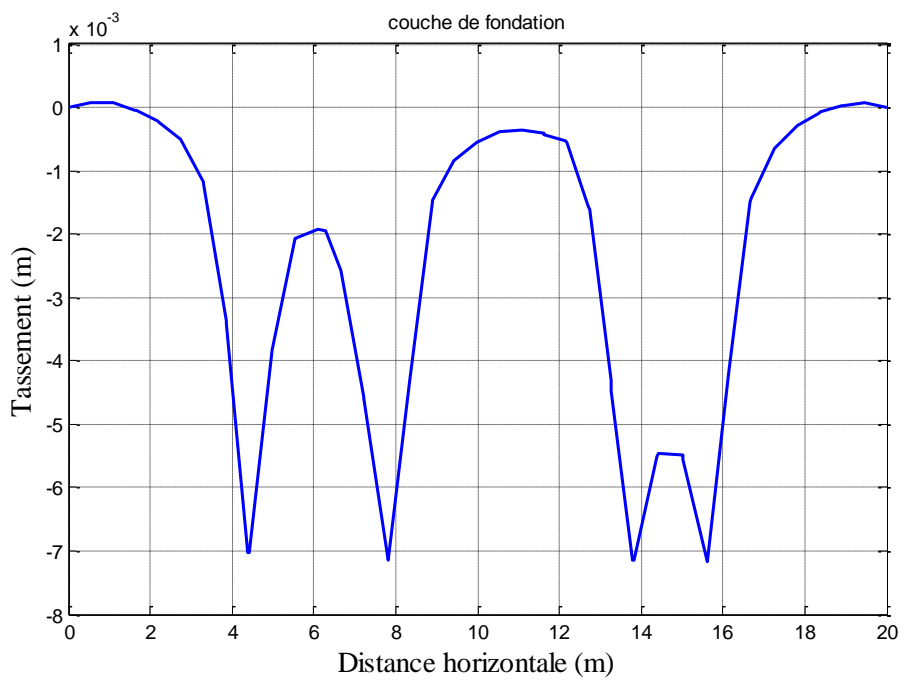


Figure 5.32. Variation des tassements sur IS^{CF} (Z=5.40m)

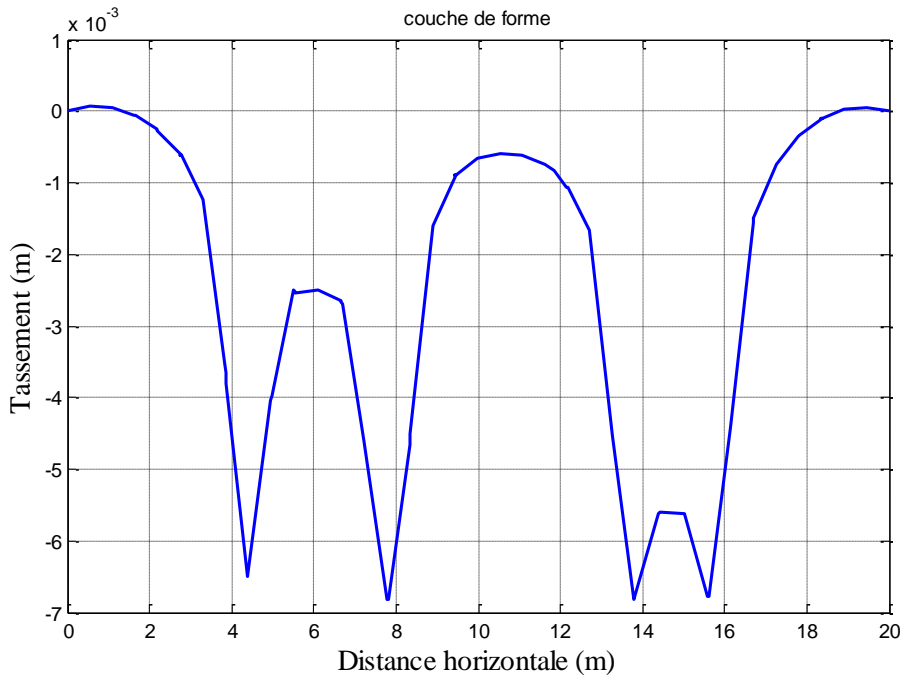


Figure 5.33. Variation des tassements sur IS^{CFR} (Z=5.20m)

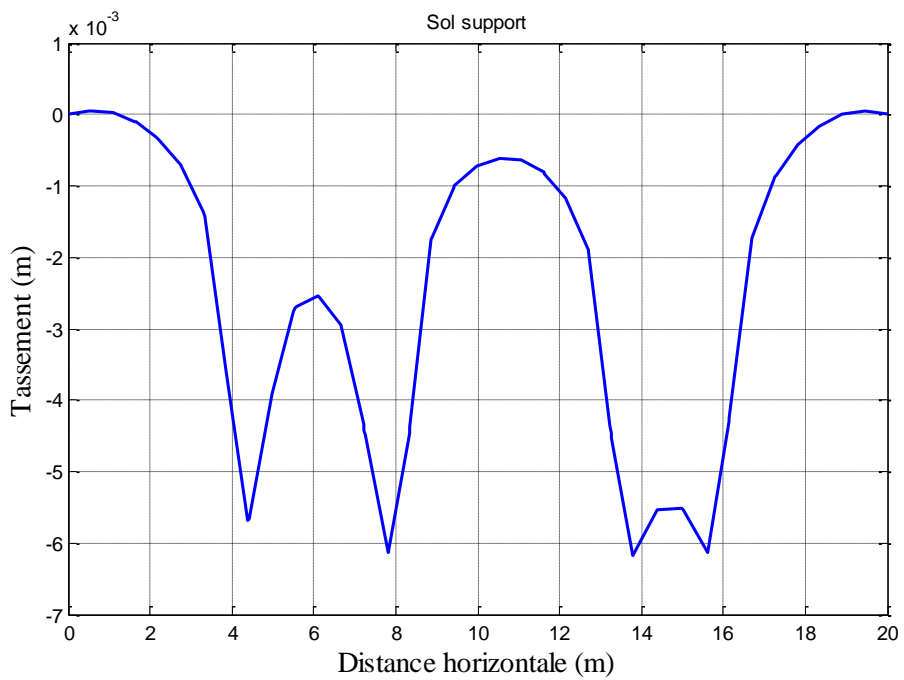


Figure 5.34. Variation des tassements sur IS^{SS} (Z=5.00m)

Les figures (5.30 à 5.34) représentent la variation des tassements sur les interfaces supérieures des couches du corps de chaussée, selon le cas étudié (TRS4E), les tassements maximaux sont localisés au-dessous des roues. L'interface la plus sollicitée en terme de déplacement (tassement) est la couche de roulement $U_z = 7.62 \cdot 10^{-3} \text{m}$ (Figure 5.35).

b. Tassements suivant la hauteur de la chaussée

Le tableau 5.5, représente l'évolution des tassements maximaux aux interfaces supérieures de chaque couche du corps de chaussée. Ils sont en mode décroissant d'une couche à une autre. (Figure 5.35)

Tableau 5.5. Tassements maximaux sur les interfaces des profils P[ES₁], P[ES₂], P[ES₃] et P[ES₄]

Interfaces	IS ^{CR} (Z=5.66m)	IS ^{CB} (Z=5.60m)	IS ^{CF} (Z=5.40m)	IS ^{CFR} (Z=5.20m)	IS ^{SS} (Z=5.00m)
Tassements sous la roue de P[ES ₁] (m)	7.62 10 ⁻³	7.49 10 ⁻³	7.01 10 ⁻³	6.48 10 ⁻³	5.64 10 ⁻³
Tassements sous la roue P[ES ₂] (m)	7.62 10 ⁻³	7.61 10 ⁻³	7.14 10 ⁻³	6.81 10 ⁻³	6.11 10 ⁻³
Tassements sous la roue P[ES ₃] (m)	7.62 10 ⁻³	7.56 10 ⁻³	7.16 10 ⁻³	6.82 10 ⁻³	6.16 10 ⁻³
Tassements sous la roue P[ES ₄] (m)	7.62 10 ⁻³	7.57 10 ⁻³	7.18 10 ⁻³	6.79 10 ⁻³	6.13 10 ⁻³

