

République Algérienne Démocratique 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

Influence de la nature du trafic sur les tassements d'une chaussée souple

Proposé et dirigé par :
M^{me} MEZIANI F.
M. KAHIL A.

Présenté par :
M. SIAHMED HADDI Nassim

Promotion: 2018 / 2019

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma gratitude ainsi que mes remerciements pour toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation.

Je tiens d'abord à remercier M^{me} MEZIANI F. pour son encadrement, son aide et son encouragement durant toute l'année afin de pouvoir achever ce projet.

Je tiens à remercier également M. KAHIL A. pour son soutien, sa disponibilité et ses conseils qui m'ont permis d'avancer dans ce projet.

Je tiens aussi à exprimer mes sincères remerciements pour tous les enseignants du département Génie Civil.

Mes profonds remerciements pour les membres de jury qui ont accepté d'évaluer ce travail.

Dédicaces

Pour ceux qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui,

Mes chers parents

*Pour ceux qui m'ont accompagné durant tous mon parcours scolaire, qui m'ont
poussé pour aller encore plus loin malgré les circonstances, mon frère Larbi et
sa femme mes sœurs Kaïssa Katia et leurs époux*

Ma sœur Samia

*Aux petits enfants qui ont su me faire garder le sourire dans les moments
difficiles : Wassim, Eliane et Younes,*

Ma chère femme Liza,

Ma belle-famille : Mustapha, Fercudja, Lilia et Kenza

*Pour toutes les personnes qui ont rejoint le ciel avant de pouvoir assister à ce
moment : mes grands-mères Sadia et El djouher,*

Aux bêtisiers avec qui j'ai dû grandir et apprendre la vie : mes amis,

La terre de mes aïeux, mon Algérie,

Je vous dédie ce modeste travail

Liste des abréviations

Indices	Désignations
P	Pression
T	Trafic
PL	Poids lourd
ε	Déformation
N	Nombre de cycle de sollicitation
γ	Poids volumique
E	Module de Young
ν	Coefficient de poisson
ϕ	Angle de frottement
C	Cohésion
Ψ	Angle de dilatance
K_0	Coefficient des terres au repos
Uz	Tassement
z	Profondeur
LG	Véhicule léger
LR	Véhicule lourd

Sommaire

Introduction Générale	1
------------------------------------	----------

chapitre 01 : Généralités sur les chaussées

1.1. Introduction.....	2
1.2. Définition	2
1.3. Les couches principales de la chaussée.....	2
1.4. Les structures des chaussées.....	4
1.4.1. Les chaussées souples	4
1.4.2. Les chaussées bitumineuses épaisses	4
1.4.3. Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques	5
1.4.4. Les chaussées à structures mixte	5
1.4.5. Les chaussées à structure inverse	6
1.4.6. Les chaussées en béton de ciment.....	6
1.4.7. Les chaussées composites	8
1.4.8. Les chaussées rigides.....	8
1.5. Construction des chaussées souples	9
1.5.1. Couche de fondation	9
1.5.2. Couche de base	11
1.5.3. Couche de surface	11
1.6. Matériaux utilisés dans la construction des chaussées.....	13
1.6.1. Les matériaux durs à granulométrie serrée	13
1.6.2. Les matériaux à éléments fins	14
1.6.3. Liants hydrocarbonés : bitume et goudron.....	14
1.6.4. Emploi dans les chaussées de matériaux synthétiques	15
1.7. Conclusion	15

Chapitre 02 : Résistance mécanique d'une chaussée

2.1. Introduction.....	16
2.2. Le trafic.....	16
2.2.1. Les différentes classes de trafic.....	16
2.2.2. Effet du passage du trafic sur les chaussées	17
2.3. Comportement mécanique des enrobés bitumineux	17
2.4. Sollicitations des couches de chaussées	19
2.4.1. Actions des véhicules sur les chaussées.....	19
a. Efforts verticaux.....	19
b. Sollicitationstangentielles.....	20
c. Efforts de cisaillement	21
d. Actions dynamiques	22
e. Les vibrations	22
f. Durée d'application des charges.....	23
g. Répétition des charges	23
2.4.2. L'environnement	23
2.5. Causes de rupture des chaussées souples	24
2.5.1. Le trafic.....	25
2.5.2. Les conditions climatiques	25
2.5.3. Les malfaçons	26
2.5.4. Les accidents et les incidents	27
2.6. Les dégradations des structures de chaussées	27
2.6.1. Les fissurations	27

2.6.2. Les déformations	29
a. Affaissement	30
b. Orniérage	30
c. Bourrelet	31
d. Flache.....	31
2.6.3. Les arrachements	32
a. Pelade	32
b. Nid de poule.....	32
c. Plumage.....	33
2.6.4. Les remontées	33
a. Ressuage	33
b. Remontée d'eau et d'éléments fins.....	34
2.7. Conclusion	34

Chapitre 03 : Présentation du logiciel de simulation << PLAXIS >>

3.1. Introduction.....	36
3.2. Présentation du logiciel (Plaxis)	36
3.3. Les sous programmes de Plaxis	36
3.3.1. Le programme d'entrée de données	36
3.3.2. Le programme de calcul.....	37
3.3.3. Le programme des résultats	39
a. Les contraintes	39
b. Les déformations	39
c. Le programme courbe.....	40
3.4. Etapes de modélisation	41
3.4.1. La géométrie	41
3.4.2. Les conditions aux limites	41
3.4.3. Définition des paramètres des matériaux	42
3.4.4. Le maillage	42
3.4.5. Les conditions initiales.....	42
3.4.6. Phase de calcul.....	43
3.4.7. Visualisation des résultats	44
3.5. Les modèles de comportement utilisés dans « PLAXIS »	45
3.5.1. Modèle élastique linéaire	45
3.5.2. Modèle de Mohr-Coulomb	45
a. Le module de Young « E ».....	46
b. Coefficient de poisson « ν »	47
c. L'angle de frottement « ϕ »	47
d. La cohésion « C »	48
e. L'angle de dilatance « ψ ».....	48
3.5.3. Modèle pour les sols mous « Soft Soil model »	48
3.5.4. Modèle de sol avec écrouissage « Hardening Soil Model ».....	49
3.5.5. Modèle pour les sols mous avec fluage « Soft Soil creep model »	49
3.5.6. Modèle pour les roches fracturées « Jointed Rock model »	49
3.5.7. Modèle défini par l'utilisateur « user defined model »	49
3.6. Conclusion	50

Chapitre 04 : Résultats et Interprétations

4.1. Introduction.....	51
4.2. Le modèle géométrique	51
4.3. Modélisation numérique	52
4.3.1. Maillage et conditions aux limites	52

4.3.2. Les conditions initiales	53
a. Conditions hydrauliques	53
b. Contraintes initiales	54
4.4. Influence du trafic sur les tassements.....	55
4.4.1. Cas 01 : Passage d'un véhicule léger sur une seule voie (LG-0).....	56
4.4.2. Cas 02 : Passage de véhicule léger sur les deux voies (LG-LG)	59
4.4.3. Cas 03 : passage d'un véhicule lourd sur une seule voie (LR-0)	62
4.4.4. Cas 04 : Passage de véhicule lourd sur les deux voies (LR-LR).....	65
4.4.5. Cas 05 : passage de véhicules lourds et légers sur les deux voies (LR-LG)	69
4.5. Conclusion	73
Conclusion Générale	74

Références Bibliographiques

Liste des figures

Chapitre 01 : Généralités sur les chaussées

Figure 1.1.	Coupe transversale d'un corps de chaussée	3
Figure 1.2.	Structure d'une chaussée souple	4
Figure 1.3.	Structure d'une chaussée bitumineuse épaisse	5
Figure 1.4.	Structure d'une chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques	5
Figure 1.5.	Structure d'une chaussée à structure mixte	6
Figure 1.6.	Structure d'une chaussée à structure inverse.....	6
Figure 1.7.	Structure d'une chaussée à dalles non goudonnées avec fondation	7
Figure 1.8.	Structure d'une chaussée à dalles goudonnées avec fondation	7
Figure 1.9.	Structure d'une chaussée en béton armé continu.....	7
Figure 1.10.	Structure d'une chaussée en béton de ciment mince collé	8
Figure 1.11.	Structure d'une chaussée en béton armé continu sur grave bitume	8
Figure 1.12.	Structure type d'une chaussée rigide.....	9

Chapitre 02 : Résistance mécanique d'une chaussée

Figure 2.1.	Comportement mécanique "type" des enrobés bitumineux	18
Figure 2.2.	Fonctionnement d'une structure de chaussée sous l'application d'une charge roulante	20
Figure 2.3.	Fonctionnement d'une chaussée sous sollicitations liées au trafic	21
Figure 2.4.	Effet de la température sur la structure de chaussée	24
Figure 2.5.	Passage d'une charge roulante.	25
Figure 2.6.	Mouvement sous variation thermique.....	26
Figure 2.7.	Fissures transversales.....	27
Figure 2.8.	Fissures longitudinales	28
Figure 2.9.	Fissures d'adaptation	28
Figure 2.10.	Faïençages à maille fines	29
Figure 2.11.	Fissures diverses.....	29
Figure 2.12.	Affaissements d'une chaussée	30
Figure 2.13.	Orniérage.....	30
Figure 2.14.	Bourrelet.....	31
Figure 2.15.	Flache.....	31
Figure 2.16.	Pelade	32
Figure 2.17.	Nid de poule	32
Figure 2.18.	Plumage	33
Figure 2.19.	Ressuage.....	33
Figure 2.20.	Remontée d'éléments fins	34

Chapitre 03 : Présentation du logiciel de simulation << PLAXIS >>

Figure 3.1.	Fenêtre principale du programme d'entrée des données	37
Figure 3.2.	Fenêtre principale du programme de calcul.	38
Figure 3.3.	Fenêtre de calcul.	38
Figure 3.4.	Barre d'outils de la fenêtre principale du programme des résultats	39
Figure 3.5.	Interface graphique Curves.	40
Figure 3.6.	Organigramme de modélisation avec PLAXIS	44
Figure 3.7.	Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire.	45
Figure 3.8.	Fenêtre des paramètres de modèle du Mohr-Coulomb.	46
Figure 3.9.	Définition du module à 50 % de la rupture	47

chapitre 04 : Résultats et Interprétation

Figure 4.1.	Modèle géométrique du corps de chaussée.	51
Figure 4.2.	Maillage et conditions aux limites du corps de chaussée	53
Figure 4.3.	Position de la nappe phréatique.	54
Figure 4.4.	Génération des contraintes.....	54
Figure 4.5.	Pression transmise par les véhicules sur la chaussée	55
Figure 4.6.	Interfaces des couches du corps de chaussée.....	55
Figure 4.7.	Position des profils en X sous les roues (Cas 01 : LG-0).....	56
Figure 4.8.	Évolution des tassements sur les interfaces supérieures (Cas01 : LG-0).	56
Figure 4.9.	Évolution des tassements selon les profils A et B (Cas 01 : LG-0).	57
Figure 4.10.	Tassements finaux sous R[A] et R[B]-(Cas 01 : LG-0).....	58
Figure 4.11.	Position des profils en X sous les roues (Cas 02 : LG-LG).	59
Figure 4.12.	Évolution des tassements sur les interfaces supérieures (cas02 : LG-LG).	60
Figure 4.13.	Évolution des tassements selon les profils A, B, C et D (Cas 02 : LG-LG).....	61
Figure 4.14.	Tassements finaux sous R[A], R[B], R[C] et R[D]-(Cas02 : LG-LG).....	62
Figure 4.15.	Position des profils en X sous les roues (Cas 03 : LR-0).	63
Figure 4.16.	Évolution des tassements sur les interfaces supérieures (Cas03 : LR-0).....	63
Figure 4.17.	Évolution des tassements selon les profils A et B (Cas 03 : LR-0).	64
Figure 4.18.	Tassements finaux sous R[A] et R[B]-(Cas03 : LR-0).....	65
Figure 4.19.	Position des profils en X sous les roues (Cas 04 : LR-LR).	66
Figure 4.20.	Évolution des tassements sur les interfaces supérieures (Cas 04 : LR-LR).....	66
Figure 4.21.	Évolution des tassements selon les profils A, B, C et D (Cas 04 : LR-LR).	68
Figure 4.22.	Tassements finaux sous R[A], R[B], R[C] et R[D]-(Cas04 : LR-LR)	68
Figure 4.23.	Position des profils en X sous les roues (Cas 05 : LR-LG).....	69
Figure 4.24.	Évolution des tassements sur les interfaces supérieures (cas05 : LR-LG).	70
Figure 4.25.	Évolution des tassements selon les profils A, B, C et D (Cas 05 : LR-LG).	71
Figure 4.26.	Tassements finaux sous R[A], R[B], R[C] et R[D]-(Cas 05 : LR-LG)	72

Liste des tableaux

Chapitre 03 : Présentation du logiciel de simulation << PLAXIS >>

Tableau 3.1.	Les paramètres intégrés dans le modèle de Mohr-coulomb	46
--------------	--	----

Chapitre 04 : Résultats et Interprétations

Tableau 4.1.	Paramètres géotechniques.....	52
Tableau 4.2.	Tassements aux niveaux des interfaces des couches (Cas01 : LG-0).	57
Tableau 4.3.	Tassements du sol support (Cas01 : LG-0).	58
Tableau 4.4.	Tassements aux niveaux des interfaces des couches (cas02 : LG-LG).....	60
Tableau 4.5.	Tassements du sol support (Cas02 : LG-LG).	61
Tableau 4.6.	Tassements aux niveaux des interfaces des couches (Cas03 : LR-0).....	64
Tableau 4.7.	Tassements du sol support (Cas03 : LR-0).....	64
Tableau 4.8.	Tassements aux niveaux des interfaces des couches (cas04 : LR-LR).	67
Tableau 4.9.	Tassements du sol support (Cas04 : LR-LR).	67
Tableau 4.10.	Tassements aux niveaux des interfaces des couches (cas05 : LR-LG).	70
Tableau 4.11.	Tassements du sol support (Cas05 : LR-LG).....	71

Introduction Générale

Introduction Générale

Les routes jouent un rôle très important dans le développement économique et social d'une région et de sa population. Elles permettent le déplacement des personnes, le transport de marchandise et assurent l'exploitation des ressources.

En effet, les chaussées routières sont conçues essentiellement pour supporter les charges exercées par les véhicules en circulation et les reporter sur le terrain de fondation, sans que se produisent des déformations permanentes.

L'objectif principal de ce projet de fin d'études est, d'étudier l'effet du trafic (poids léger et lourd) dans l'évaluation des tassements dans le corps d'une chaussée souple, à l'aide du logiciel PLAXIS 2D, basé sur la méthode des éléments finis.

Pour ce faire, on a reparti notre étude en quatre chapitres suivants :

Le chapitre 1, est réservé aux chaussées, les matériaux utilisés dans la construction des chaussées, les structures des chaussées, construction des chaussées souples, etc.

Le chapitre 2, est consacré à la résistance mécanique d'une chaussée souple, ainsi que les différentes sollicitations exercées par le trafic et les dégradations de la chaussée.

Le chapitre 3, 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 chapitre 4, est un chapitre récapitulatif, contenant toutes les interprétations des résultats obtenus lors des différentes simulations réalisées.

Enfin, on termine ce projet de fin d'études par une conclusion générale, où l'ensemble des résultats obtenus ont été synthétisé.

Chapitre 01

Généralités sur les chaussées

Sommaire du chapitre 01

1.1.	Introduction	2
1.2.	Définition	2
1.3.	Les couches principales de la chaussée.....	2
1.4.	Les structures des chaussées.....	4
1.4.1.	Les chaussées souples	4
1.4.2.	Les chaussées bitumineuses épaisses	4
1.4.3.	Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques	5
1.4.4.	Les chaussées à structures mixte	5
1.4.5.	Les chaussées à structure inverse	6
1.4.6.	Les chaussées en béton de ciment.....	6
1.4.7.	Les chaussées composites	8
1.4.8.	Les chaussées rigides.....	8
1.5.	Construction des chaussées souples	9
1.5.1.	Couche de fondation	9
1.5.2.	Couche de base	11
1.5.3.	Couche de surface	11
1.6.	Matériaux utilisés dans la construction des chaussées.....	13
1.6.1.	Les matériaux durs à granulométrie serrée	13
1.6.2.	Les matériaux à éléments fins	14
1.6.3.	Liants hydrocarbonés : bitume et goudron	14
1.6.4.	Emploi dans les chaussées de matériaux synthétiques	15
1.7.	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. Les chaussées de cette époque étaient déjà constituées de plusieurs couches de matériaux, parfaitement codifiés, avec des grandes dalles en pierres posées sur un béton de chaux.

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.

Dans ce chapitre, sont présentées des généralités sur les chaussées modernes, voire les différents matériaux utilisés, les principaux types, etc.

1.2. Définition

Une chaussée est une structure composite, multicouche, souvent complexe, 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. (Brunel, 2004-2005) (Coquand, 1978) (Fauré, 1998)

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

1.3. Les couches principales de la chaussée

Une chaussée routière se présente comme une structure composite réalisée par empilements successifs de couches de matériaux granulaires, le tout reposant sur un sol support (Figure 1.1). (Emmanuel Mengue, 2015)

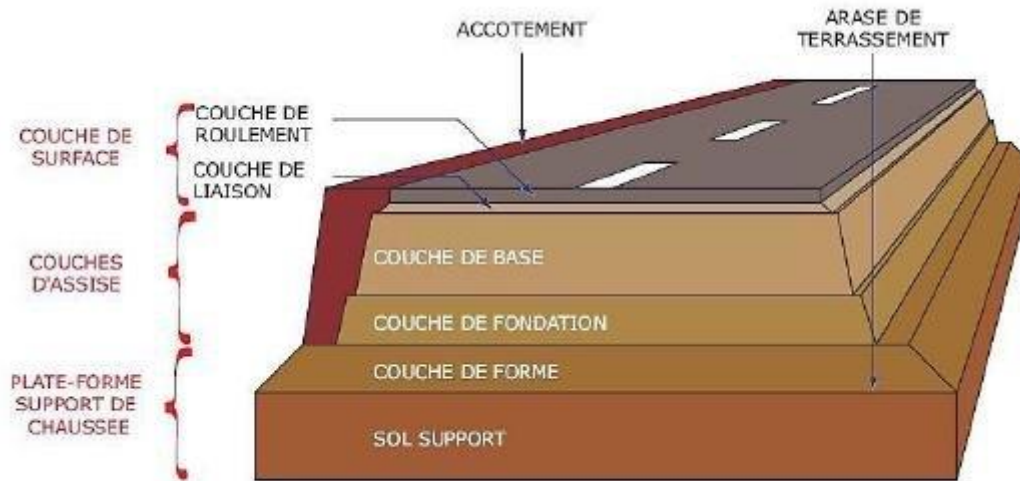


Figure 1.1. Coupe transversale d'un corps de chaussée (Emmanuel Mengue, 2015)

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'assise sont généralement constituées d'une couche de fondation surmontée d'une couche de base. Elles apportent à la structure de chaussée l'essentiel de sa rigidité et répartissent (par diffusion latérale) les sollicitations, induites par le trafic, sur la plate-forme support afin de maintenir les déformations à ce niveau dans les limites admissibles.

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'assise 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)

1.4. Les structures des chaussées

Plusieurs familles de structures routières ont été retenues par la méthode française de dimensionnement, au regard du mode de fonctionnement des couches composant la chaussée. (Coquand, 1978)

1.4.1. Les chaussées souples

Les chaussées souples comportent une couverture bitumineuse relativement mince (inférieure à 15cm), parfois réduite à un enduit pour les chaussées à très faible trafic, reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités. L'épaisseur globale de la chaussée est généralement comprise entre 30 et 60cm (Figure 1.2). (LCPC, SETRA, 1998), (MEZIANI, 2008)

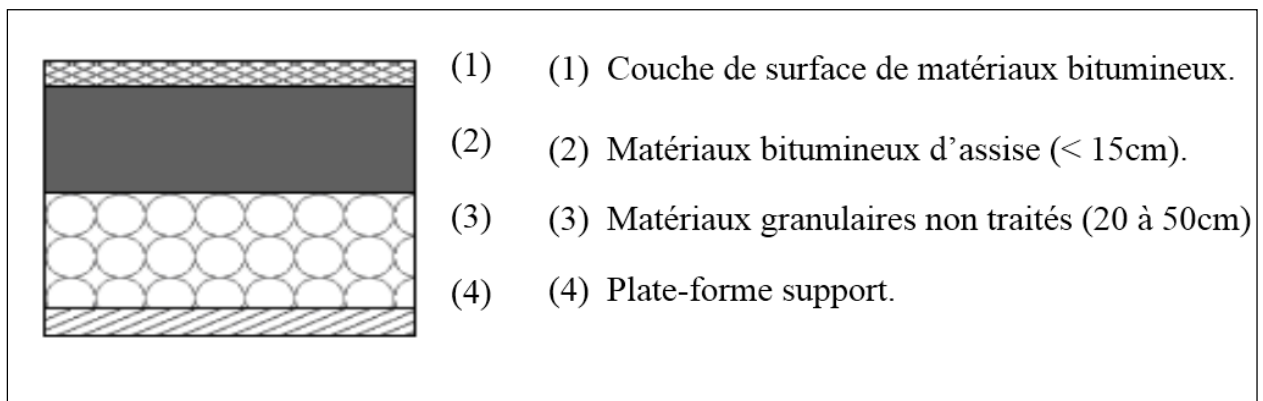


Figure 1.2. Structure d'une chaussée souple

1.4.2. Les chaussées bitumineuses épaisses

Les chaussées bitumineuses épaisses se composent d'une couche de roulement bitumineuse sur un corps de chaussée en matériaux traités aux liants hydrocarbonés, fait d'une ou deux couches (base et fondation). L'épaisseur des couches d'assise est le plus souvent comprise entre 15 et 40cm (Figure 1.3). (LCPC, SETRA, 1998)

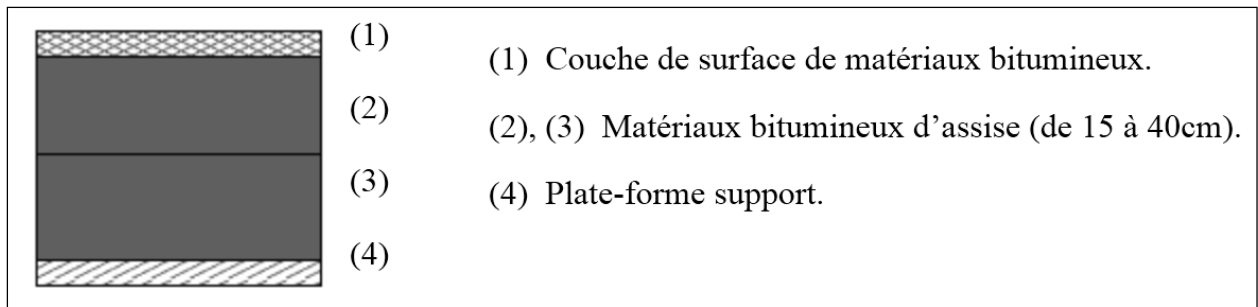


Figure 1.3. Structure d'une chaussée bitumineuse épaisse (MEZIANI, 2008)

1.4.3. Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques sont qualifiées couramment de "semi-rigides". Elles comportent une couche de surface bitumineuse sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposés en une ou deux couches (base et fondation) dont l'épaisseur totale est de l'ordre de 20 à 50cm (Figure 1.4). (LCPC, 1994)

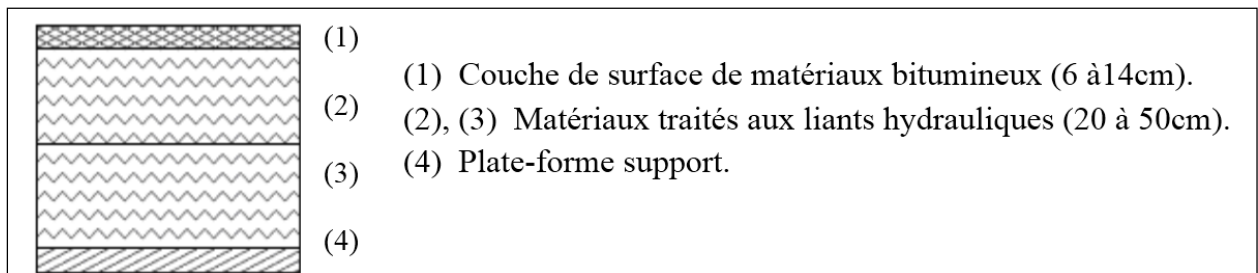


Figure 1.4. Structure d'une chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques
 (MEZIANI, 2008)

1.4.4. Les chaussées à structures mixte

Les chaussées à structures mixte comportent une couche de roulement et une couche de base en matériaux bitumineux (épaisseur de la base : 10 à 20cm) sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40cm) (Figure 1.5). Les structures qualifiées de mixtes sont telles que le rapport de l'épaisseur de matériaux bitumineux à l'épaisseur totale de chaussée soit de l'ordre de 1 / 2. (LCPC, SETRA, 1998)

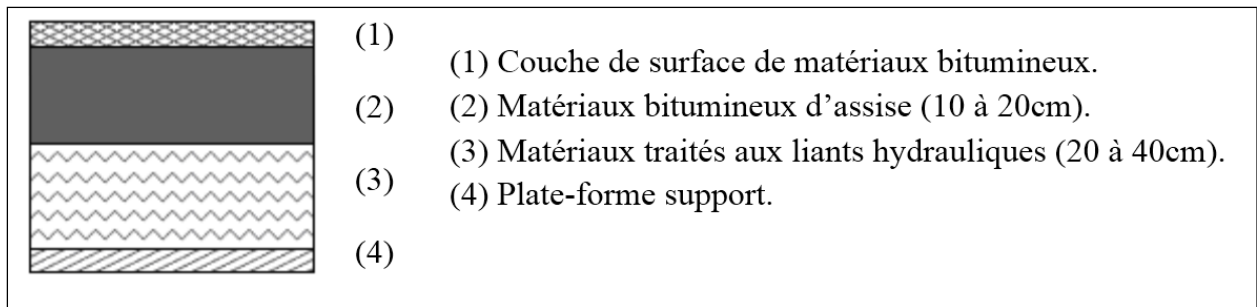


Figure 1.5. Structure d'une chaussée à structure mixte (MEZIANI, 2008)

1.4.5. Les chaussées à structure inverse

Les chaussées à structure inverse sont formées de couches bitumineuses, d'une quinzaine de centimètres d'épaisseur totale, sur une couche de grave non traitée (environ 12cm) reposant elle-même sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques. L'épaisseur totale atteint 60 à 80cm (Figure 1.6). (LCPC, 1994)

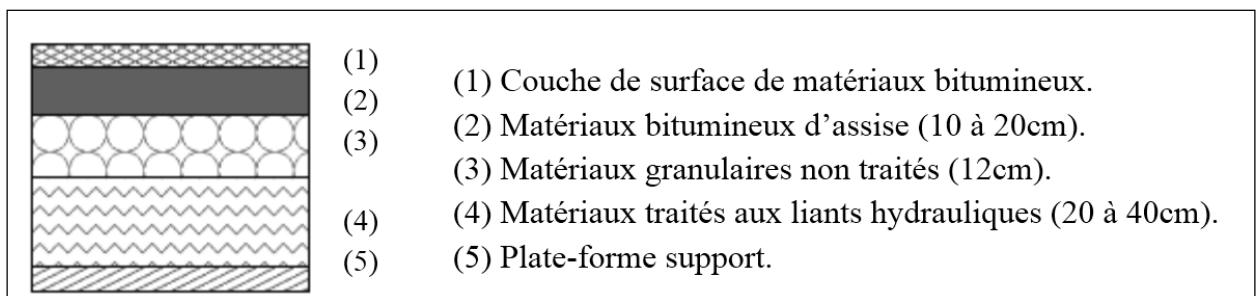


Figure 1.6. Structure d'une chaussée à structure inverse (MEZIANI, 2008)

1.4.6. Les chaussées en béton de ciment

Les chaussées en béton de ciment comportent une couche de béton de ciment de 15 à 40cm d'épaisseur qui sert de couche de roulement, éventuellement recouverte d'une couche mince en matériaux bitumineux. La couche de béton repose soit sur une couche de fondation (en matériaux traités aux liants hydrauliques ou en béton de ciment), soit sur une couche drainante en grave non traitée, soit sur une couche d'enrobé reposant elle-même sur une couche de forme.

La dalle de béton peut être continue avec un renforcement longitudinal (béton armé continu), ou discontinue avec ou sans élément de liaison aux joints (Figure 1.7, 1.8 et 1.9).

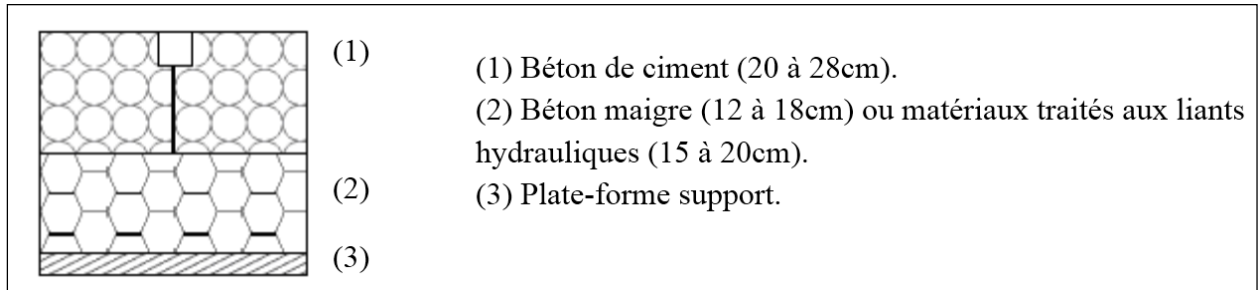


Figure 1.7. Structure d'une chaussée à dalles non goujonnées avec fondation (MEZIANI, 2008)

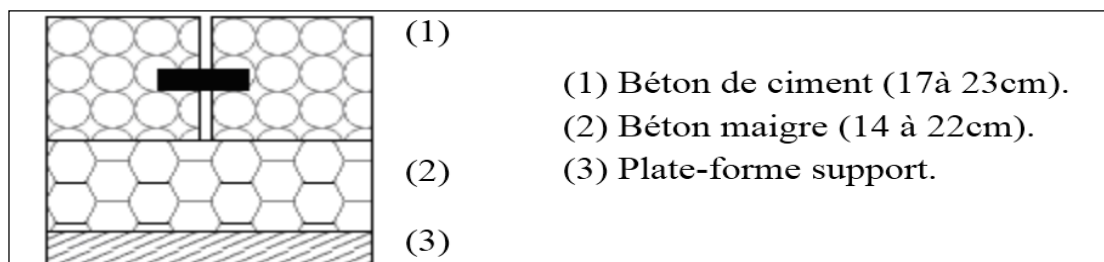


Figure 1.8. Structure d'une chaussée à dalles goujonnées avec fondation (MEZIANI, 2008)

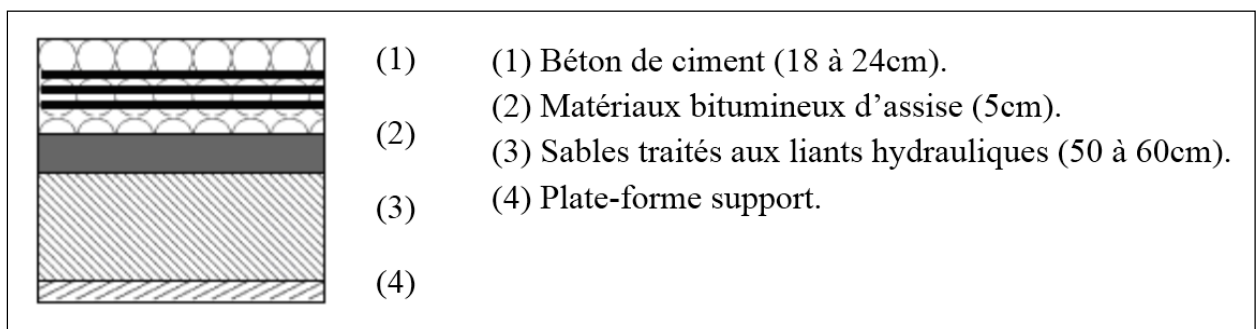


Figure 1.9. Structure d'une chaussée en béton armé continu (MEZIANI, 2008)

1.4.7. Les chaussées composites

Les chaussées composites combinent une couche de béton de ciment avec des couches en matériaux bitumineux. On distingue deux types de structures composites : le béton de ciment mince collé (Figure 1.10) et le béton armé continu sur grave bitume (Figure 1.11). (MEZIANI, 2008)