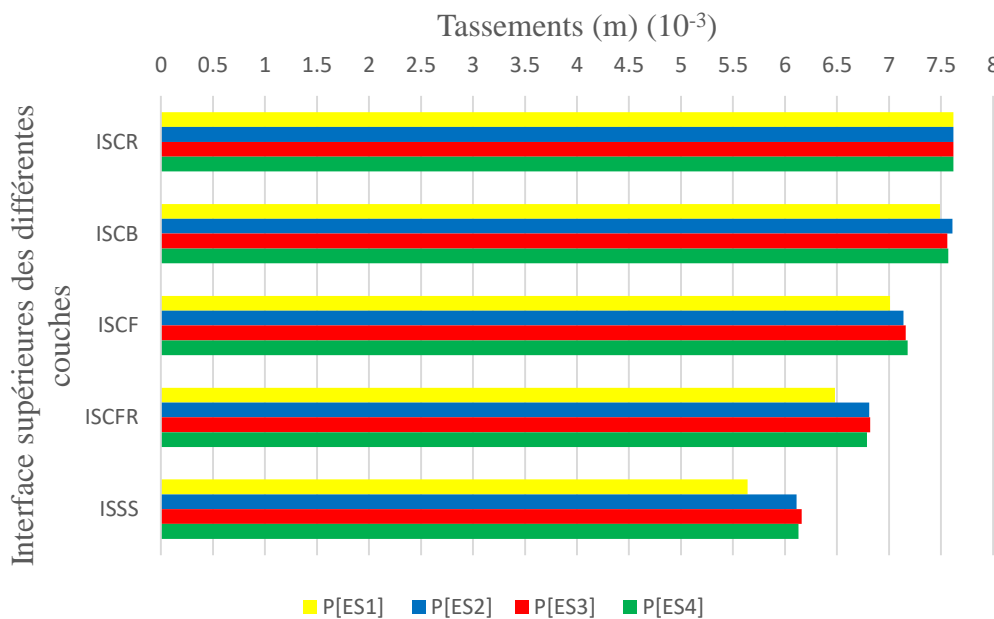


Figure 5.35. Tassements maximaux sur les interfaces supérieures des couches aux profils P[ES₁], P[ES₂], P[ES₃] et P[ES₄]

A travers le (Tableau 5.5) et la (Figure 5.35), les Tassements aux différents profils sont pratiquement les mêmes sauf pour ceux de P[ES₁] qui sont clairement moins importants que les

autres car la charge appliquée sous P[ES₁] est plus légère que les autres charges. Pour (IS^{CR}), les tassements sont égaux sur tous les profils ($U_Z = 7.62 \cdot 10^{-3}$ m).

Les figures (5.36, 5.37, 5.38 et 5.39), représentent l'évolution des tassements sur les profils P[ES₁], P[ES₂], P[ES₃] et P[ES₄]. Le tassement maximal obtenu se trouve à une profondeur de $Z=5.66$ m qui correspond à $U_Z = 7.62 \cdot 10^{-3}$ m et il diminue en fonction de la profondeur pour s'annuler à $Z=0$ m.

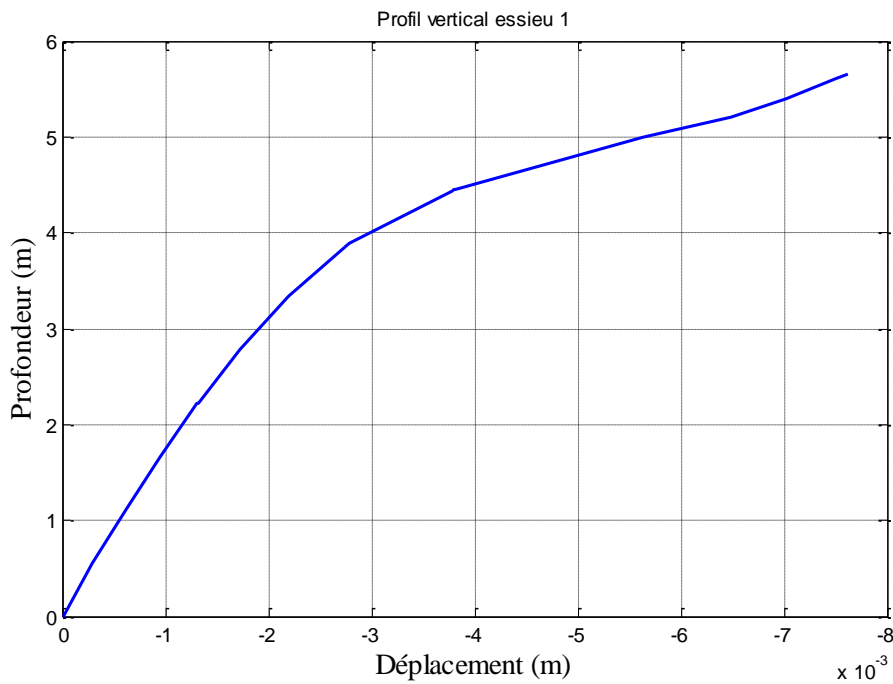


Figure 5.36. Evolution des tassements sous le profil P[ES₁]

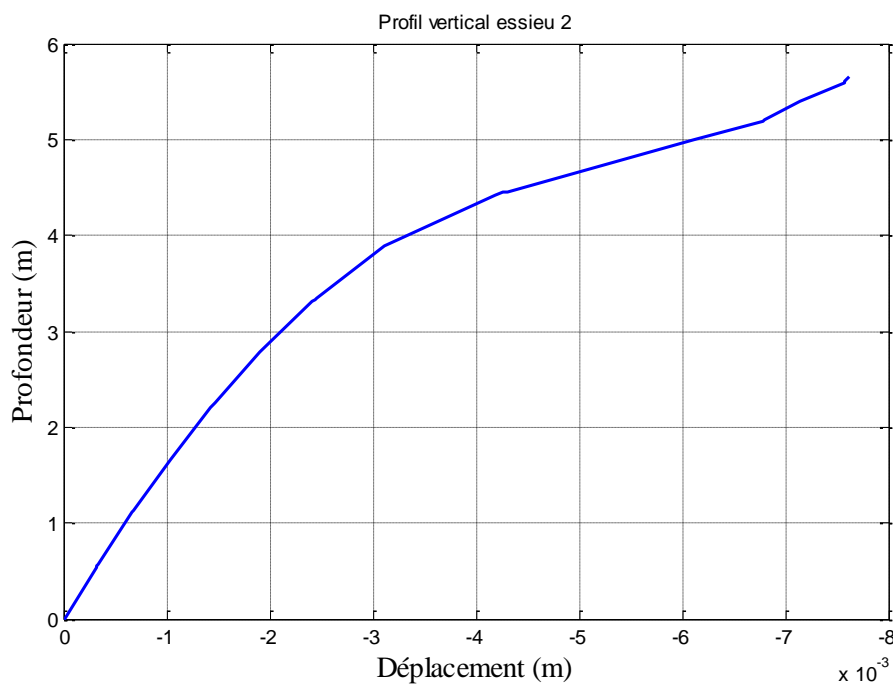


Figure 5.37. Evolution des tassements sous le profil P[ES₂]

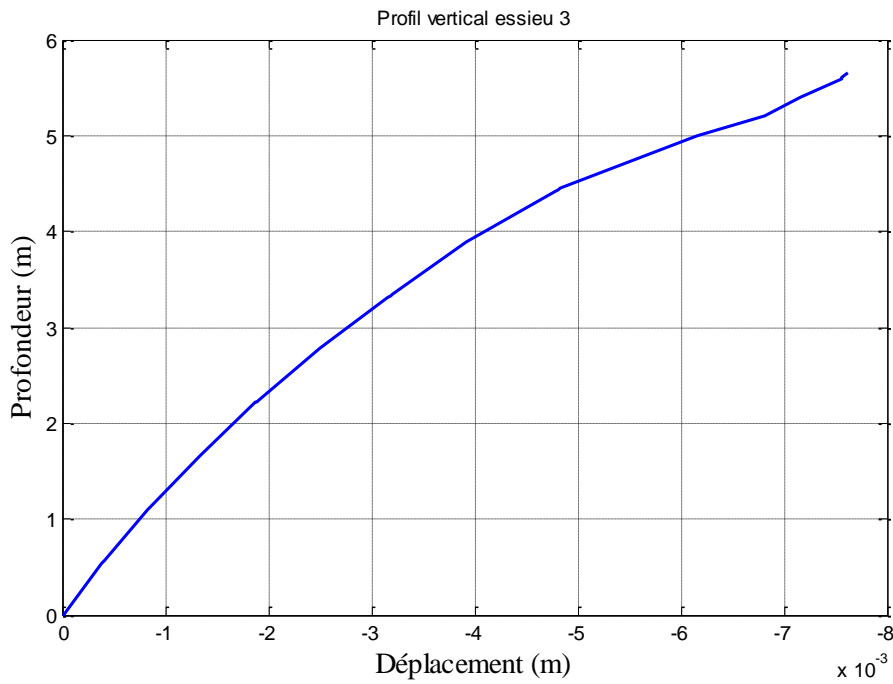


Figure 5.38. Evolution des tassements sous le profil P[ES₃]

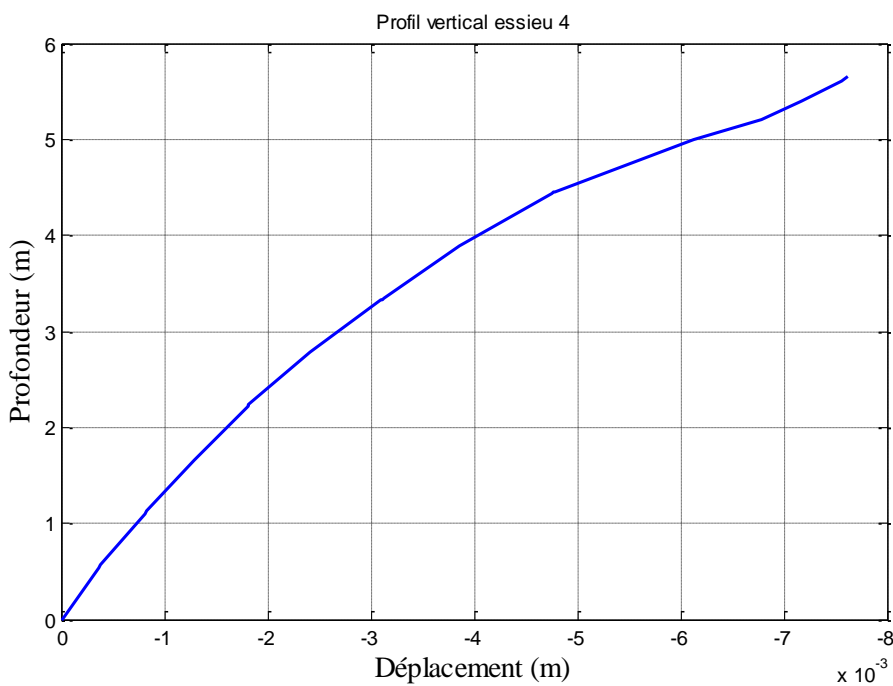


Figure 5.39. Evolution des tassements sous le profil P[ES₄]

5.4.4. Cas 04 : Passage d'un camion tracteur et semi-remorque à 5 essieux (TSR5E)

Le passage d'un camion tracteur et semi-remorque à 5 essieux sur une chaussée engendre des tassements qui se concentrent au-dessous de chaque roue (Figure 5.40)

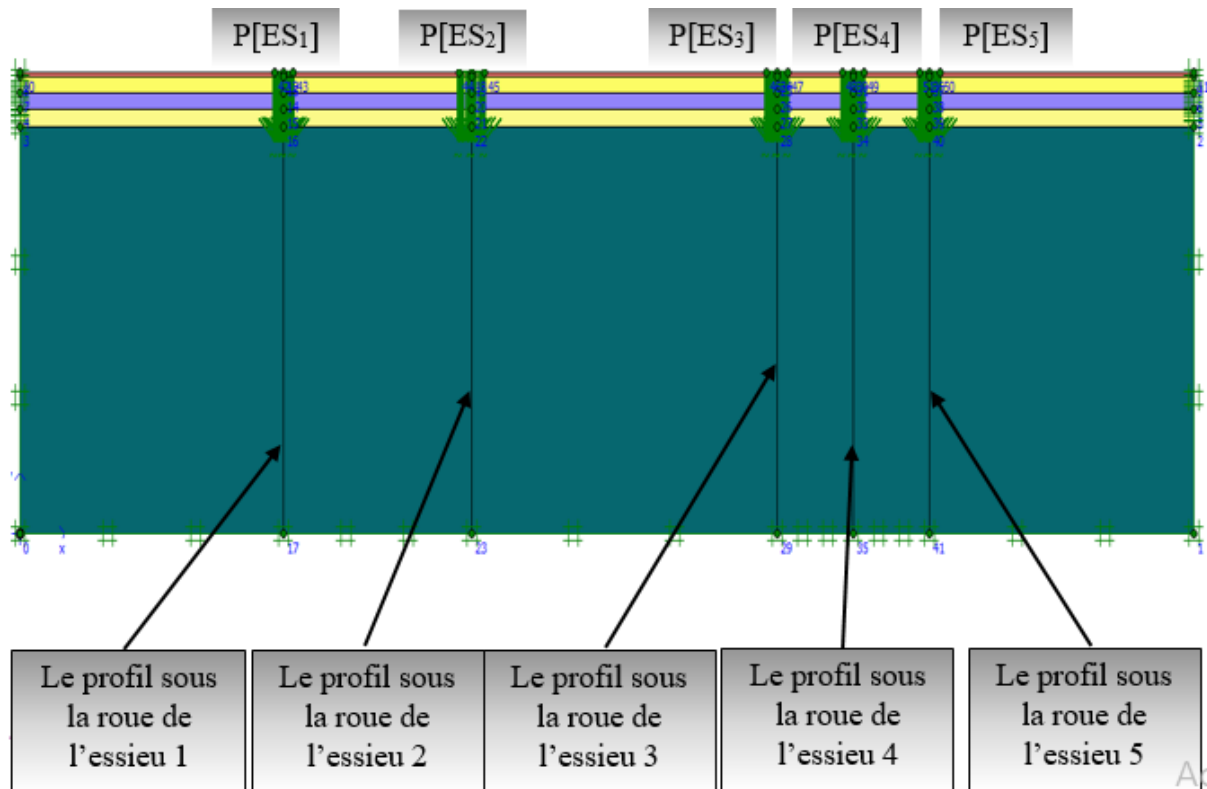


Figure 5.40. Tassements au-dessous des roues sous un déplacement imposé

La simulation de la charge dynamique du passage des camions est effectuée avec un déplacement imposé qui suit l'évolution illustrée dans la figure 5.41. (Ambassa, 2013)

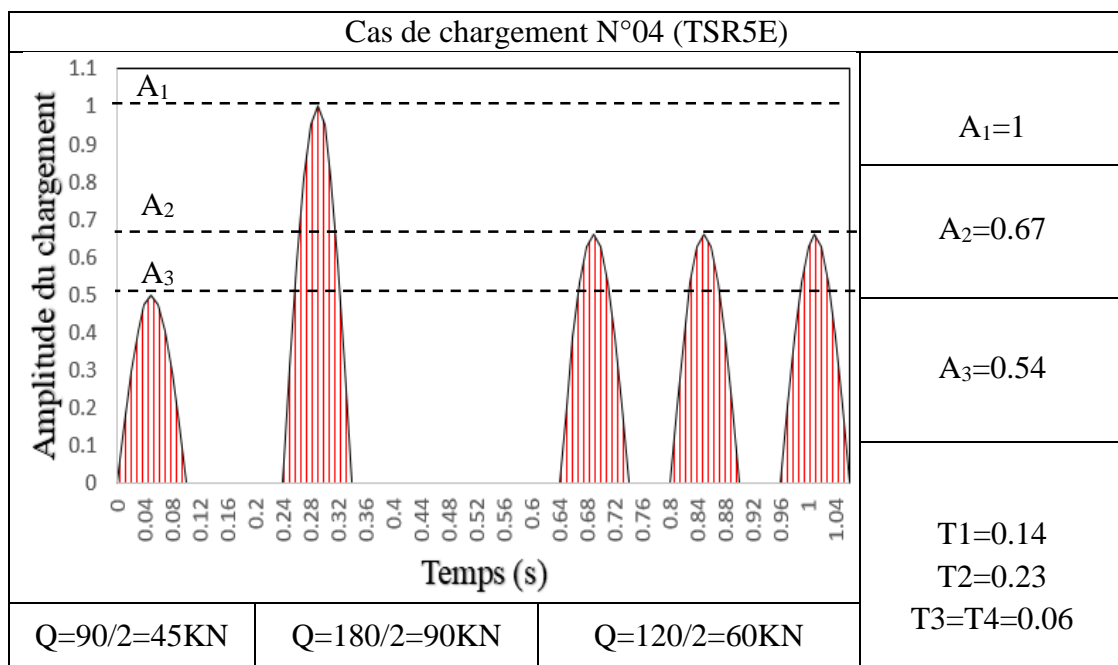


Figure 5.41. Chargement dynamique du passage du camion

a. Les tassements suivant le profil en long

Le passage du camion engendre des tassements sur les interfaces supérieures des couches du corps de chaussée représentés dans les figures suivantes (Figures 5.42 à 5.46).