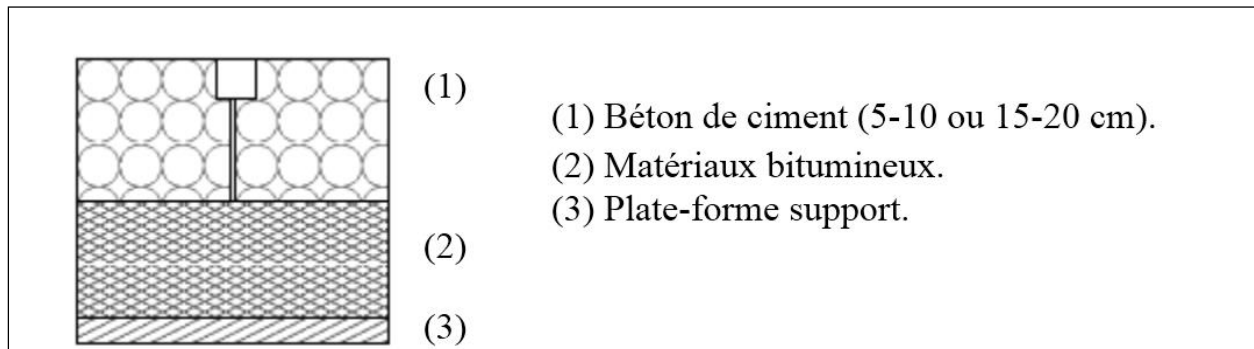


Figure 1.10. Structure d'une chaussée en béton de ciment mince collé (MEZIANI, 2008)

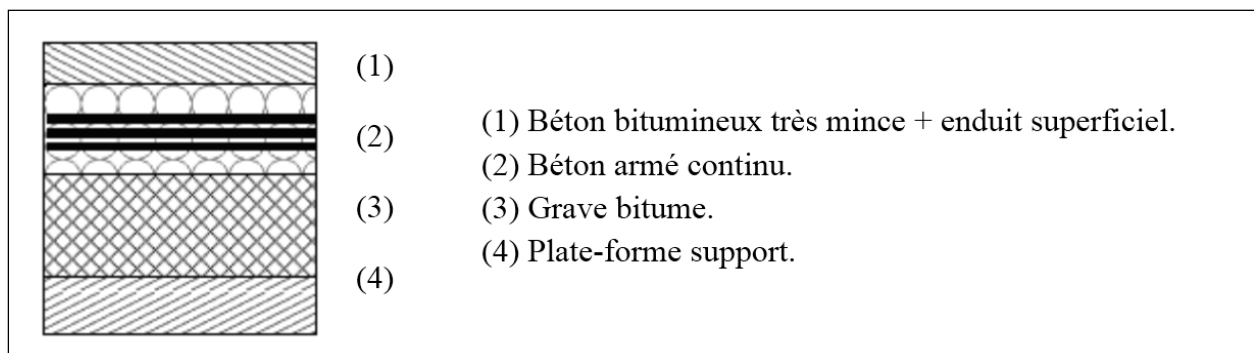


Figure 1.11. Structure d'une chaussée en béton armé continu sur grave bitume (MEZIANI, 2008)

1.4.8. Les chaussées rigides

Une chaussée rigide est constituée d'un revêtement en béton de ciment. En règle générale, 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 1.12). La dalle en béton de ciment peut

ainsi être réalisée directement sur l'arase terrassement ou sur la plate-forme support de chaussée.

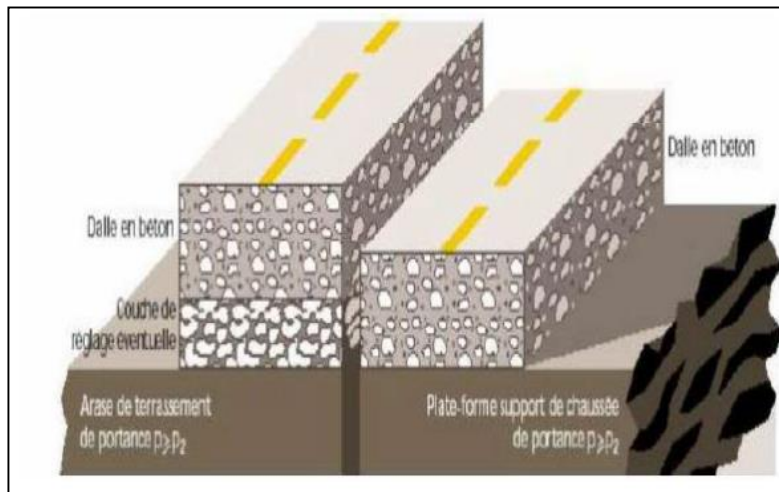


Figure 1.12. Structure type d'une chaussée rigide

1.5. Construction des chaussées souples

Les chaussées souples constituées par des couches superposées, de matériaux non susceptibles de résistance notable à la traction.

Les couches supérieures, sont généralement plus résistantes et moins déformables que les couches inférieures.

Pour une assurance parfaite et un confort idéal, la chaussée exige généralement pour sa construction, plusieurs couches exécutées en matériaux différents, d'épaisseurs déterminées, ayant chacune un rôle bien défini.

1.5.1. Couche de fondation

La construction des couches de fondation est en général aisée, un grand nombre de sols conviennent, soit simplement apportés, soit améliorés par un traitement approprié.

On peut utiliser non seulement les sols naturels, toutes les graves maigres, des sols à gros cailloux aux sables, les schistes miniers... etc. (MEZIANI, 2008)

Ces sols doivent satisfaire les conditions suivantes :

- Peu sensible à l'eau, il faut que la proportion d'éléments fins (argile) soit faible. Il faut chercher des sols où l'indice de plasticité soit nul soit inférieur à 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 réduite et à une forte densité sèche.
- Pouvoir « vivre en bon voisinage » avec le terrain sur lequel il est posé. A cet égard, des difficultés peuvent survenir dans diverses circonstances, notamment :
 - La sensibilité du sol à l'eau, et le terrain de fondation est imperméable et aussi exposé à des remontées capillaires. Il est préférable d'évacuer ces eaux et couper ces remontées capillaires par une sous couche anticapillaire drainante, très perméable.
 - La sensibilité du sol au gel, donc il faut construire une sous couche antigel.
 - Le terrain contient des éléments très fins qui risquent, au cours du compactage et quand la chaussée sera en service, de pénétrer dans le sol d'apport et d'en altérer la granulométrie, la stabilité, la portance, de le rendre sensible à l'eau, etc.

Les couches de fondation doivent toujours être plus perméables que les couches qu'elles supportent, pour éviter des rétentions d'eau dans la chaussée.

1.5.2. Couche de base

Dans les couches supérieures, des contraintes localisées élevées (trafic, environnement...) peuvent se manifester.

L'emploi d'un matériau compactable, pour la construction d'une couche de base doit-il faire l'objet d'une attention toute spéciale.

Les conditions auxquelles doit satisfaire le matériau sont de même nature que pour les couches inférieures (couche de fondation) mais l'expérience conduit à les rendre plus précises et plus sévères. (Coquand, 1985)

La couche de base est protégée superficiellement par une couche de surface (goudron ou bitume). Elle sera généralement constituée par une grave (naturelle ou améliorée) ou par un tout-venant de concassage.

- 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.
- Le ruissellement des eaux de pluie hors de la chaussée doit être bien assuré, les remontées capillaires doivent être évitées.
- Il faut éviter d'employer des matériaux tendres, dont l'écrasement modifie rapidement la granulométrie et la plasticité.

1.5.3. Couche de surface

La couche de surface est constituée d'une couche de roulement qui encaisse les agressions du trafic et du climat.

Différentes techniques utilisées en couche de roulement :

Les enduits superficiels, constitués d'une alternance de couches de liant bitumineux et de gravillons, en couches de faible épaisseur, et répandues directement sur le support.

Le béton bitumineux est un mélange de graviers, de sable et de liant hydrocarboné (type goudron ou bitume) appliqué en une ou plusieurs couches pour constituer la chaussée des routes, la piste des aéroports et d'autres zones de circulation.

Les qualités essentielles d'un matériau enrobé utilisé sur la route sont :

- La stabilité : c'est la résistance de la couche de surface aux déformations permanentes sous les différentes charges (statiques, dynamiques).

Le manque de stabilité engendre un fluage et forme des dépressions, d'ornières et d'ondulations.

- La flexibilité : c'est l'aptitude à admettre sans fissuration les déformations d'ensemble qui peuvent être imposées à la couche d'enrobé par la déflexion des couches inférieures.

L'insuffisance de flexibilité provoque des fissures sur la couche de roulement. Pour avoir un enrobé stable et flexible en même temps il faut que le liant soit ductile, et qui résiste aux basses températures, et qu'il reste visqueux en été sans devenir fragile en hiver, et aussi résiste bien au vieillissement.

- L'étanchéité, la pose d'un enrobé perméable et non drainé sur une chaussée moins perméable et sensible à l'eau crée un piège à eau, dont les effets sont d'autant plus nocifs que l'évaporation est plus lente.
- L'absence de sensibilité à l'eau. L'humidité ne doit pas pouvoir désenrober les matériaux, ce qui exige une bonne affinité entre ceux-ci et le liant. Elle ne doit non plus pouvoir altérer les éléments fins de l'enrobé, ce qui implique que les fillers contiennent peu d'argile.
- L'enrobé utilisé en couche de surface doit avoir une bonne résistance aux efforts tangentiels et aux efforts de poinçonnement, et avoir aussi une meilleure rugosité.

1.6. Matériaux utilisés dans la construction des chaussées

Les chaussées sont constituées généralement, soit par des dalles en béton de ciment (chaussées rigides), soit par des matériaux pierreux, graveleux ou sableux employés avec ou sans addition de produits noirs ou de liants hydrauliques (chaussées souples ou semi-rigides).

1.6.1. Les matériaux durs à granulométrie serrée

Les matériaux pierreux, graveleux ou sableux utilisés dans la construction des routes se divisent en deux grandes classes, qui correspondent à des techniques d'emploi bien différentes dans leur principe :

- Les matériaux à granulométrie serrée « ouverte », comportant une forte proportion de vides. Ils sont généralement fournis par le concassage de pierres dures en carrière. Ils sont utilisés comme gravillons de revêtement superficiel.
- Les matériaux à granulométrie étalée "pleine", destinés à être compactés, et résistant par compacité et cohésion (sols et chaussées stabilisées, bétons bitumineux ou enrobés denses). Ces matériaux proviennent le plus souvent de gisement de matériaux grenus naturels, améliorés le cas échéant par concassage et triage, ils peuvent aussi provenir du concassage de pierres de dureté moyenne.

Il est essentiel de remarquer que la résistance d'un matériau pierreux dépend de deux éléments, d'une part de la dureté de la roche, d'autre part du mode de concassage, qui influence plus spécialement sur la forme des matériaux. Les matériaux de forme plate ou allongée sont plus fragiles que ceux voisins de la forme cubique. (MEZIANI, 2008)

1.6.2. Les matériaux à éléments fins

Ces matériaux, de plus en plus utilisés, peuvent provenir soit :

- du concassage de matériaux de carrière, le produit de concassage étant utilisé « tout venant », c'est-à-dire sans criblage ou avec un criblage très réduit corrigeant la courbe granulométrique dans la mesure nécessaire pour que le matériau soit compactable. (Coquand, 1985)
- du "sol" de caractéristiques convenables, notamment en ce qui concerne la granulométrie et la teneur en fines. Les sources principales sont les "graves", "sables " ou "graviers" d'origine glaciaire ou fluviale, le lavage, l'illuviation et les colmatages successifs de ces matériaux par l'action des courants conduisent à une granulométrie généralement continue et assez satisfaisante.

1.6.3. Liants hydrocarbonés

Le bitume et le goudron sont utilisés très largement dans la construction des chaussées souples, en raison de leurs propriétés physiques qui les rendent spécialement propres à cet usage.

Ces produits sont très visqueux aux températures ordinaires, mais soit par chauffage, soit par une préparation spéciale (émulsion), ils peuvent être employés sous forme fluide : ils redeviennent rapidement visqueux et présentent alors les qualités essentielles suivantes :

La cohésivité, c'est-à-dire la propriété de se déformer sans arrachement ni fissuration interne, en donnant des films étanches et plastiques.

L'adhésivité, c'est-à-dire la propriété de coller aux agrégats minéraux.

1.6.4. Emploi dans les chaussées de matériaux synthétiques

À côté des matériaux traditionnels (pierres, sables, ciments, goudrons, bitumes) sont apparus dans la construction des chaussées, depuis quelques années, des matériaux fabriqués, destinés à des utilisations spécifiques.

1.7. Conclusion

La chaussée durant sa vie est soumise aux diverses sollicitations telles que ; le trafic lourd et 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. Cela engendre des déformations qui génèrent des dégradations à maîtriser.

Chapitre 02

Résistance mécanique d'une chaussée

Sommaire du chapitre 02

2.1.	Introduction.....	16
2.2.	Le trafic.....	16
2.2.1.	Les différentes classes de trafic.....	16
2.2.2.	Effet du passage du trafic sur les chaussées.....	17
2.3.	Comportement mécanique des enrobés bitumineux.....	17
2.4.	Sollicitations des couches de chaussées.....	19
2.4.1.	Actions des véhicules sur les chaussées.....	19
a.	Efforts verticaux.....	19
b.	Sollicitations tangentielles.....	20
c.	Efforts de cisaillement.....	21
d.	Actions dynamiques.....	22
e.	Les vibrations.....	22
f.	Durée d'application des charges.....	23
g.	Répétition des charges.....	23
2.4.2.	L'environnement.....	23
2.5.	Causes de rupture des chaussées souples.....	24
2.5.1.	Le trafic.....	25
2.5.2.	Les conditions climatiques.....	25
2.5.3.	Les malfaçons.....	26
2.5.4.	Les accidents et les incidents.....	27
2.6.	Les dégradations des structures de chaussées.....	27
2.6.1.	Les fissurations.....	27
2.6.2.	Les déformations.....	29
a.	Affaissement.....	30
b.	Orniérage.....	30
c.	Bourrelet.....	31
d.	Flache.....	31
2.6.3.	Les arrachements.....	32
a.	Pelade.....	32
b.	Nid de poule.....	32
c.	Plumage.....	33
2.6.4.	Les remontées.....	33
a.	Ressuage.....	33
b.	Remontée d'eau et d'éléments fins.....	34
2.7.	Conclusion.....	34

2.1. Introduction

Pour étudier la résistance mécanique d'une chaussée, il faut connaître la valeur des plus lourdes charges qui passent sur la chaussée, et la fréquence des passages de chaque catégorie de véhicules, et connaître aussi la qualité du terrain sur lequel la chaussée devra être établie.

2.2. 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 :

- Véhicule léger : $P = 0.22\text{MPa}$
- Poids lourd : $P = 0.66\text{MPa}$

Les matériaux situés sous les roues subissent des efforts très différents lors du passage d'un véhicule léger ou lors du passage d'un véhicule lourd. Seul ce dernier est pris en compte pour déterminer les classes de trafic. (Joseph ABD0, 2009)

2.2.1. Les différentes classes de trafic

Les classes de trafic sont définies par le trafic moyen journalier des poids lourds qui circulent sur la chaussée. On distingue les classes suivantes :

- Classe T6 : de 0 à 10 PL/j
- Classe T5 : de 10 à 25 PL/j
- Classe T4 : de 25 à 50 PL/j
- Classe T3- : de 50 à 100 PL/j
- Classe T3+ : de 100 à 150 PL/j
- Classe T3 : de 50 à 150 PL/j
- Classe T2 : de 150 à 300 PL/j

- Classe T1 : de 300 à 750 PL/j
- Classe T0 : de 750 à 2000 PL/j

Les classes de trafic définissent trois catégories de routes : (Joseph ABD0, 2009)

- Les voiries à faible trafic regroupant les classes de T6 à T4.
- Les voiries à moyen trafic regroupant toutes les classes de T3-à T3.
- Les voiries à fort trafics regroupant toutes les classes de T2 à T0.

2.2.2. Effet du passage du trafic sur les chaussées

L'action répétée du passage du 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.

2.3. Comportement mécanique des enrobés bitumineux

Le comportement mécanique d'un enrobé bitumineux peut être classé selon le niveau de déformation imposé (ϵ) et le nombre de cycle de sollicitation (N) (figure 2.1.). Trois types principaux de comportement peuvent être identifiés :

- non-linéaire ;
- viscoélastique linéaire ;
- endommagement par fatigue.