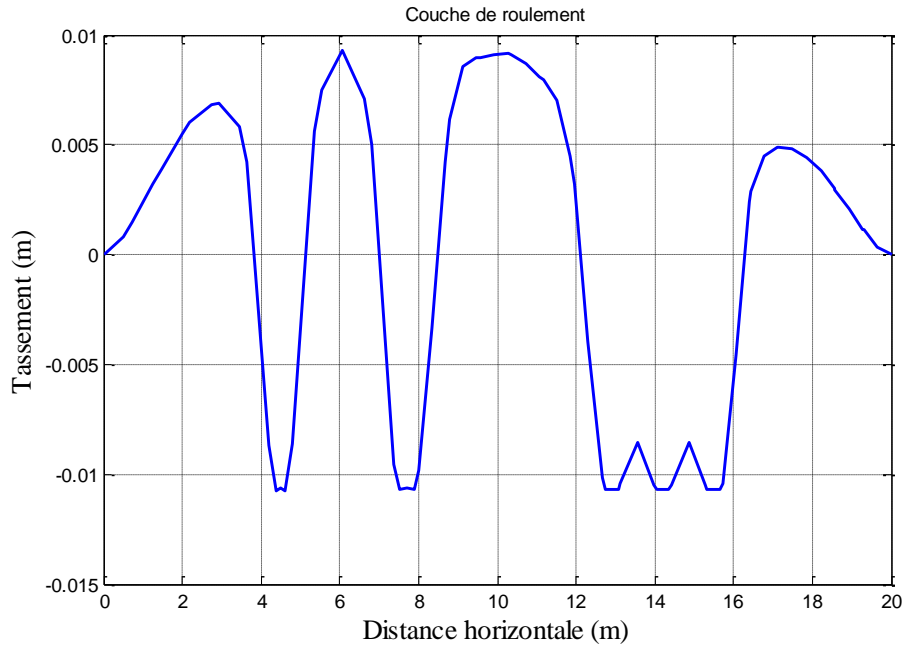


Figure 5.42. Variation des tassements sur IS^{CR} (Z=5.66m)

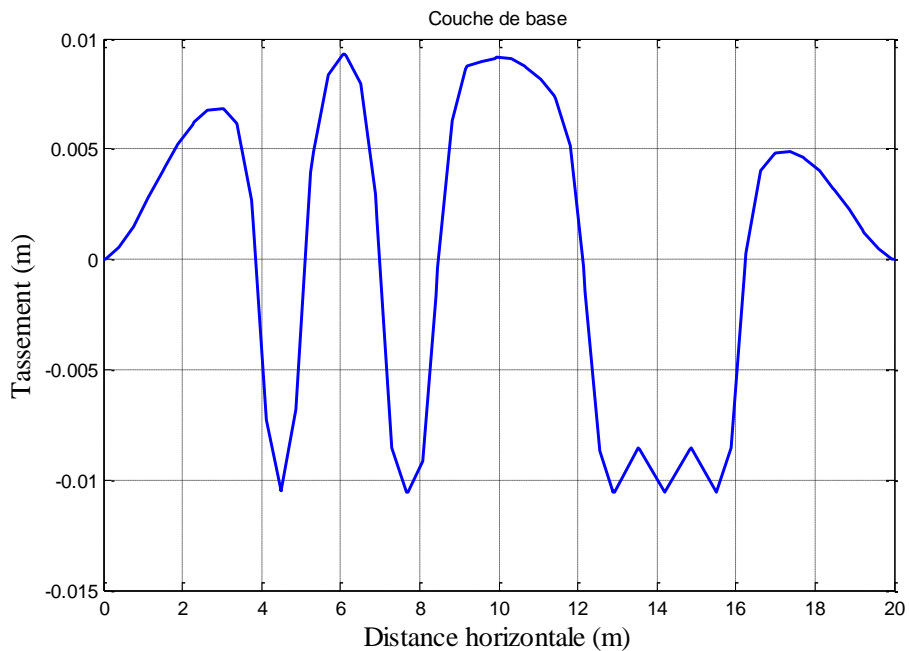


Figure 5.43. Variation des tassements sur IS^{CB} (Z=5.60m)

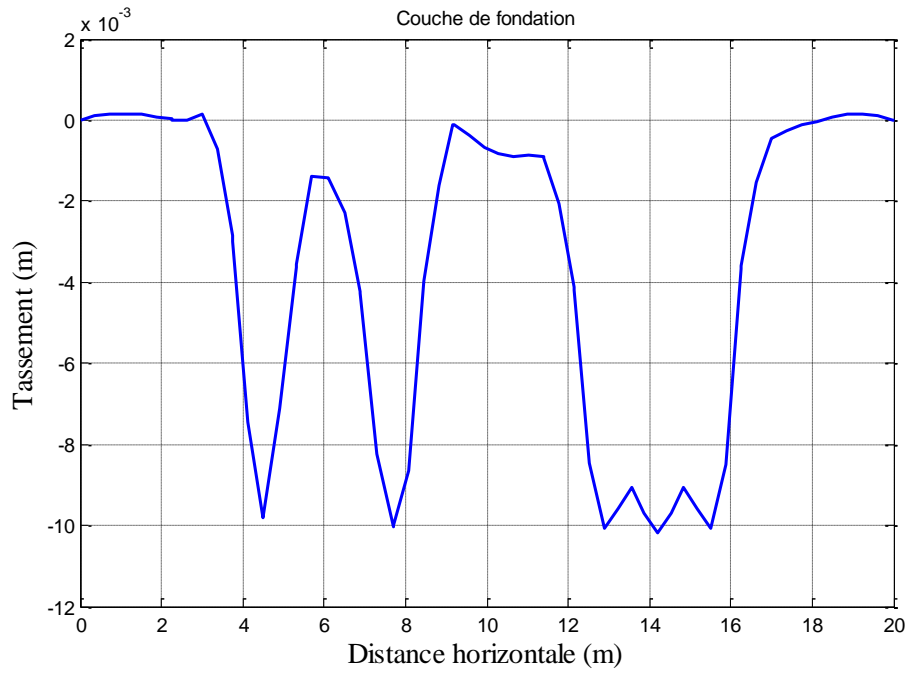


Figure 5.44. Variation des tassements sur IS^{CF} (Z=5.40m)

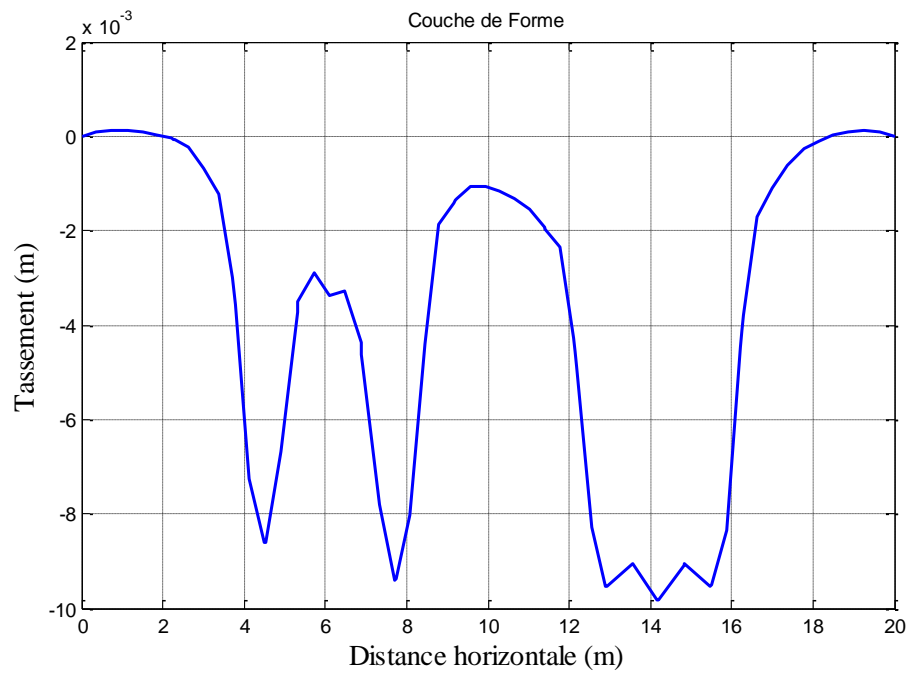


Figure 5.45. Variation des tassements sur IS^{CFR} (Z=5.20m)

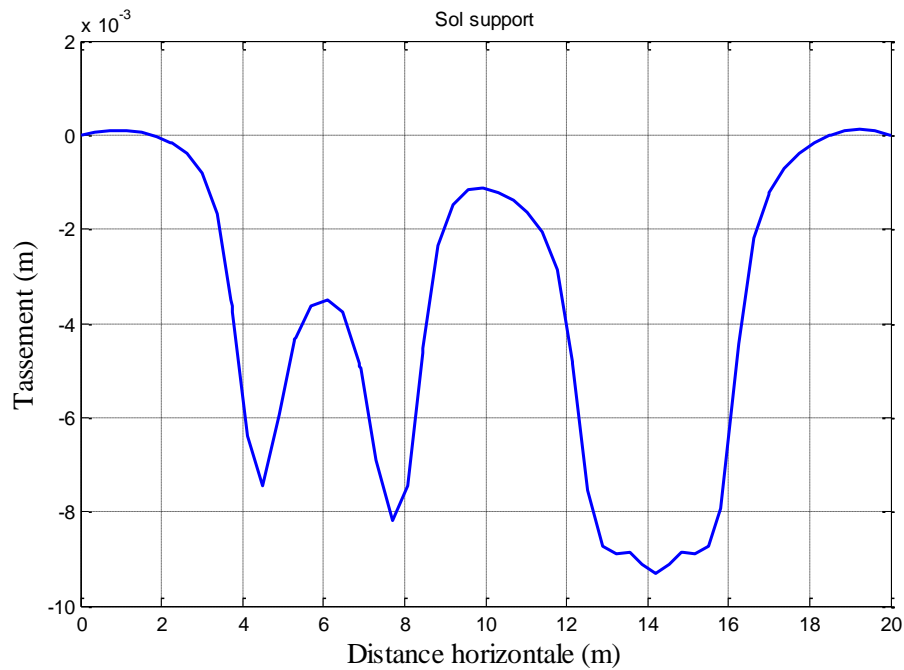


Figure 5.46. Variation des tassements sur IS^{SS} (Z=5.00m)

Les figures (5.42 à 5.46) représentent la variation des tassements sur les interfaces supérieures des couches du corps de chaussée, selon le cas étudié (TRS5E), les tassements maximaux sont localisés au-dessous des roues. L'interface la plus sollicitée en terme de déplacement (tassement) est la couche de roulement $U_z = 10.7 \cdot 10^{-3} \text{m}$ (Figure 5.47).

b. Tassements suivant la hauteur de la chaussée

Le tableau 5.6, représente l'évolution des tassements max aux interfaces supérieures de chaque couche du corps de chaussée. Ils sont en mode décroissant d'une couche à une autre (Figure 5.47).