Dans le cas de sollicitations à fortes amplitudes de déformation, le comportement mécanique de l'enrobé est fortement non-linéaire ; il faut peu de cycles de chargement répété pour atteindre la rupture.

À de faibles amplitudes de sollicitation, l'enrobé bitumineux présente un comportement viscoélastique linéaire. Dépendamment des conditions d'essai et de l'enrobé testé, ce comportement ne s'observe que pour une plage de sollicitations restreinte (de quelques cycles à quelques centaines de cycles).

À de faibles amplitudes de sollicitation, le nombre de cycle joue un rôle déterminant. Sous l'action d'un nombre élevé de cycles imposés, plusieurs dizaines de milliers, le comportement mécanique de l'enrobé présente un phénomène d'endommagement, le matériau se "fatigue".

L'endommagement est une dégradation progressive des caractéristiques mécaniques du matériau jusqu'à la rupture.

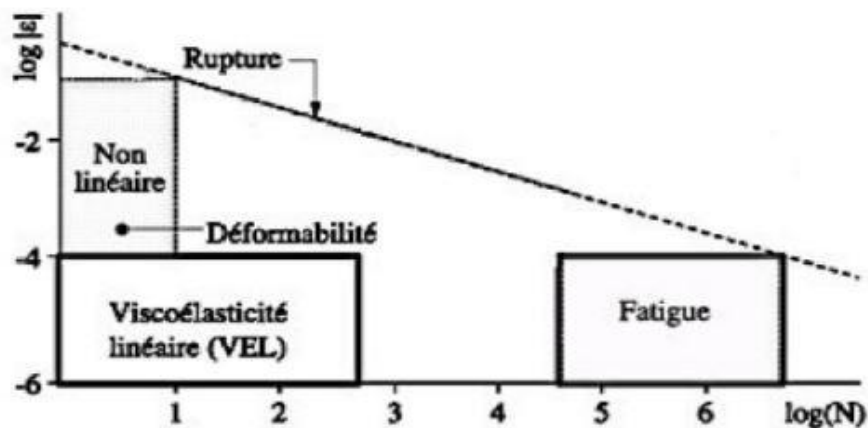


Figure 2.1. Comportement mécanique "type" des enrobés bitumineux (A. CARTER, 2002)

2.4. 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 climatiques, principalement en raison des variations de température (effets thermiques).

2.4.1. 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.

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 2.2), imputables au tassement des couches de béton ou aux déformation des couches inférieures non traité.

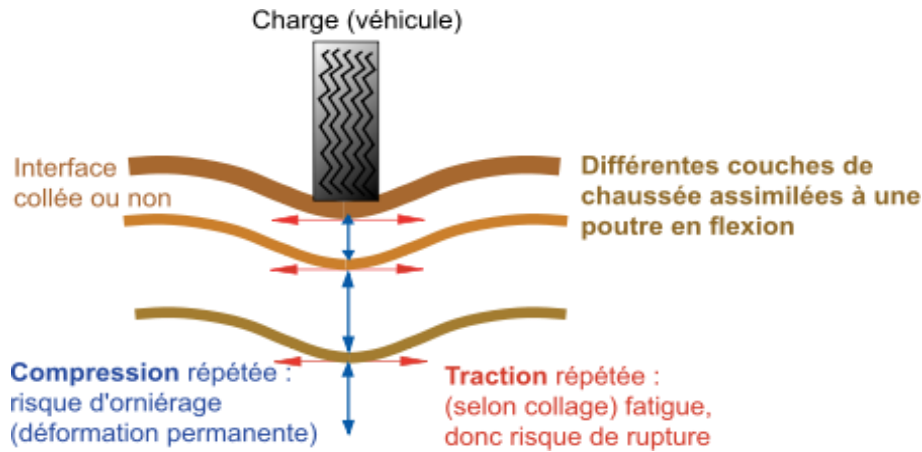


Figure 2.2. Fonctionnement d'une structure de chaussée sous l'application d'une charge roulante (Emmanuel Mengue, 2015)

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.

Ces efforts tangentiels s'accompagnent de frottements.

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) est 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, bombements, etc.) il se produit le phénomène d'envirage 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 2.3), qui créent des 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.

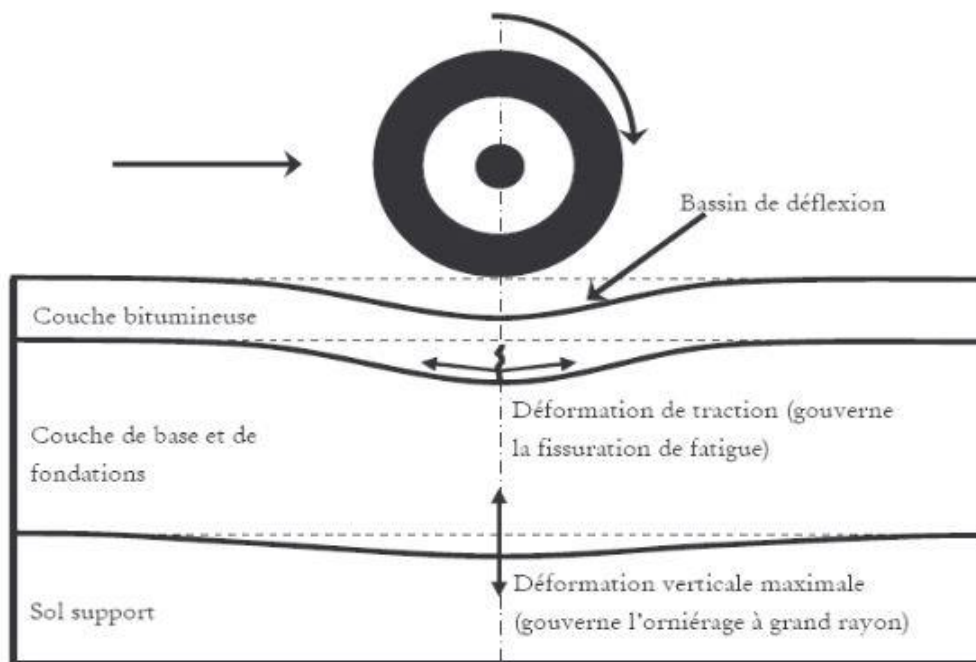


Figure 2.3. Fonctionnement d'une chaussée sous sollicitations liées au trafic

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 est 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'organes 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)

Les chocs constituent une cause essentielle de l'usure des véhicules d'une part, de la chaussée d'autre part.

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. (MEZIANI, 2008)

f. Durée d'application des charges

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

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

g. Répétition 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 ya 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.

2.4.2. L'environnement

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

La température a deux effets mécaniques principaux :

A basse température, le bitume possède un comportement fragile. Sous l'effet des conditions climatiques, l'enrobé est susceptible de se fissurer. L'utilisation d'une 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'orniérages.

Les enrobés doivent donc présenter deux qualités principales en rapport direct avec la dépendance du liant utilisé vis-à-vis de la température :

La stabilité, c'est-à-dire, la résistance à la déformation permanente qui est aggravée à haute température.

La flexibilité, c'est-à-dire, l'aptitude à supporter sans fissures thermiques les basses températures. (AMBASSA, 2013)

Le deuxième effet mécanique principal de la température se manifeste lors des changements de température par la création de contraintes et déformations au sein du matériau en raison des dilatations-contractions thermiques (figure 2.4).

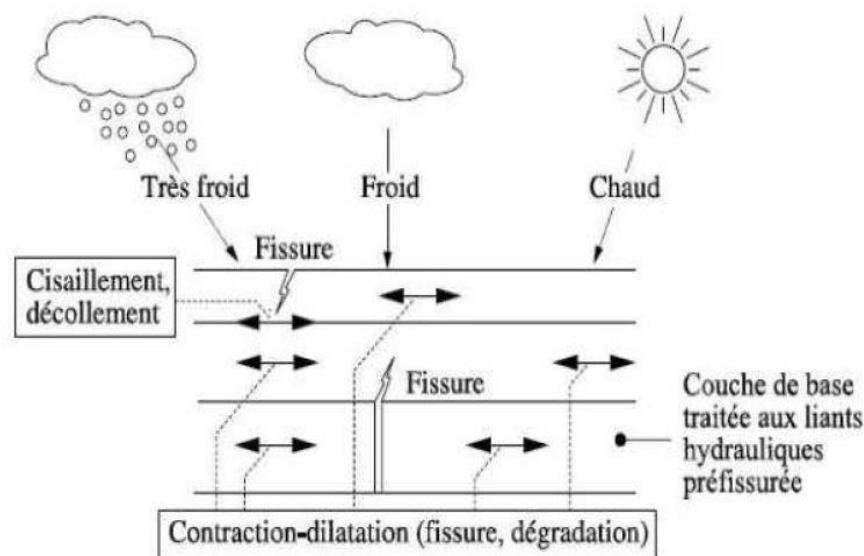


Figure 2.4. Effet de la température sur la structure de chaussée (AMBASSA, 2013)

2.5. 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.

2.5.1. Le trafic

Au passage d'un véhicule la structure de la chaussée accuse une petite fatigue. De ce point de vue, les poids lourds sont particulièrement agressifs car le passage d'un essieu de 13 tonnes a autant d'effet sur la structure de la chaussée que celui d'un million de véhicules de tourisme. La répartition des charges entraîne une fatigue générale de la chaussée.

Le frottement des pneumatiques en mouvement sur la couche de roulement conduit également par usure à son vieillissement.

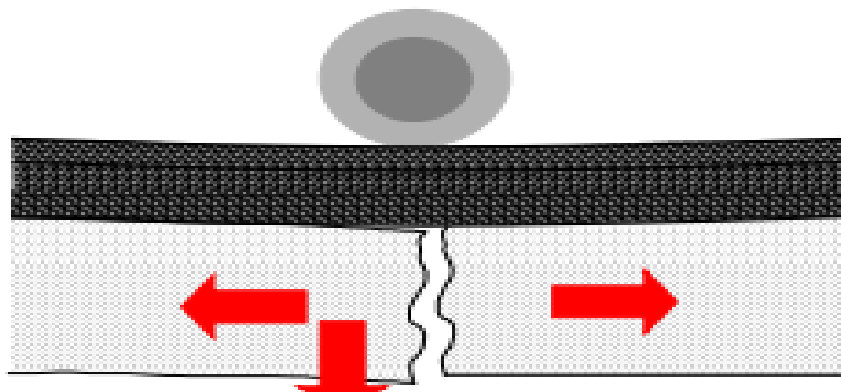


Figure 2.5. Passage d'une charge roulante.

2.5.2. 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 de température et dans une moindre mesure, l'action du soleil accélèrent le vieillissement des bitumes et celui des chaussées.

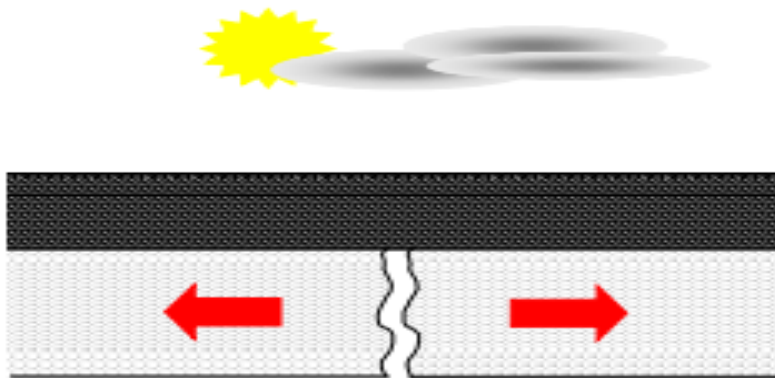


Figure 2.6. Mouvement sous variation thermique.

2.5.3. Les malfaçons

Les malfaçons d'origines diverses lors de la construction (mauvais matériaux, mise en œuvre, épaisseur insuffisantes, 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 pour qu'elles entraînent automatiquement la rupture de la chaussée.

2.5.4. 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.

2.6. Les dégradations des structures de chaussées

Les dégradations des chaussées souples peuvent être classées en quatre familles : les fissurations, les déformations, les arrachements et les remontées des matériaux.

2.6.1. Les fissurations

Une fissure est une ligne de rupture apparaissant à la surface de la chaussée. On peut rencontrer plusieurs fissures dans les chaussées :

a. Fissuration transversale

Rupture du revêtement perpendiculaire à l'axe de la chaussée. (LCPC, 1998)



Figure 2.7. Fissures transversales

b. Fissuration longitudinales

Rupture du revêtement parallèle à l'axe de la chaussée. (LCPC, 1998)



Figure 2.8. Fissures longitudinales

c. Fissure de gel

Rupture du revêtement générant une fissure active sous l'effet du gel. (LCPC, 1998)

d. Fissure de joint

Ouverture apparaissant sous forme de fissure rectiligne au raccordement de deux bandes d'enrobés (joint longitudinal) ou à une reprise d'une bande d'enrobés (joint transversal).

e. Fissure d'adaptation

Fissure provenant de mouvements de sols (tassement, glissement du remblai...)



Figure 2.9. Fissures d'adaptation

f. Faïençage

Ce sont des fissurations à maille plus ou moins fines, se produisant sur les couche de surface. (LCPC, 1998)



Figure 2.10. Faïençages à maille fines

g. Fissures diverses

Fissures apparaissant d'une manière anarchique à la surface de la chaussée.



Figure 2.11. Fissures diverses

2.6.2. Les déformations

En générale se sont des déformations visibles en surface, comme les phénomènes irréversibles suivants :

a. Affaissement

C'est un tassement vertical de la chaussée au bord des accotements et sur la chaussée.



Figure 2.12. Affaissements d'une chaussée

b. Orniérage

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



Figure 2.13. Orniérage

c. Bourrelet

C'est un renflement apparaissant à la surface de la chaussée.



Figure 2.14. Bourrelet

d. Flache

Dépression de forme arrondie d'un point faible du corps de chaussée.

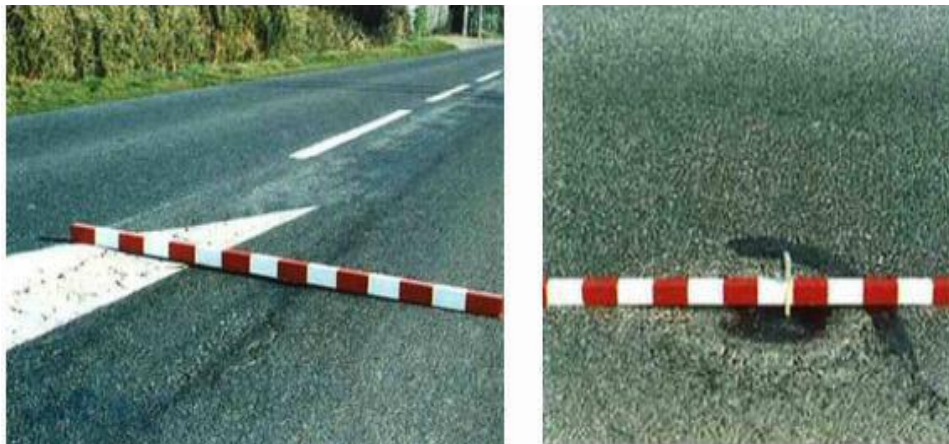


Figure 2.15. Flache

2.6.3. Les arrachements

L'arrachement est un départ des gravillons sous l'effet du trafic.

a. Pelade

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



Figure 2.16. Pelade

b. Nid de poule

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



Figure 2.17. Nid de poule

c. Plumage

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



Figure 2.18. Plumage

2.6.4. Les remontées

Remontées des matériaux à la surface de la chaussée.

a. Ressuage

Remontée du liant (bitume) à la surface de la chaussée. (LCPC, 1998)



Figure 2.19. Ressuage

b. Remontée d'eau et d'éléments fins

Apparition d'eau ou d'éléments fins à la surface de la chaussée provenant de l'assise. (LCPC SETRA, 2000)



Figure 2.20. Remontée d'éléments fins

2.7. Conclusion

Les dégradations quelque soient leurs causes, détruisent la couche de roulement ce qui conduit à moins de confort et de sécurité aux usagers, donc la réparation et l'entretien de ces dégradations est indispensable afin de minimiser les dégâts.

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 véhicules, tout spécialement des véhicules lourds. En effet, la répétition de lourdes charges aggrave considérablement les conditions de travail d'une chaussée.

On devra tenir compte aussi, le cas échéant, des circonstances exceptionnelles susceptibles d'engendrer soit des chocs, soit des efforts horizontaux anormaux (fortes déclivités, virages de faible rayon, etc.). 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 graves.

Chapitre 03

Présentation du logiciel de simulation « PLAXIS »

Sommaire du chapitre 03

3.1.	Introduction.....	36
3.2.	Présentation du logiciel (Plaxis)	36
3.3.	Les sous programmes de Plaxis	36
3.3.1.	Le programme d'entrée de données.....	36
3.3.2.	Le programme de calcul	37
3.3.3.	Le programme des résultats.....	39
	a. Les contraintes	39
	b. Les déformations	39
	c. Le programme courbe.....	40
3.4.	Etapas de modélisation	41
3.4.1.	La géométrie.....	41
3.4.2.	Les conditions aux limites.....	41
3.4.3.	Définition des paramètres des matériaux.....	42
3.4.4.	Le maillage.....	42
3.4.5.	Les conditions initiales	42
3.4.6.	Phase de calcul	43
3.4.7.	Visualisation des résultats.....	44
3.5.	Les modèles de comportement utilisés dans « PLAXIS »	45
3.5.1.	Modèle élastique linéaire.....	45
3.5.2.	Modèle de Mohr-Coulomb.....	45
	a. Le module de Young « E ».....	46
	b. Coefficient de poisson « ν »	47
	c. L'angle de frottement « ϕ »	47
	d. La cohésion « C »	48
	e. L'angle de dilatance « ψ ».....	48
3.5.3.	Modèle pour les sols mous « Soft Soil model »	48
3.5.4.	Modèle de sol avec écoulement « Hardening Soil Model »	49
3.5.5.	Modèle pour les sols mous avec fluage « Soft Soil creep model »	49
3.5.6.	Modèle pour les roches fracturées « Jointed Rock model »	49
3.5.7.	Modèle défini par l'utilisateur « user defined model »	49
3.6.	Conclusion	50

3.1. Introduction

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, une société nommée PLAXIS B.V. a été créée en 1993. En 1998, la première version de 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. (Houda, 2010)

3.2. Présentation du logiciel (Plaxis)

PLAXIS est un logiciel d'éléments finis utilisé pour la modélisation des ouvrages géotechniques. Ce logiciel est spécialement conçu pour analyser les déformations et la stabilité des ouvrages géotechniques, il permet d'analyser les problèmes élastiques, élasto-plastiques et élasto-viscoplastiques en 2D et en 3D.

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 contraints et les états de rupture du sol. (Houda, 2010)

3.3. Les sous programmes de Plaxis

L'interface d'utilisation du logiciel PLAXIS se compose de trois sous programmes :

3.3.1. Le programme d'entrée de données

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. (Brinkgreve, 2003)

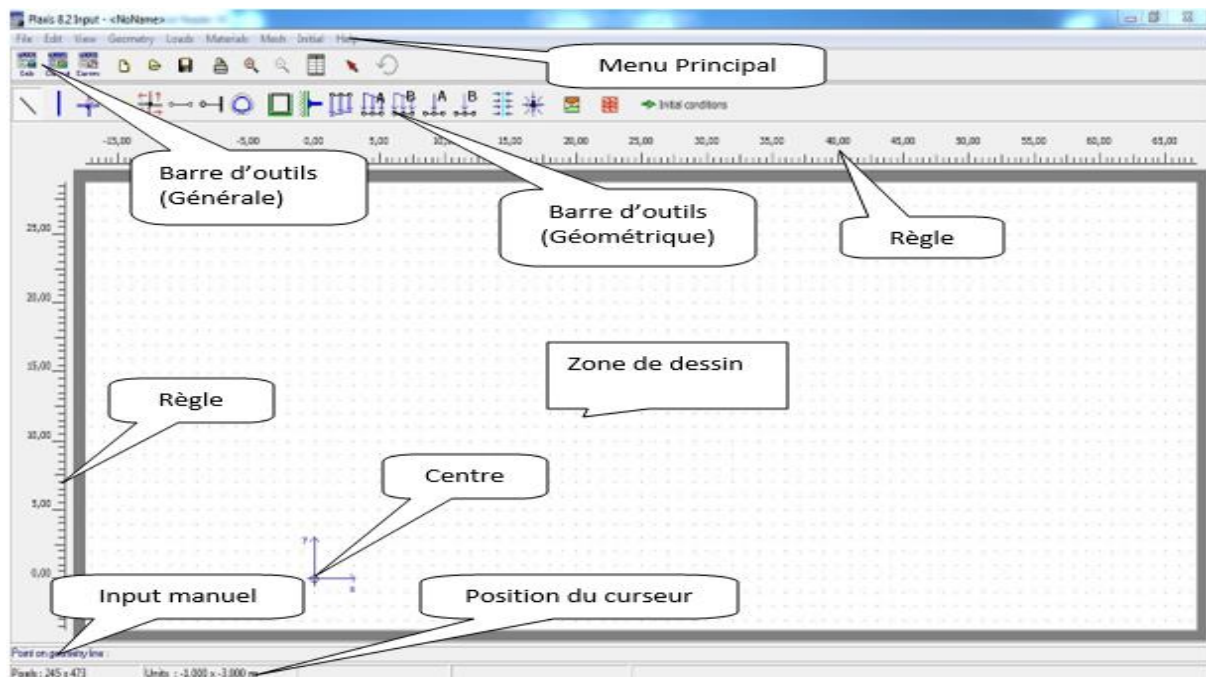


Figure 3.1. Fenêtre principale du programme d'entrée des données

3.3.2. 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 ou les étapes de construction.

Le programme de calcul ne traite que de l'analyse des déformations, et permet de réaliser un calcul plastique, une analyse de consolidation, un calcul de coefficient de sécurité ou un calcul dynamique. (Houda, 2010)

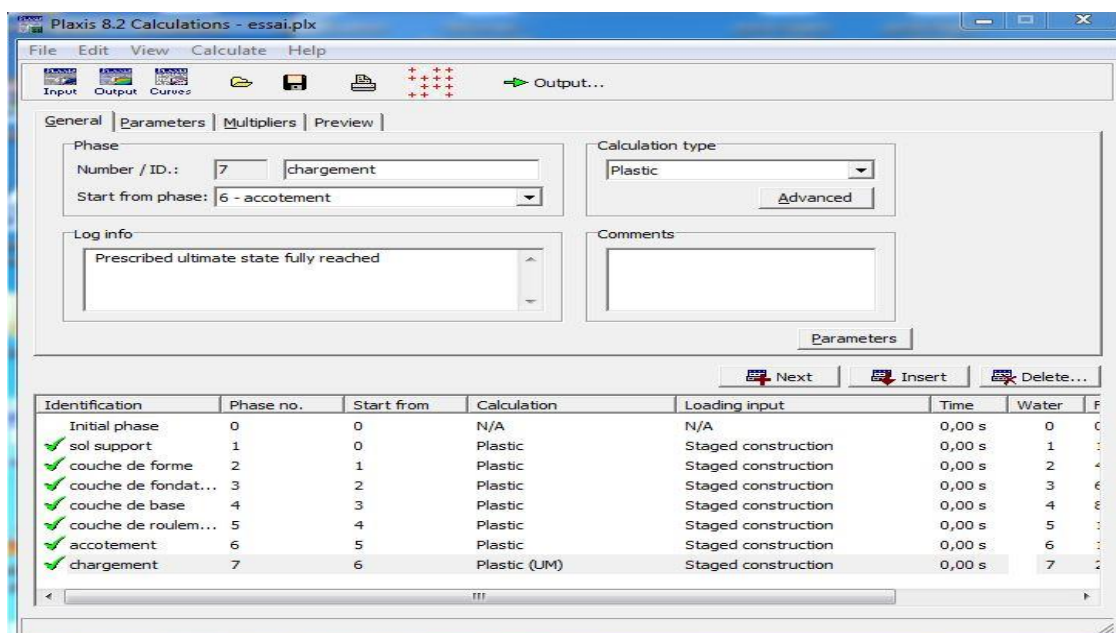


Figure 3.2. Fenêtre principale du programme de calcul.

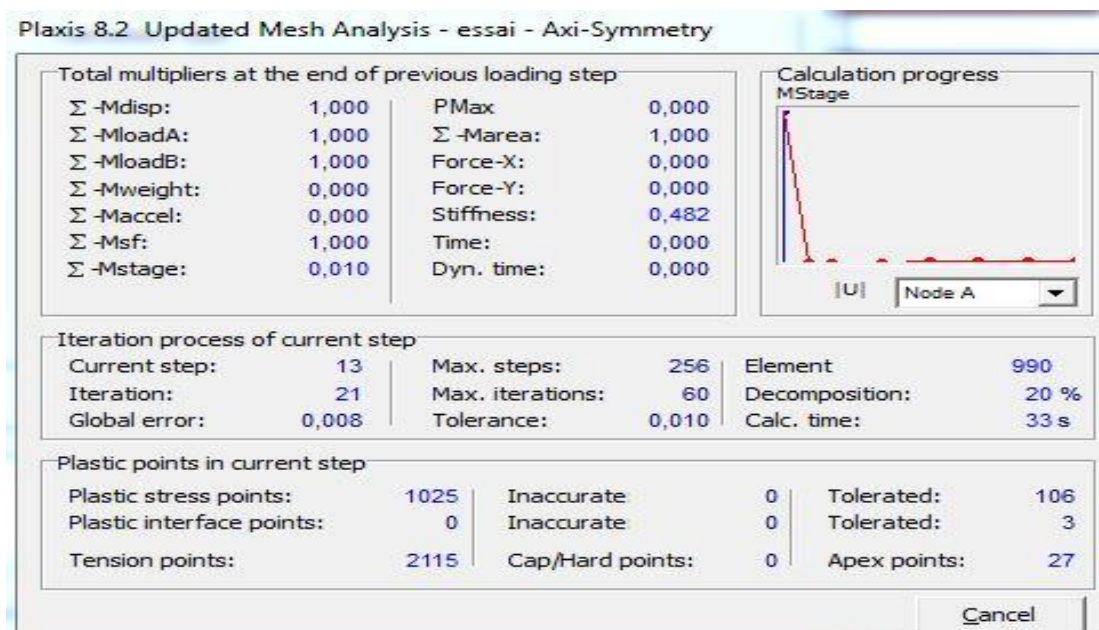


Figure 3.3. Fenêtre de calcul.

3.3.3. Le programme des résultats

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.

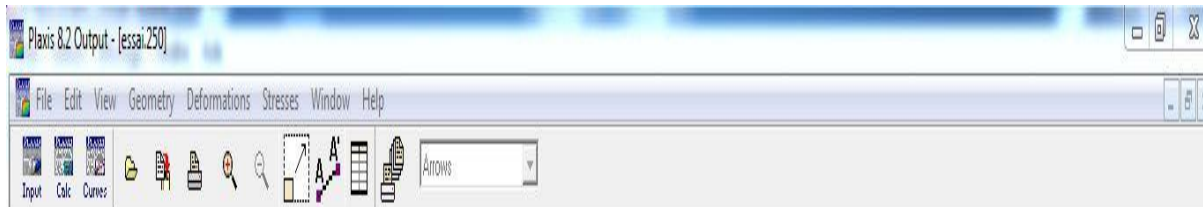


Figure 3.4. Barre d'outils de la fenêtre principale du programme des résultats

a. Les contraintes

Le programme présente les différentes options pour voir l'état de contrainte d'un modèle d'éléments finis. (Brinkgreve, 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 présentés (Houda, 2010) :

- 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 (tassements) et les déplacements horizontaux.

- Les déformations totales : Ce sont des déformations obtenues à la fin du calcul, elles sont affichées sur une représentation non déformée de la géométrie.

c. Le programme courbe

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-déplacements : Elles permettent de visualiser la relation entre la charge appliquée et le déplacement résultant.
- Courbes contraintes-déformations : Elles permettent de visualiser le comportement contrainte-déformation local 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 déformation représente l'évolution des déformations.

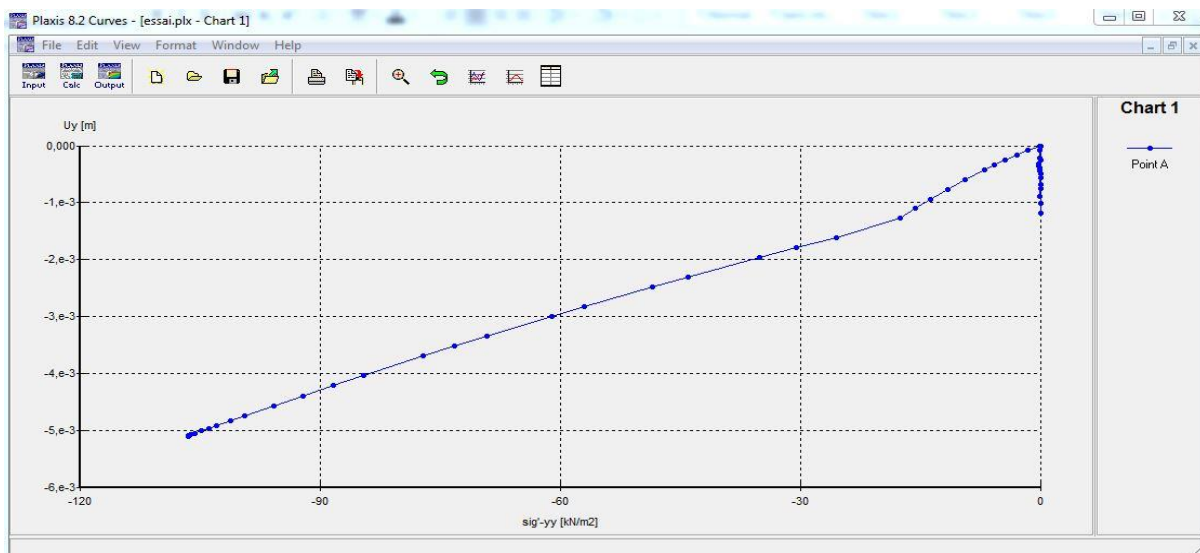


Figure 3.5. Interface graphique Curves.

3.4. Etapes de modélisation

La modélisation avec PLAXIS passe par plusieurs étapes :

3.4.1. La géométrie

La première étape de la modélisation est de définir la géométrie. 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.
- L'outil « plates » est utilisé pour modéliser les murs et les poutres.
- « Anchor » sert à modéliser les liaisons entre les éléments.
- « Geogrid » permet de dessiner les structures qui résistent à la compression et à la traction, mais ne possèdent aucune résistance de flexion.

Cet outil est généralement utilisé pour modéliser les géogrilles et les ancrages.

- L'outil « Tunnel » permet de modéliser un tunnel prenant en compte les facteurs qui concerne ce type d'ouvrage.

3.4.2. 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 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.

3.4.3. 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 paramètres, il faut également définir le comportement hydraulique du sol (drainer, non-drainer ou non-poreux). (Mohammed, 2011)

3.4.4. Le maillage

PLAXIS génère le maillage automatiquement, l'opérateur peut paramétrer la finesse du maillage entre différentes options (très grossier, 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.

3.4.5. 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, plaque...) qui correspondent à l'instant initial. Il désactive les éléments de sol qui ne correspondent pas à cet instant initial. (Brinkgreve, 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 contraintes initiales à l'intérieur du massif (poids propre et sous pression) ;

3.4.6. 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. Pour chaque phase on peut modifier la géométrie par l'intermédiaire de la même interface qui a servi à définir les conditions initiales. On peut donc effectuer des changements uniquement en activant ou désactivant des éléments. Le niveau de la nappe phréatique peut être modifié, ainsi que certaines propriétés des matériaux. Le niveau d'intensité et la position des conditions limites des chargements en déplacement et en contrainte peuvent également être modifiés.

Aucun nouvel élément ne peut être créé à la phase de calculs que ce soit une charge, un déplacement, une condition aux limites ou une plaque

D'autres types de phases peuvent être créés (phase de consolidation par exemple). Un certain nombre de types de calcul peut être simulé (consolidation, détermination du facteur de sécurité, déformation plastic, étude dynamique). Une fois le phasage de l'étude terminé, des points caractéristiques peuvent être placés.

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>>.

3.4.7. 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).