Tableau 5.6. Tassements maximaux sur les interfaces des profils P[ES₁] et P[ES₂] et P[ES₃] et P[ES₄] et P[ES₅]

Interfaces	IS ^{CR} (Z=5.66m)	IS ^{CB} (Z=5.60m)	IS ^{CF} (Z=5.40m)	IS ^{CFR} (Z=5.20m)	IS ^{SS} (Z=5.00m)
Tassements sous la roue de P[ES ₁] (m)	10.7 10 ⁻³	10.4 10 ⁻³	9.81 10 ⁻³	8.66 10 ⁻³	7.50 10 ⁻³
Tassements sous la roue P[ES ₂] (m)	10.7 10 ⁻³	10.5 10 ⁻³	10.0 10 ⁻³	9.46 10 ⁻³	8.24 10 ⁻³
Tassements sous la roue P[ES ₃] (m)	10.7 10 ⁻³	10.5 10 ⁻³	10.1 10 ⁻³	9.56 10 ⁻³	8.76 10 ⁻³
Tassements sous la roue P[ES ₄] (m)	10.7 10 ⁻³	10.5 10 ⁻³	10.2 10 ⁻³	9.86 10 ⁻³	9.30 10 ⁻³
Tassements sous la roue P[ES ₅] (m)	10.7 10 ⁻³	10.5 10 ⁻³	10.1 10 ⁻³	9.54 10 ⁻³	8.73 10 ⁻³

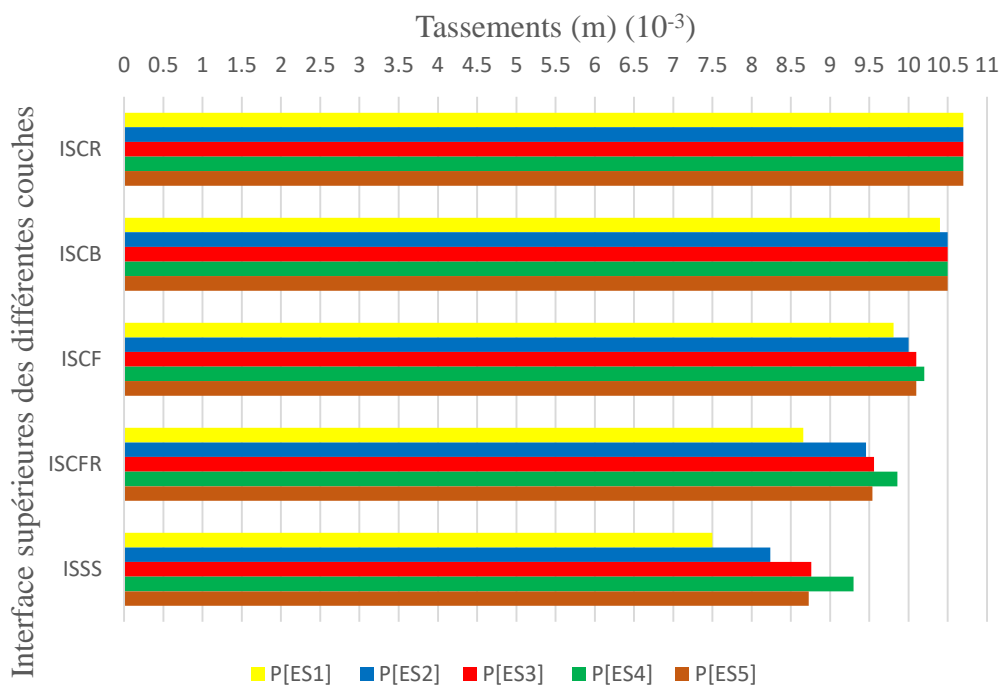


Figure 5.47. Tassements maximaux aux interfaces supérieures des couches aux profils P[ES₁] et P[ES₂] et P[ES₃] et P[ES₄] et P[ES₅]

A travers le (Tableau 5.6) et la (Figure 5.47), les tassements sous la roue de P[ES₁] sont clairement plus petits que les autres car la charge appliquée sous P[ES₁] est moins importante par rapport aux autres charges et les tassements sous la roue de P[ES₄] sont plus importants que

les tassements sous P[ES₂], P[ES₃] et P[ES₅]. Pour IS^{CR} et IS^{CB}, les tassements sont presque égaux ($10.7 \cdot 10^{-3}$ m) et ($10.5 \cdot 10^{-3}$ m).

Les figures (5.48 à 5.52), représentent l'évolution des tassements sur les profils P[ES₁],P[ES₂], P[ES₃],P[ES₄] et P[ES₅]. Le tassement maximal obtenu se trouve à une profondeur de Z=5.66m qui correspond à ($U_Z = 10.7 \cdot 10^{-3}$ m) et il diminue en fonction de la profondeur pour s'annuler à Z=0m.

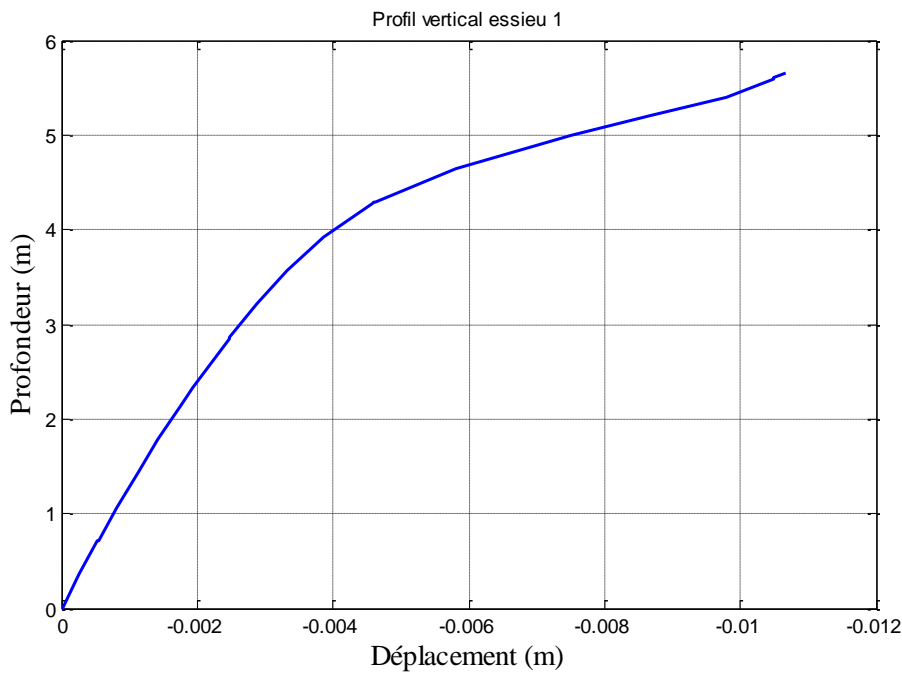


Figure 5.48. Evolution des tassements sous le profil P[ES₁]