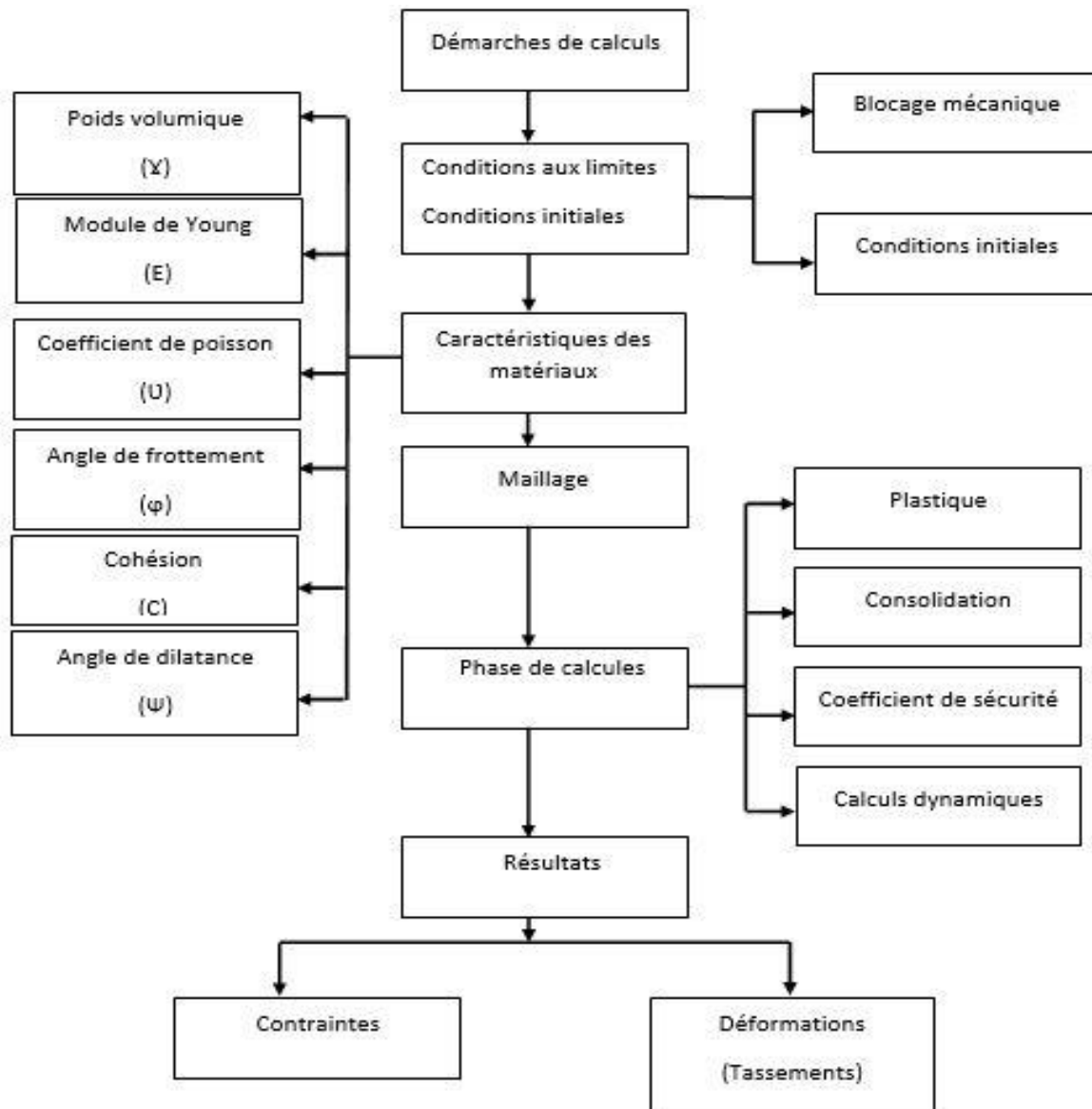


Figure 3.6. Organigramme de modélisation avec PLAXIS

3.5. Les modèles de comportement utilisés dans « PLAXIS »

3.5.1. Modèle élastique linéaire

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

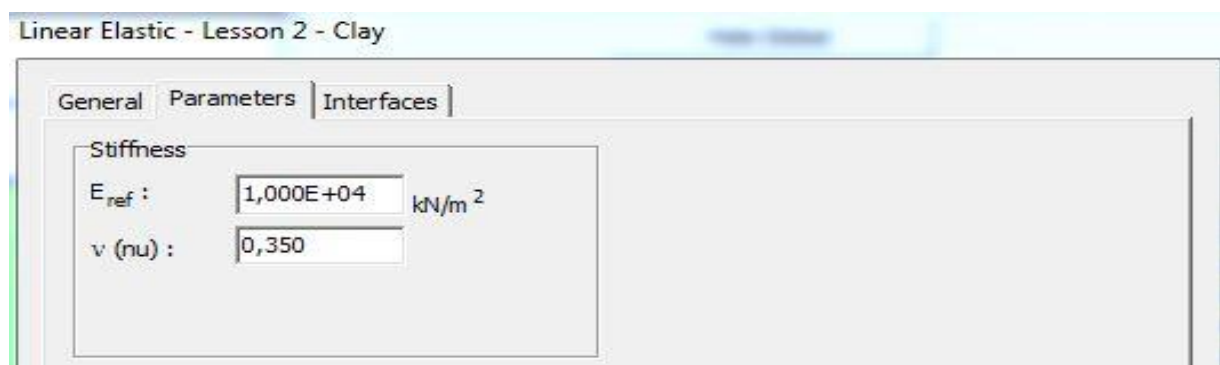


Figure 3.7. Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire.

3.5.2. Modèle de Mohr-Coulomb

Ce modèle est utilisé généralement comme 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 d'Young E , le coefficient de Poisson ν , la cohésion C , l'angle de frottement φ , l'angle de dilatance ψ . Les deux premiers paramètres (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)

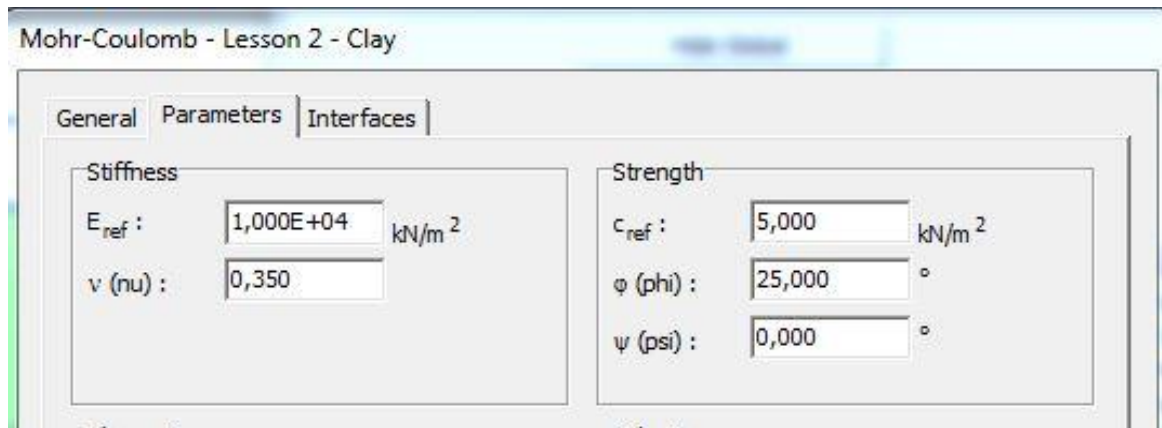


Figure 3.8. Fenêtre des paramètres de modèle du Mohr-Coulomb.

Tableau 3.1. 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	ν	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 modèle de Mohr-Coulomb, le module de Young est constant. Ce dernier nécessite des essais spéciaux. Il est conseillé de prendre un module moyen, par exemple celui correspondant à un niveau de 50 % du déviateur de rupture. (Figure 3.9).

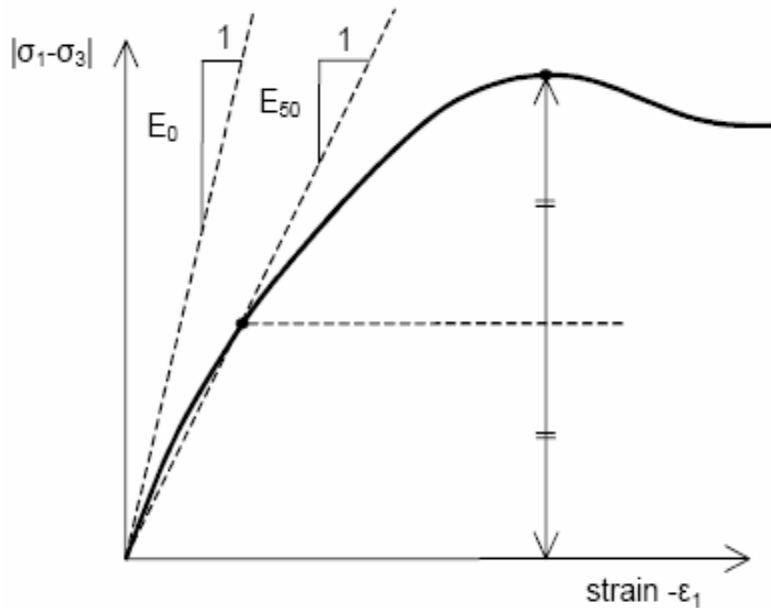


Figure 3.9. Définition du module à 50 % de la rupture (Abderrahim, 2011)

b. Coefficient de poisson « ν »

Les valeurs du coefficient de Poisson se situent entre 0.2 et 0.4 pour la majorité des sols. Celle-ci est réaliste pour l'application du poids propre. Pour certains problèmes de 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 »

La cohésion a la dimension d'une contrainte. PLAXIS peut manipuler des sables sans cohésion ($C = 0$), 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 (prendre $C > 0.2 \text{ KN/m}^2$). PLAXIS propose une option spéciale pour les couches dans lesquelles la cohésion croît avec la profondeur.

e. L'angle de dilatance « ψ »

L'angle de dilatance est donné en degrés. Sauf pour les couches très sûres consolidées, les sols argileux ne présentent aucune dilatance ($\psi = 0$).

« Ψ » est le paramètre le moins courant. Il peut cependant être facilement évalué par la règle suivante :

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

Pour les sables très lâches, généralement $\psi < 0^\circ$

3.5.3. Modèle pour les sols mous « Soft Soil model »

Ce modèle est un modèle dérivé du Cam-Clay qui permet de simuler le comportement de sols mous comme des argiles normalement consolidées ou de la tourbe. Ce modèle s'applique très bien aux situations où la consolidation primaire est prépondérante. L'idée de base de ce modèle est de prendre en compte l'effet d'écrouissage que provoque sur les argiles la pression moyenne. (Brinkgreve, 2003)

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.

3.5.4. Modèle de sol avec écoulement « Hardening Soil Model »

C'est un modèle hyperbolique de type élasto-plastique formulé dans le cadre de la plasticité avec écoulement en cisaillement. De plus, ce modèle prend en compte l'écoulement 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. (Houda, 2010)

3.5.5. 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. Ce modèle prend en compte la compression logarithmique. (LAMRI, 2008)

3.5.6. 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. (Mohammed, 2011)

3.5.7. Modèle défini par l'utilisateur « user defined model »

Cette option permet de définir et d'utiliser des lois de comportement autres que les modèles standard de PLAXIS. Pour une description plus détaillée de cette option, veuillez-vous reporter au manuel des modèles de matériaux. (Houda, 2010)

3.6. Conclusion

La modélisation numérique des ouvrages géotechniques réalisée à l'aide du logiciel PLAXIS est une approche simplifiée de la réalité géométrique de l'ouvrage.

Les modèles introduits dans les codes de calcul en éléments finis permettent la résolution des problèmes liés aux tassements, à la consolidation et à la rupture des sols.

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 04

Résultats et Interprétations

Sommaire du chapitre 04

4.1.	Introduction.....	51
4.2.	Le modèle géométrique	51
4.3.	Modélisation numérique.....	52
4.3.1.	Maillage et conditions aux limites.....	52
4.3.2.	Les conditions initiales	53
a.	Conditions hydrauliques	53
b.	Contraintes initiales.....	54
4.4.	Influence du trafic sur les tassements.....	55
4.4.1.	Cas 01 : Passage d'un véhicule léger sur une seule voie (LG-0)	56
4.4.2.	Cas 02 : Passage de véhicule léger sur les deux voies (LG-LG)	59
4.4.3.	Cas 03 : passage d'un véhicule lourd sur une seule voie (LR-0)	62
4.4.4.	Cas 04 : Passage de véhicule lourd sur les deux voies (LR-LR)	65
4.4.5.	Cas 05 : passage de véhicules lourds et légers sur les deux voies (LR-LG).....	69
4.5.	Conclusion	73

4.1. Introduction

L'objectif de la modélisation avec le logiciel PLAXIS est d'associer une meilleure représentation de la géométrie de l'ouvrage, des différentes couches du sol à travers les paramètres du modèle de comportement, et aussi pour vérifier les déplacements du corps de chaussée après l'application des charges (passage du trafic).

4.2. Le modèle géométrique

Le modèle géométrique choisi pour la modélisation de la chaussée, est présenté dans la figure 4.1.

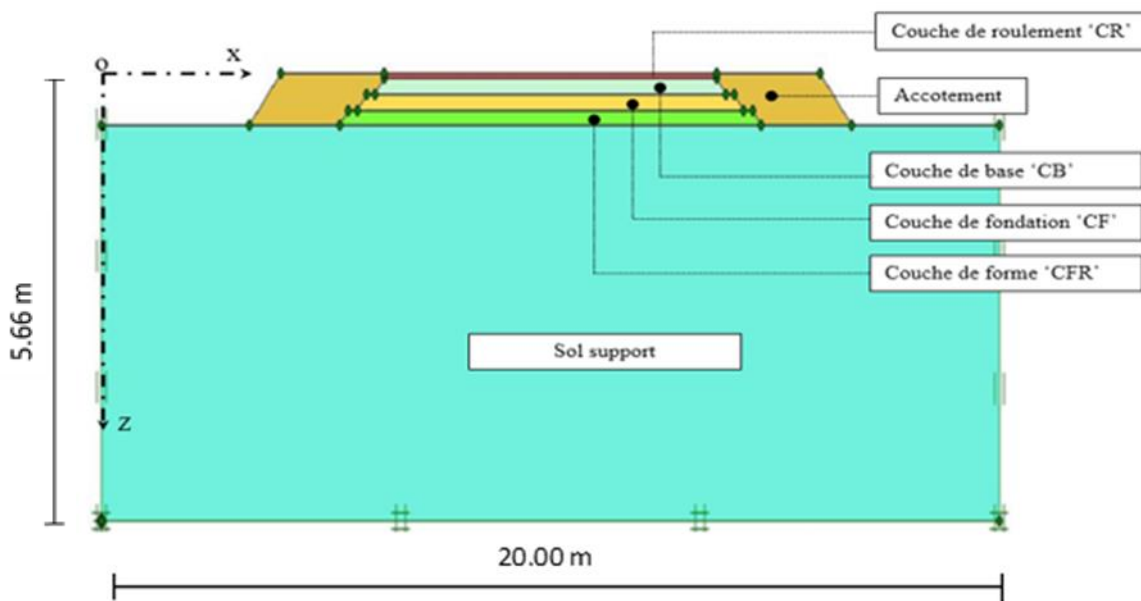


Figure 4.1. Modèle géométrique du corps de chaussée.

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. La loi élastique pour la couche de roulement.

Ces modèles ont été utilisés pour le calcul avec les données géotechniques qui sont récapitulé dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1. Paramètres géotechniques.

Matériaux	Couche de roulement (CR)	Accotement	Couche de base (CB)	Couche de fondation (CF)	Couche de forme (CFR)	Sol support (SS)
Épaisseur (m)	0,06	0,66	0,2	0,2	0,2	5
Module de Young [E] (KN/m ²)	5,4.10 ⁵	3.10 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	0,35
Le poids volumique[γ] (KN/m ³)	25	22	21,3	22	22	20
Cohesion [C] (KN/m ²)	/	20	30	20	20	20
Angle de frottement(φ) (degré)	/	44	43	44	36	36
Angle de dilatance (ψ) (degré)	/	14	13	14	6	6

4.3. Modélisation numérique

4.3.1. Maillage et conditions aux limites

Les éléments utilisés pour le maillage sont des éléments triangulaires à 15 nœuds. Qui nous donne une distribution plus fine des nœuds (Figure 4.2), ce qui implique que les résultats vont être plus précis par rapport au même maillage mais 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 sont celles se basant sur les équations d'équilibre mécanique (Soit cinématique, soit statique), dans notre cas, les déplacements sont imposés nuls selon l'axe OX à gauche et à droite du modèle, nuls selon les axes OX et OZ sur le fond du sol support (Figure 4.2).