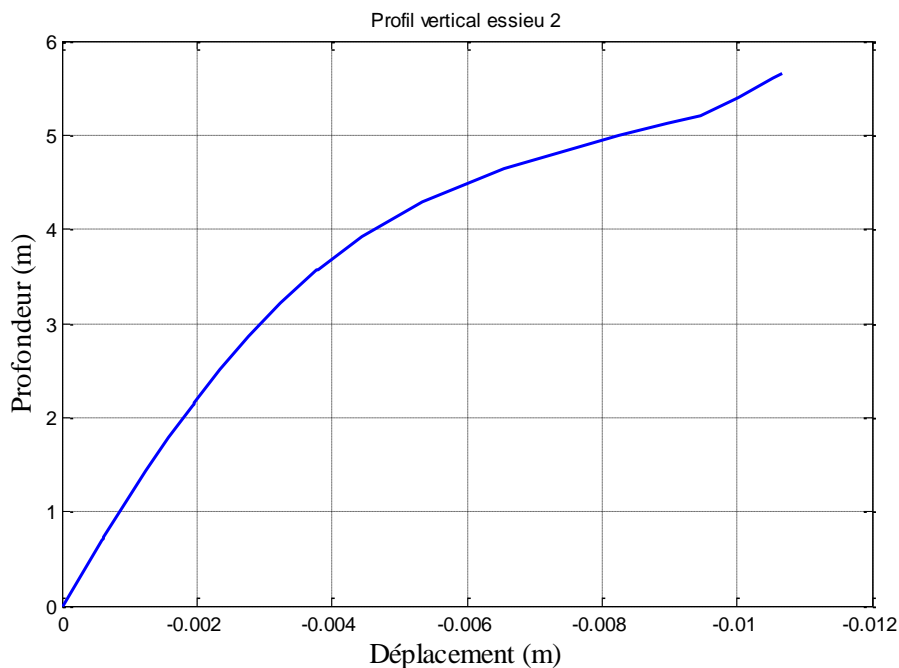


Figure 5.49. Evolution des tassements sous le profil P[ES₂]

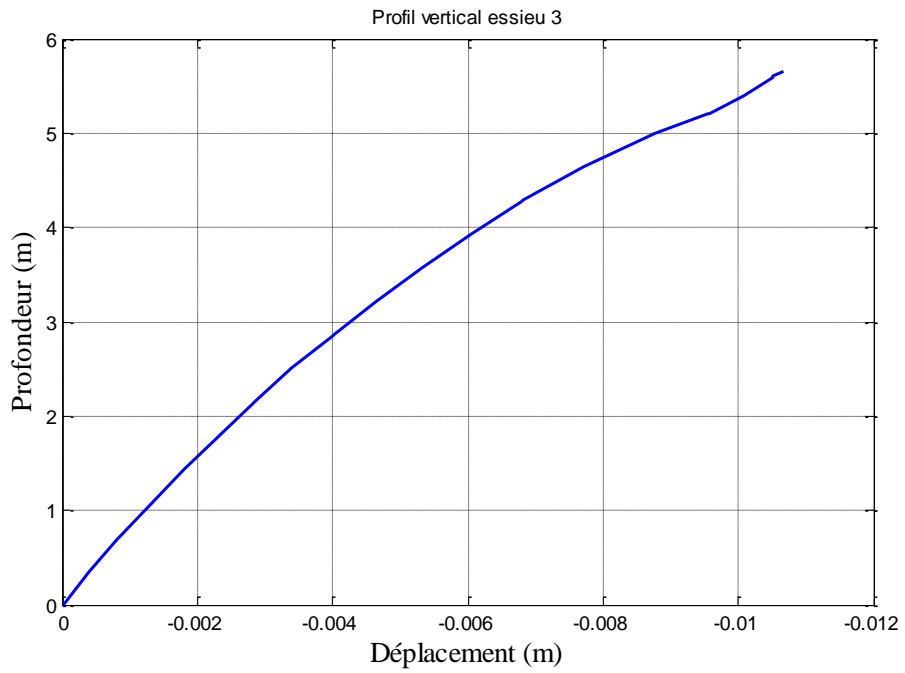


Figure 5.50. Evolution des tassements sous le profil P[ES₃]

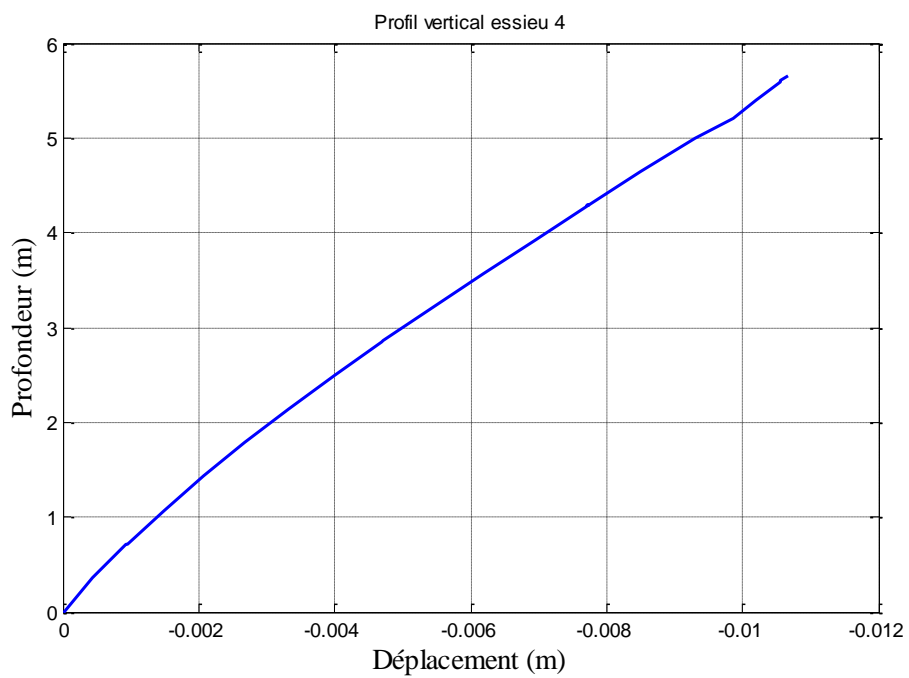


Figure 5.51. Evolution des tassements sous le profil P[ES₄]

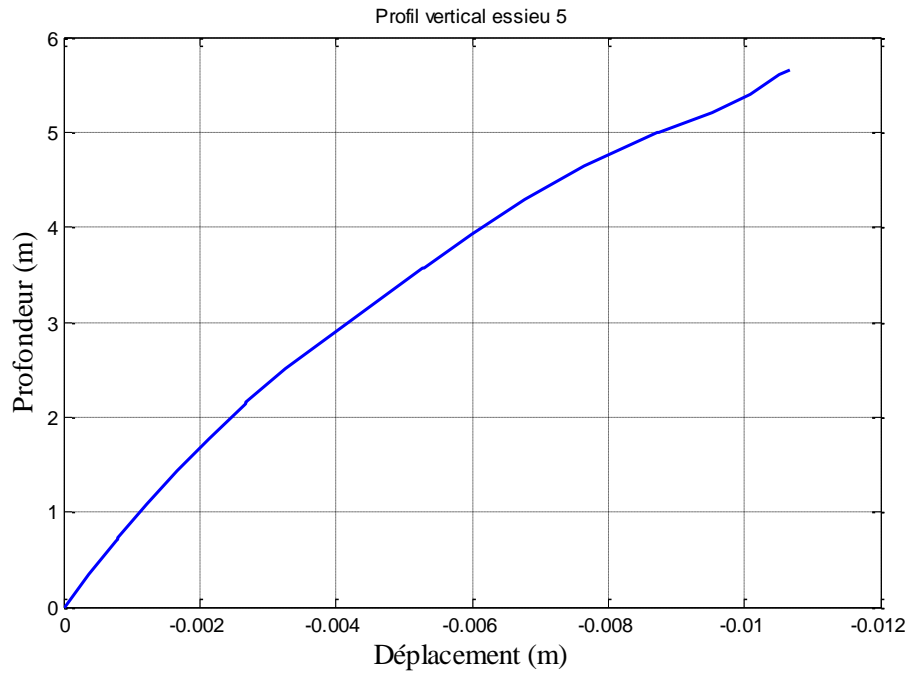


Figure 5.52. Evolution des tassements sous le profil P[ES₅]

5.5. Tassements sous la roue du P[ES₁] dans les 4 cas de chargement

Tableau 5.7. Tassements maximaux sur le P[ES₁] dans les différents cas du chargement

Les tassements maximaux sous la roue du P[ES ₁] (m)					
Différents cas	IS ^{CR} (Z=5.66m)	IS ^{CB} (Z=5.60m)	IS ^{CF} (Z=5.40m)	IS ^{CFR} (Z=5.20m)	IS ^{SS} (Z=5.00m)
CP2E	1.35 10 ⁻³	1.30 10 ⁻³	1.28 10 ⁻³	1.16 10 ⁻³	1.00 10 ⁻³
CP3E	3.13 10 ⁻³	2.97 10 ⁻³	3.12 10 ⁻³	2.76 10 ⁻³	2.25 10 ⁻³
TSR4E	7.62 10 ⁻³	7.49 10 ⁻³	7.01 10 ⁻³	6.48 10 ⁻³	5.64 10 ⁻³
TSR5E	10.7 10 ⁻³	10.4 10 ⁻³	9.81 10 ⁻³	8.66 10 ⁻³	7.50 10 ⁻³