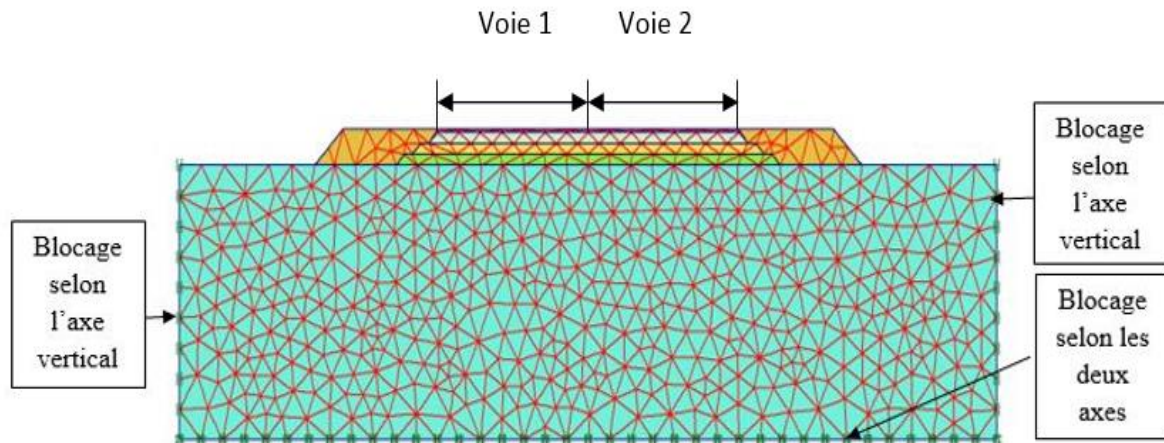


Figure 4.2. Maillage et conditions aux limites du corps de chaussée

4.3.2. Les conditions initiales

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

a. Conditions hydrauliques

C'est la définition du niveau de la nappe phréatique. Comme on ne va pas prendre en considération les pressions interstitielles, la nappe phréatique est positionnée à la base du sol support (Figure 4.3).

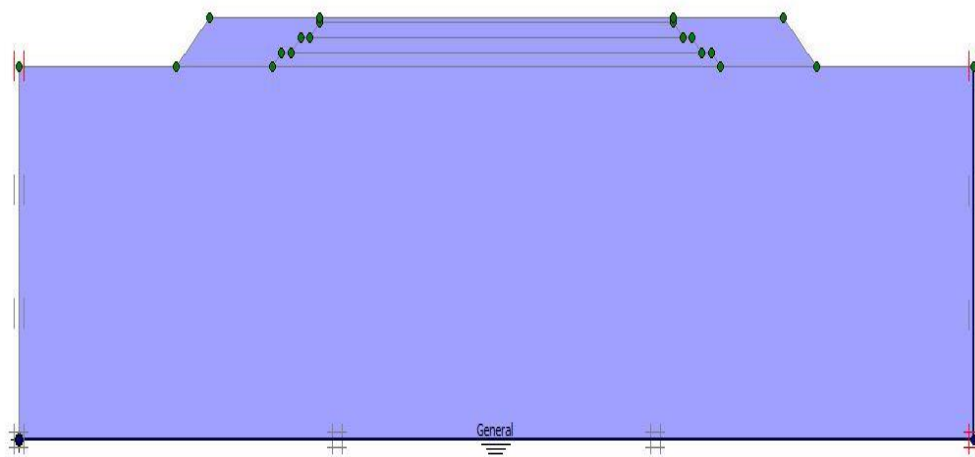


Figure 4.3. Position de la nappe phréatique.

b. 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 des terres au repos K_0 ($K_0=1-\sin\phi$), et puis activé le poids du sol intégralement (Figure 4.4).

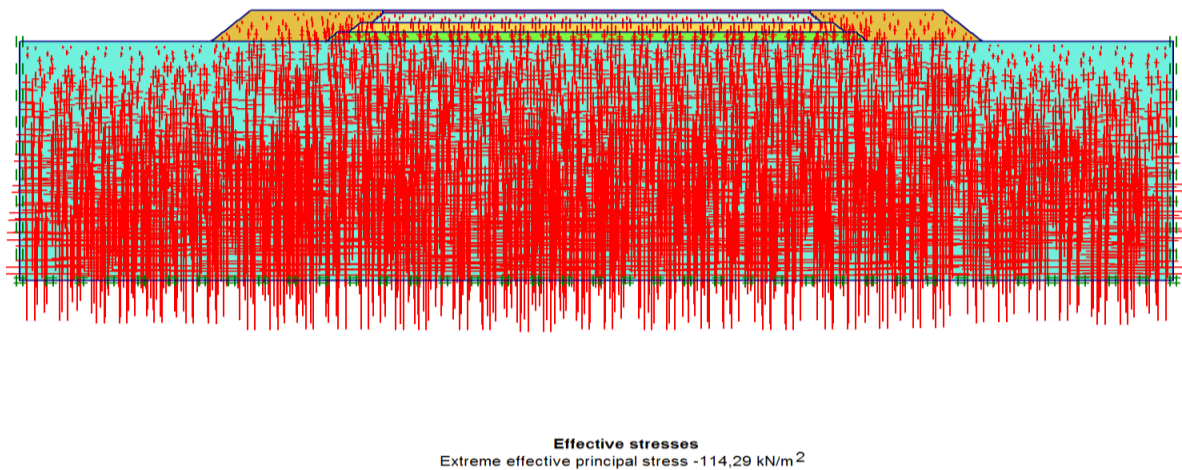


Figure 4.4. Génération des contraintes

4.4. Influence du trafic sur les tassements

Le poids des véhicules est transmis à la chaussée sous forme de pressions par l'intermédiaire des pneumatiques (Figure 4.5), pour les véhicules légers cette pression est de l'ordre de 220 KN/m^2 , et de 660 KN/m^2 pour les véhicules lourds.

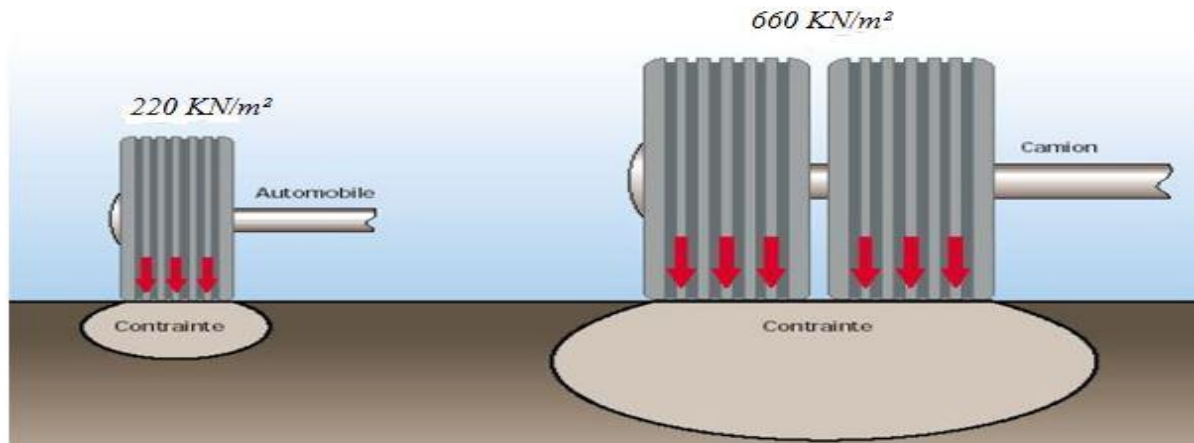


Figure 4.5. Pression transmise par les véhicules sur la chaussée

Les tassements des couches de chaussée sont présentés sur les interfaces supérieures de chaque couche (Figure 4.6)

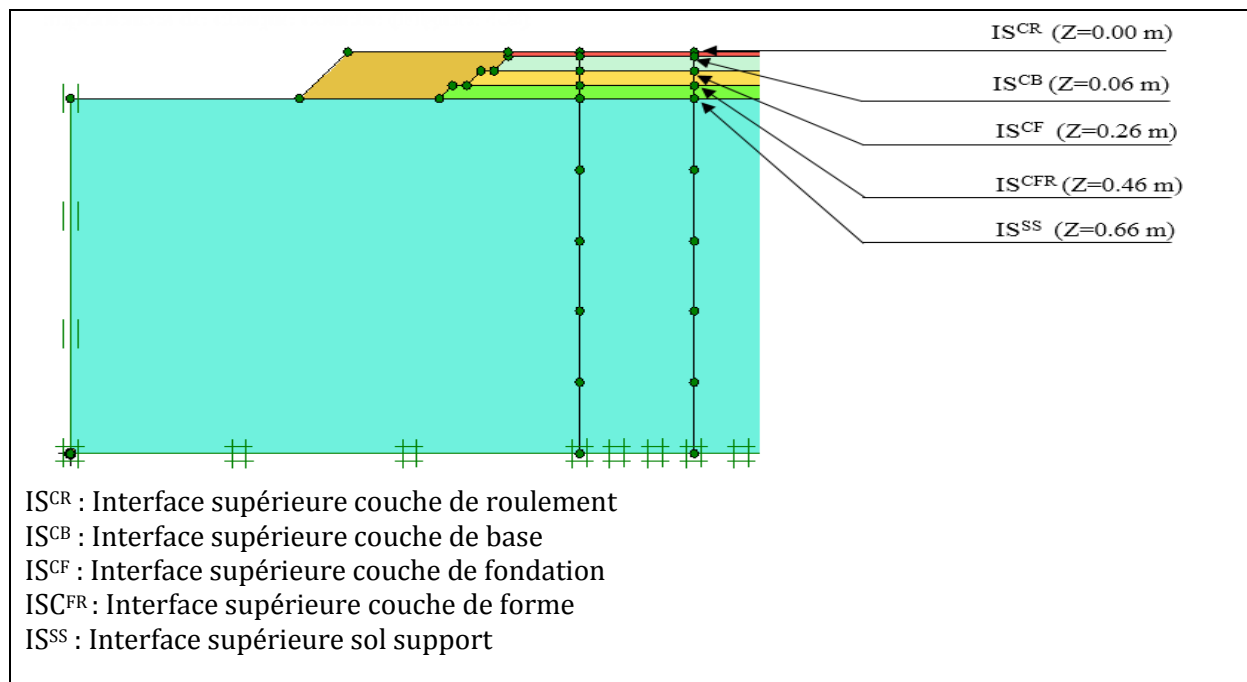


Figure 4.6. Interfaces des couches du corps de chaussée.

4.4.1. Cas 01 : Passage d'un véhicule léger sur une seule voie (LG-0)

Le passage de véhicule léger sur une seule voie d'une chaussée engendre des tassements qui se concentrent au-dessous de chaque roue du véhicule (Figure 4.7). La roue R[A] est située à $X=7.33\text{m}$, et la roue R[B] est à $X= 8.97\text{m}$.

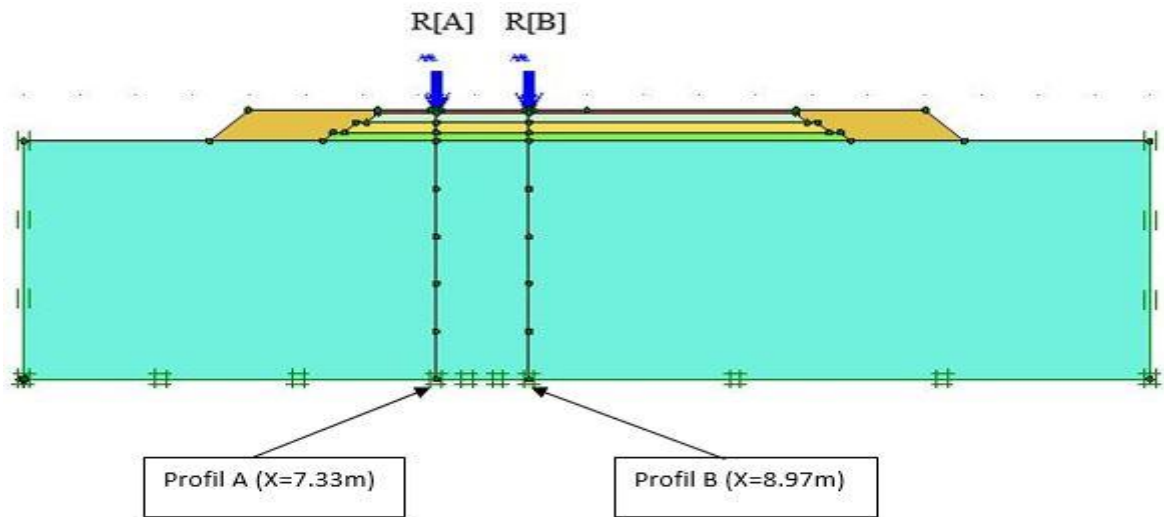


Figure 4.7. Position des profils en X sous les roues (Cas 01 : LG-0).

Les tassements obtenus sur la figure 4.8, représentent l'effet du passage d'un véhicule de poids léger ($P= 220\text{KN/m}^2$) sur une seule voie.

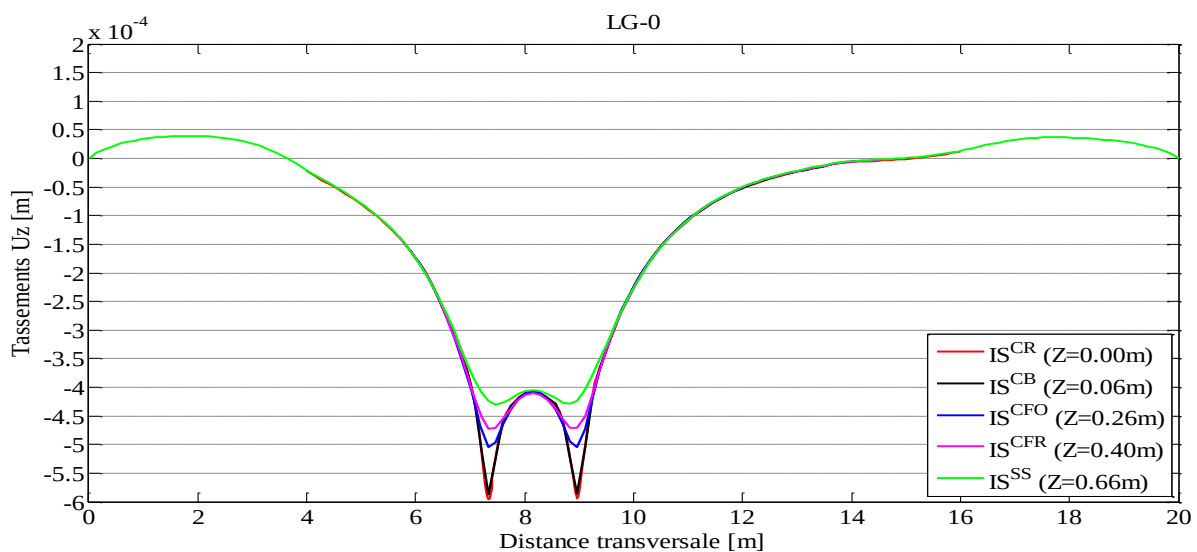


Figure 4.8. Évolution des tassements sur les interfaces supérieures (Cas01 : LG-0).

Tableau 4.2. Tassements aux niveaux des interfaces des couches
(Cas01 : LG-0).