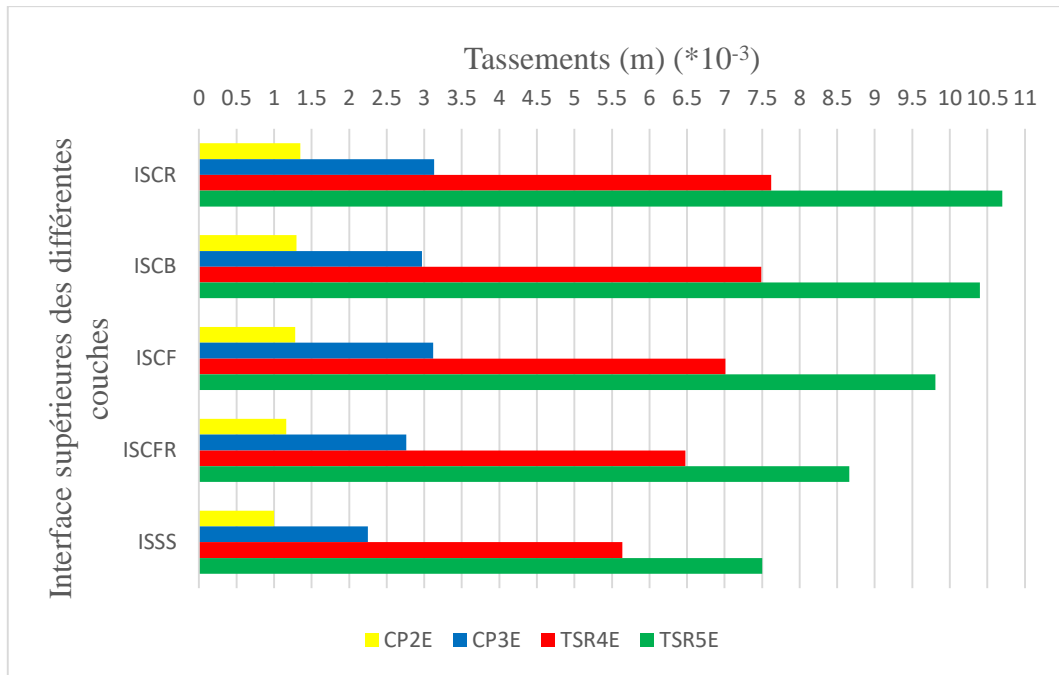


Figure 5.53. Tassements maximaux aux interfaces des couches du profil P[ES₁] dans les différents cas de chargement

Le tassement maximal obtenu se trouve dans le cas de (TSR5E) sur une profondeur Z=5.66m qui correspond à ($U_Z = 10.7 \cdot 10^{-3} \text{ m}$) puis il diminue en allant de plus en plus profond, et le tassement minimal obtenu est de ($U_Z = 1.35 \cdot 10^{-3} \text{ m}$) dans le cas de (CP2E) sur la même profondeur Z=5.66m.

Les figures (5.54 à 5.57), représentent l'évolution des tassements sur le profil P[ES₁] dans les différents cas.

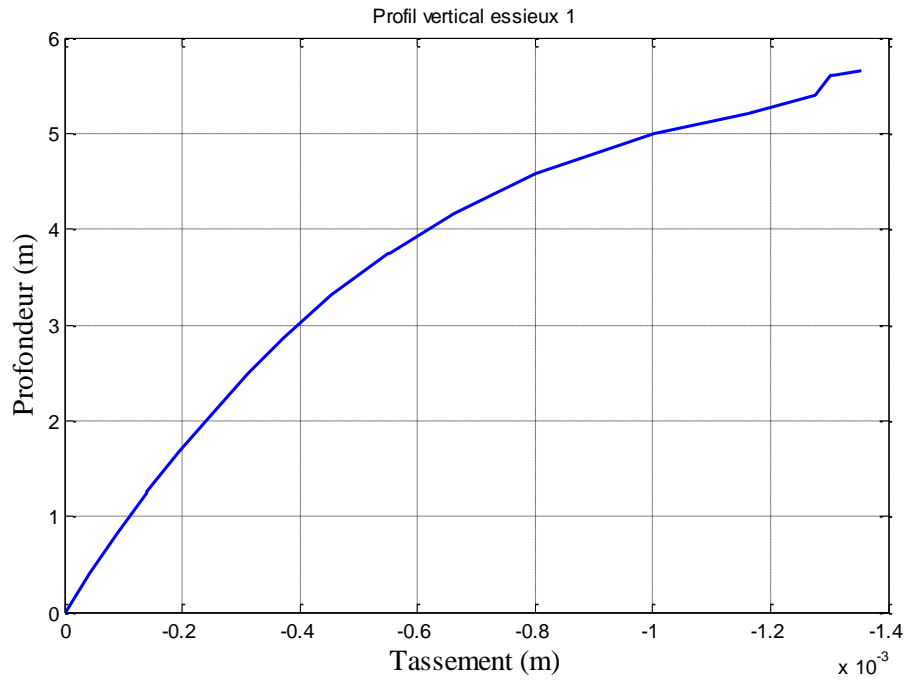


Figure 5.54. Evolution des tassements dans le cas (CP2E)

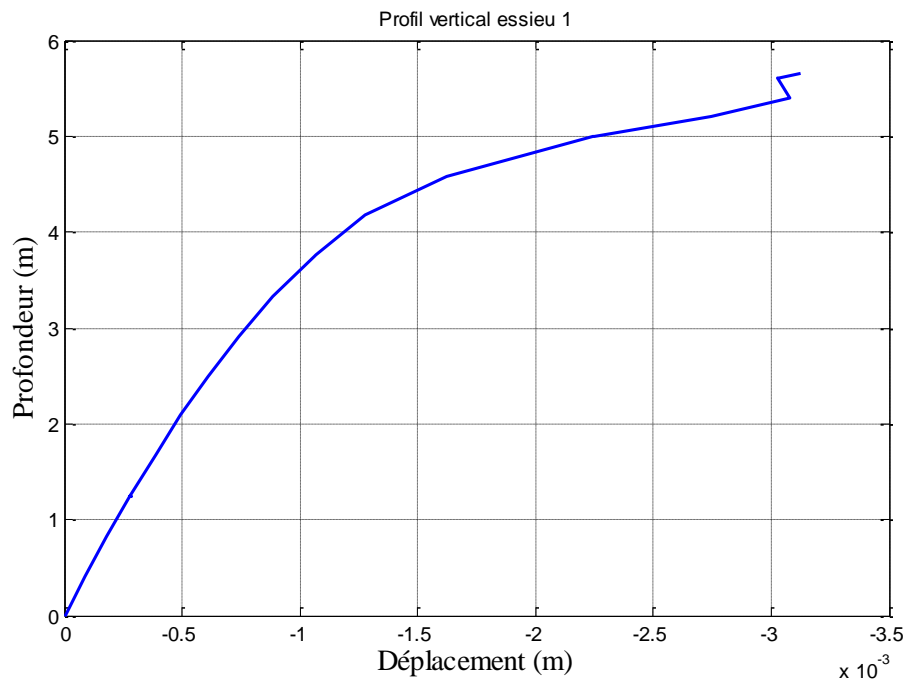


Figure 5.55. Evolution des tassements dans le cas (CP3E)

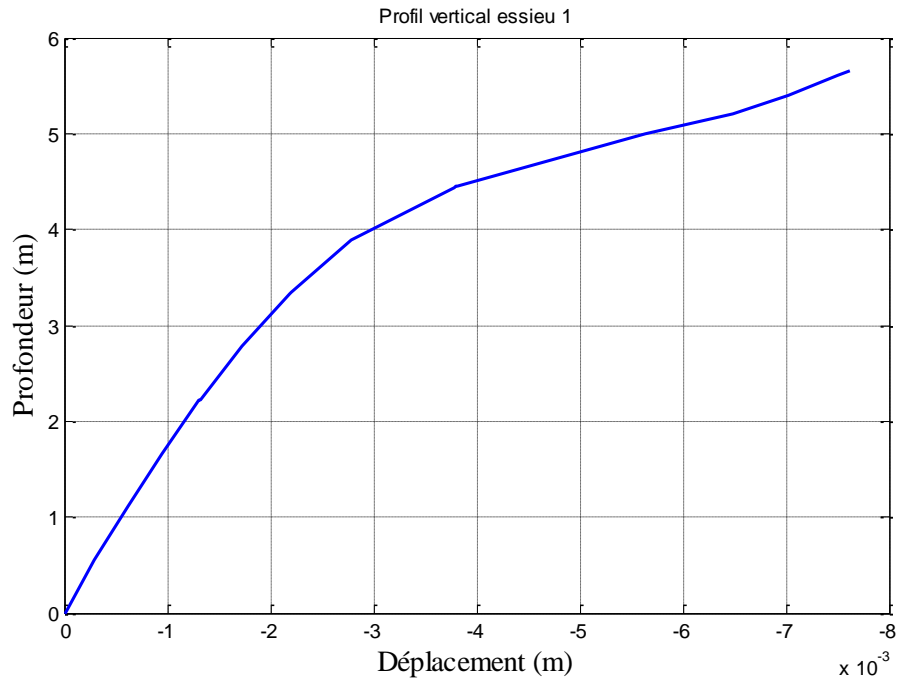


Figure 5.56. Evolution des tassements dans le cas (TSR4E)

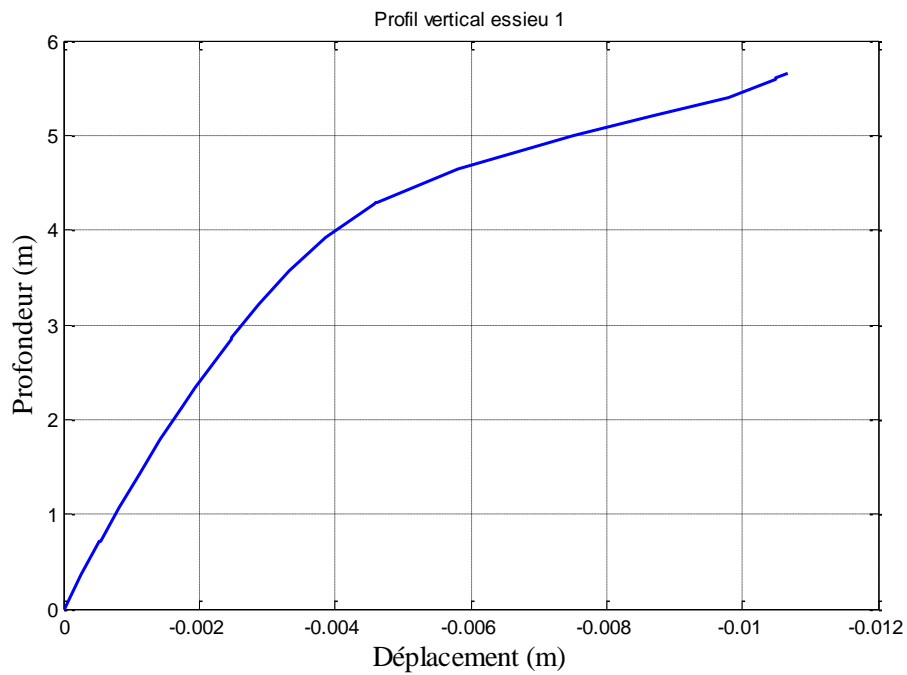


Figure 5.57. Evolution des tassements dans le cas (TSR5E)

5.6 Conclusion

L'oscillation du châssis dans l'axe vertical due à la réaction du système de suspension à la surface de la chaussée induit un chargement dynamique à l'interface entre les pneus et le revêtement.

Sur la base des résultats obtenus, les déplacements à la surface de contact concordent bien avec la réalité. Les tassements obtenus sous le passage d'un camion semi-remorque à 5 essieux (le cas le plus défavorable) sont plus importants par rapports aux autres cas.

Conclusion Générale

Le comportement des chaussées routières souples est sans aucun doute la compréhension de la variation de l'état de charge et de déformation y régnant durant le passage d'une charge de trafic. La détermination de ces sollicitations peut se réaliser selon des modélisations numériques.

Dans cette étude numérique, nous avons fixé comme objectif, l'étude de l'effet du trafic sur l'évaluation des tassements d'une chaussée souple. Le calcul de déformations et de tassements a été réalisé à l'aide du logiciel de calcul en éléments finis Plaxis 2D.

Les résultats obtenus après la modélisation montrent que :

- le tassement maximal obtenu lors du passage d'un camion porteur à deux essieux (CP2E) est localisé sur la couche de roulement ($U_z = 1.35 \cdot 10^{-3} \text{ m}$) ;
- un tassement maximal de ($U_z = 3.13 \cdot 10^{-3} \text{ m}$) est obtenu sur l'interface supérieure de la couche de roulement lors du passage d'un camion porteur à trois essieux (CP3E) ;
- au passage d'un tracteur semi-remorque à quatre essieux (TSR4E), un tassement maximal de ($U_z = 7.62 \cdot 10^{-3} \text{ m}$) est obtenu sur la l'interface supérieure de la couche de roulement ;
- un tassement maximal de ($U_z = 10.7 \cdot 10^{-3} \text{ m}$) est obtenu sur la couche de roulement du cas le plus défavorable (TSR5E).

On constate que, le corps de chaussée supporte la charge du trafic et qu'il n'a pas besoin d'améliorer ses caractéristiques.

Ce projet de fin d'études a été pour moi, une opportunité pour concrétiser mes connaissances théoriques et techniques acquises pendant mon cycle de formation et de mieux maîtriser le logiciel de modélisation PLAXIS 2D.

Références Bibliographiques

- ABDO Joseph, R. D. C. D. P. G. E. H., 2009. Voiries et aménagements urbains en béton (conception et dimensionnement).
- ACHOURI A, 2011. Contribution à l'étude de l'interaction et l'isolation dynamique des structures, Biskra : Université Mohamed Khider.
- AMBASSA Z, 2013. Vers la modélisation du comportement à la fatigue des chaussées bitumineuses routières sous chargement réel, LIMOGES : Ecole Doctorale 522 : Science et Ingénierie en Matériaux, Mécanique, Energétique et Aéronautique.
- BILODEAU Jean-Pascal, DORE Guy, CALVAR Alexandre. Avril 2017. Détermination de la résistance à la déformation permanente des matériaux granulaires de fondation de chaussées. Université Laval
- BRINKGREAVE R, 2003. PLAXIS version 8. Manuel de référence. Plaxis b.v. P.O. Box 572. Éd. Pays-Bas : DELFT.
- BRUNEL H, 2004-2005. Cours de route. Orléans.
- CEBON D. 1999. Handbook of vehicle-road interaction, Swets & Zeitlinger Publishers
- COQUAND R, 1978. Route. Circulation-Tracé-Construction. Livre 2. Sixième édition éd. s.l.Eyrolles.
- COQUAND R., 1985. Routes. Circulation-Tracé-Construction. EYROLLES éd. Paris : huitième édition.
- DIAKHATE M., 2007. Fatigue et comportement des couches d'accrochage dans les structure de chaussée, Limoges : Ecole Doctorale Science- Technologie -Santé.
- DUBOIS Guillaume, 2012. Modèle de contact dynamique pneumatique/chaussée par approche multi-aspérités : application au bruit de roulement. Thèse de doctorat. Thèse de doctorat. Ecole centrale de Nantes.
- MENGUE Emmanuel, H. M. L. L. R. M. E., 2015. Dimensionnement d'une assise de chaussée à base d'un sol latéritique traité au ciment à différents dosages. HAL, Issue hal-01167731.
- EUROVIA, 2010. Dimensionnement des chaussées souples par méthode mécanistique. Québec.
- FAHIMI Jida. Étude de l'effet des charges dynamiques sur la chaussée. Université Laval
- FAURE M, 1998. Route. Cours de l'ENTPE, Tome 2.
- HAMLAT S, 2007. Étude de la résistance des revêtements routiers aux sollicitations tangentielles, Thèse de Doctorat, École Centrale de Nantes, France,
- HOUDA H, 2010. Etude numérique d'un mur de soutènement en sol stabilisé et renforcé avec fibres et géogrilles, Annaba : Université Badji Mokhtar.

- HUANG Y H, (1993). "Pavement Analysis and Design", Prentice-hall : Englewood Cliffs.
- JEUFFROY G, 1974. "Conception et construction des chaussées", Tome 2 "les matériaux, les matériels, les techniques d'exécution des travaux. Troisième édition éd. s.l.Eyrolles.
- KOITER W, 1960. General Theorems for Elastic-Plastic Solids. In : Progress in Solid Mechanics.
- LAMRI I, 2008. Etude du comportement d'un sol cohérent sous chargement mon tonique et cyclique, Skikda : Université 20 Aout 1955.
- LCPC, 1994. Conception et dimensionnement des structures de chaussée (guide technique). Paris.
- LCPC SETRA, 2000. Réalisation des remblais et des couches de forme ; Guide technique fascicule 1et 2. Deuxième Edition éd. Paris.
- LCPC, 1998, a, Catalogue des structures types de chaussée neuves. Paris.
- LCPC, 1998, b, Méthodes d'essai N°52 Complément à la méthode d'essai N°38-2 (Catalogue des dégradations de surface des chaussées). Paris : LCPC.
- MANYO Edem Yawo, 2019. Modélisation avancée du contact pneu-chaussée pour l'étude des dégradations des chaussées en surface. Thèse de doctorat de l'université de LIMOGES.
- MEKSAOUINE Mohammed, 2011. Étude par éléments finis du comportement du sol environnant un pieu sous sollicitation horizontale, Annaba : université Badji Mokhtar.
- MEZIANI F, 2008. Amélioration des caractéristiques mécaniques d'une couche de chaussée souple par des matériaux composites, Tizi Ouzou : UMMTO.
- SETRA (Service d'étude sur les transports, les routes et leurs aménagements), 2010. Impact des systèmes de suspension des poids lourds sur la préservation des infrastructures. France.