Interfaces	IS ^{CR} (Z=0.00m)	IS ^{CB} (Z=0.06m)	IS ^{CF} (Z=0.26m)	IS ^{CFR} (Z=0.46m)	IS ^{SS} (Z=0.66m)
Tassements sous R[A]	5.95 10 ⁻⁴	5.87 10 ⁻⁴	5.05 10 ⁻⁴	4.72 10 ⁻⁴	4.24 10 ⁻⁴
Tassements sous R[B]	5.94 10 ⁻⁴	5.86 10 ⁻⁴	5.04 10 ⁻⁴	4.71 10 ⁻⁴	4.23 10 ⁻⁴

La figure 4.9 représente l'évolution des tassements sur les profils A et B, et les tassements obtenus aux profondeurs suivantes : 1.66m, 2.66m, 3.66m, 4.66m et 5.66m sont récapitulés dans le tableau 4.3

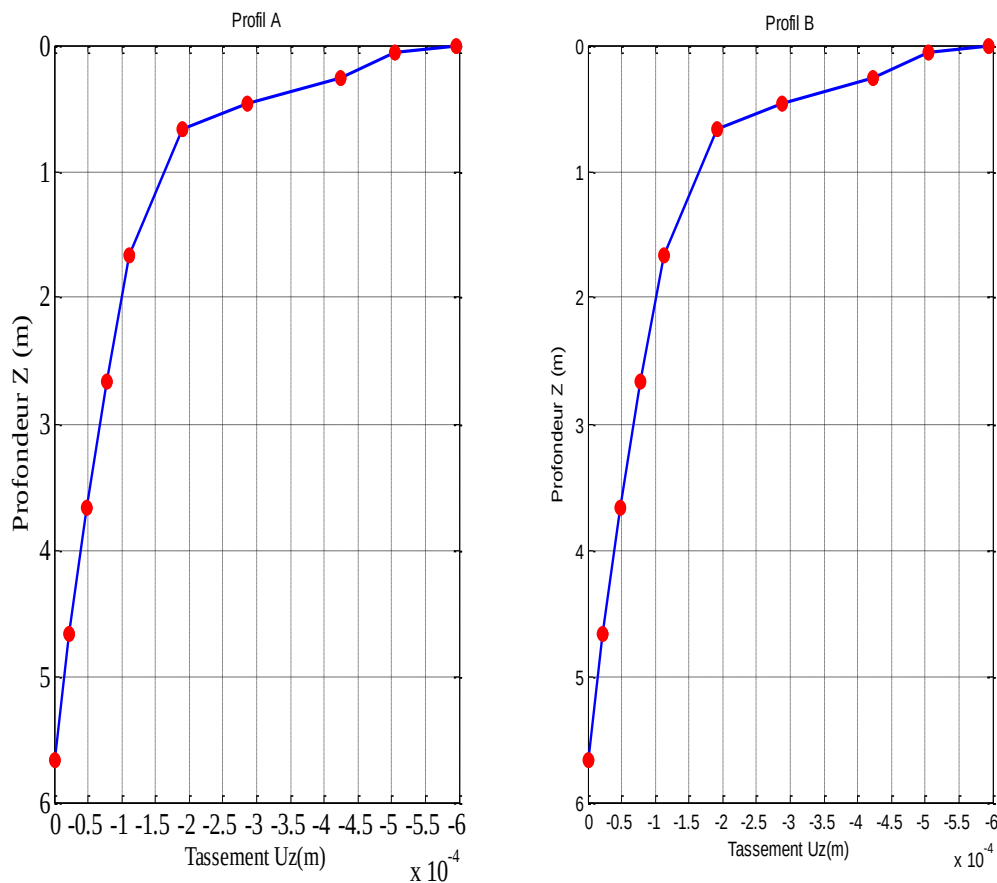
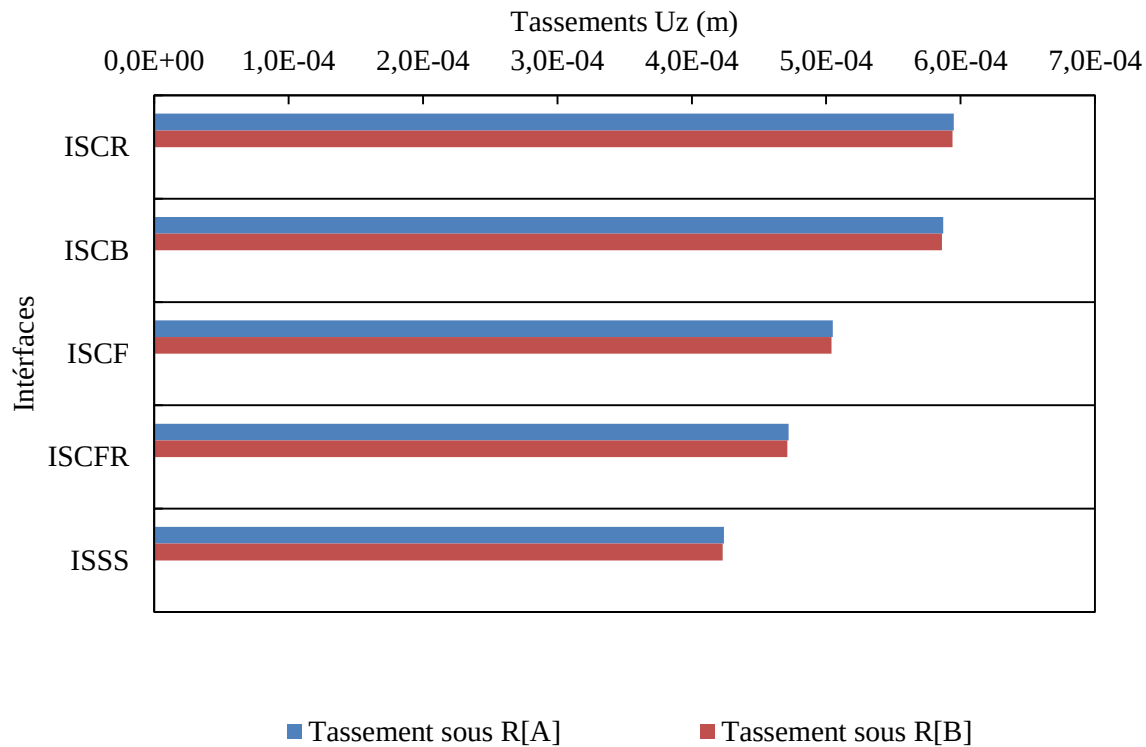


Figure 4.9. Évolution des tassements selon les profils A et B (Cas 01 : LG-0).

Tableau 4.3. Tassements du sol support (Cas01 : LG-0).

Profondeurs (m)	Z=1.66m	Z=2.66m	Z=3.66m	Z=4.66m	Z=5.66m
profil A (m)	$2.87 \cdot 10^{-4}$	$1.90 \cdot 10^{-4}$	$1.11 \cdot 10^{-4}$	$0.48 \cdot 10^{-4}$	0
profil B (m)	$2.87 \cdot 10^{-4}$	$1.91 \cdot 10^{-4}$	$1.11 \cdot 10^{-4}$	$0.48 \cdot 10^{-4}$	0

**Figure 4.10.** Tassements finaux sous R[A] et R[B]-(Cas 01 : LG-0)

Les tassements du corps de chaussée après passage d'un véhicule léger ($P=220\text{KN/m}^2$) sur une seule voie sont en mode décroissant (Figure 4.8) (Tableau 4.2).

Les roues R[A] et R[B] engendrent les mêmes tassements du corps de chaussée, IS^{CR} subit un tassement maximal de $U_z = 5.95 \times 10^{-4}\text{m}$, puis il diminue en profondeur.

A une profondeur de $Z=0.06\text{m}$ le tassement diminue à $5.87 \times 10^{-4}\text{m}$, puis $U_z = 5.05 \times 10^{-4}\text{m}$ à une profondeur de $Z=0.26\text{m}$, à $Z=0.46\text{m}$ $U_z=4.72 \times 10^{-4}\text{m}$, et il atteint $4.24 \times 10^{-4}\text{m}$ à IS^{ss} . (Figure 4.10).

Les tassements du sol support sont identiques sur les deux profils [A] et [B], à $Z=1.66\text{m}$ les tassements ont atteint une valeur de $U_z= 2.87 \times 10^{-4}\text{m}$ (tassement maximal du sol support) puis il diminue en profondeur jusqu'à un tassement nul à $Z=5.66\text{m}$. (tableau 4.3).

4.4.2. Cas 02 : Passage de véhicule léger sur les deux voies (LG-LG)

Le passage de véhicule léger sur une chaussée provoque des tassements des couches de la structure de chaussée. La roue R[A] est située à $X=7.33\text{m}$, la roue R[B] est à $X=8.97\text{m}$, la roue R[C] est à $X=11.03\text{m}$ et la roue R[D] est à $X=12.67\text{m}$. (Figure 4.11)

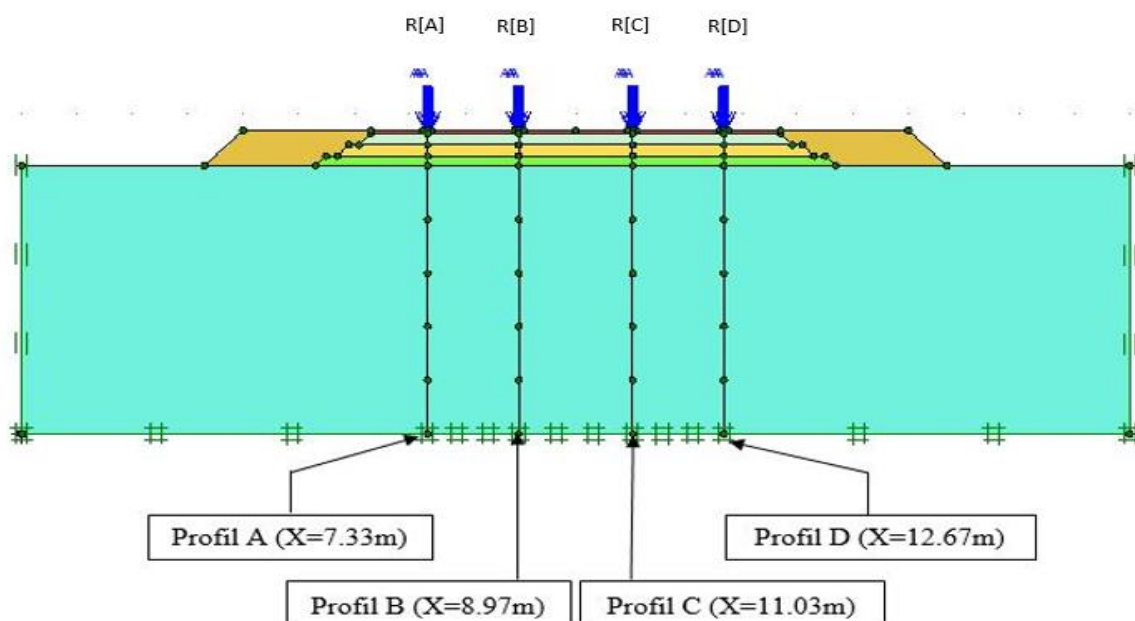


Figure 4.11. Position des profils en X sous les roues (Cas 02 : LG-LG).

La figure 4.12 représente l'évolution des tassements sur les interfaces supérieures des couches du corps de chaussée après passage de trafic léger sur les deux voies.

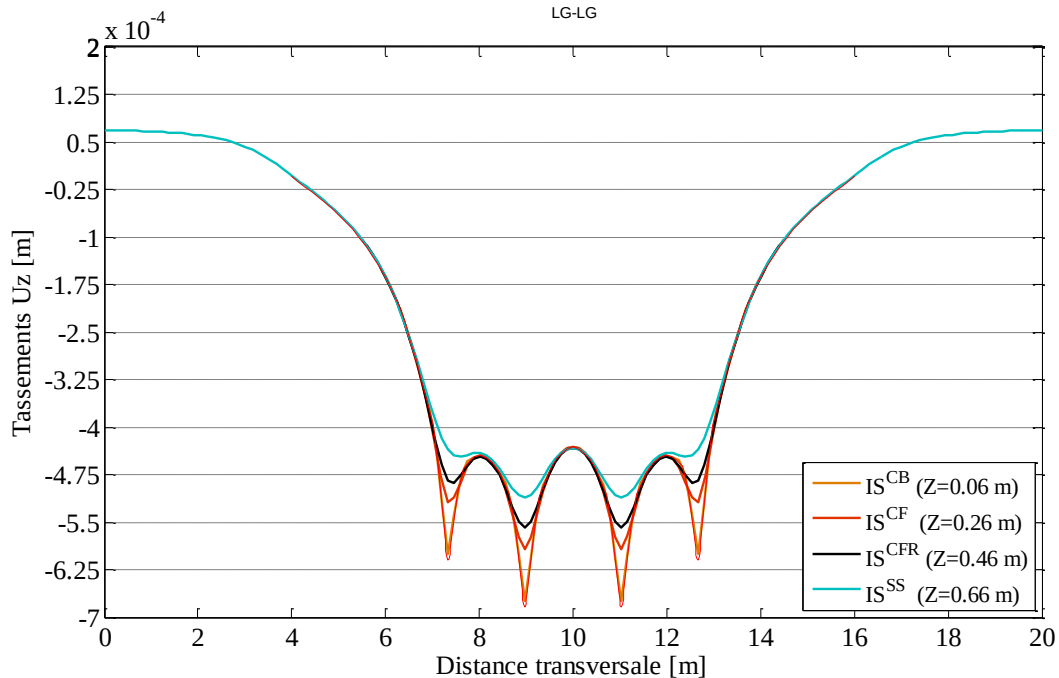


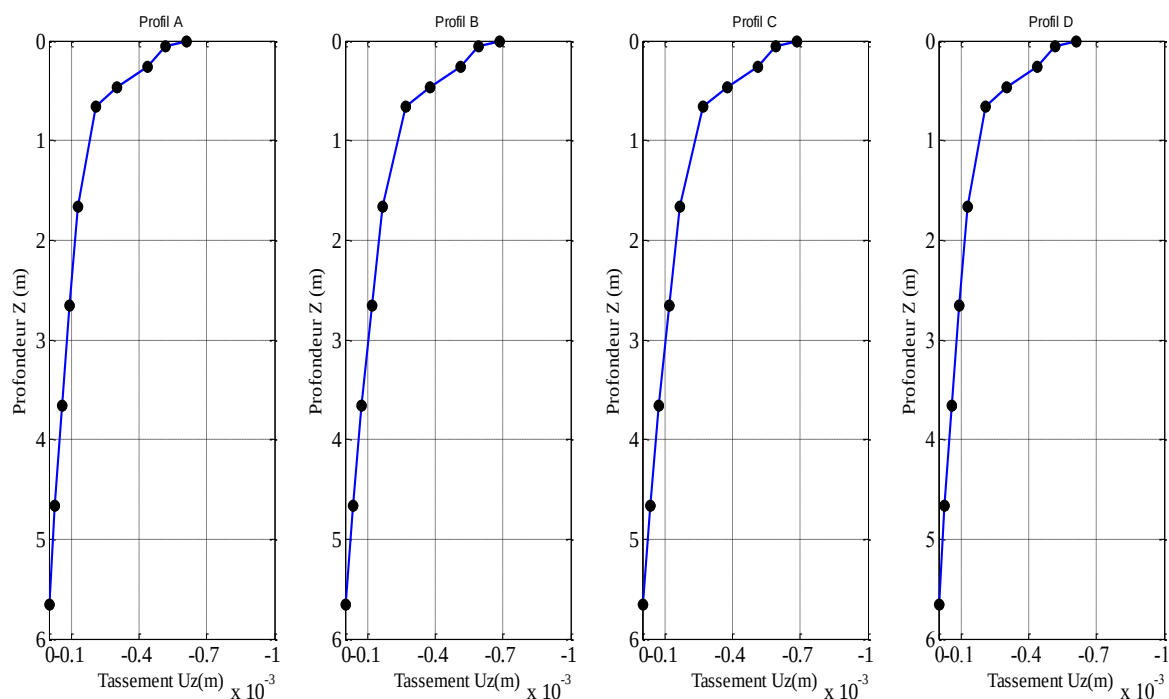
Figure 4.12.Évolution des tassements sur les interfaces supérieures
(cas02 : LG-LG).

Tableau 4.4. Tassements aux niveaux des interfaces des couches
(cas02 : LG-LG).

Interfaces	IS^{CR} (Z=0.00m)	IS^{CB} (Z=0.06m)	IS^{CF} (Z=0.26m)	IS^{CFR} (Z=0.46m)	IS^{SS} (Z=0.66m)
Tassement sous R[A]	$6.09 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$5.18 \cdot 10^{-4}$	$4.88 \cdot 10^{-4}$	$4.47 \cdot 10^{-4}$
Tassement sous R[B]	$6.84 \cdot 10^{-4}$	$6.74 \cdot 10^{-4}$	$5.92 \cdot 10^{-4}$	$5.59 \cdot 10^{-4}$	$5.12 \cdot 10^{-4}$
Tassement sous R[C]	$6.84 \cdot 10^{-4}$	$6.74 \cdot 10^{-4}$	$5.92 \cdot 10^{-4}$	$5.59 \cdot 10^{-4}$	$5.12 \cdot 10^{-4}$
Tassement sous R[D]	$6.09 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$5.18 \cdot 10^{-4}$	$4.88 \cdot 10^{-4}$	$4.47 \cdot 10^{-4}$

Tableau 4.5. Tassements du sol support (Cas02 : LG-LG).

Profondeurs (m)	Z=1.66m	Z=2.66m	Z=3.66m	Z=4.66m	Z=5.66m
profil A (m)	$3.01 \cdot 10^{-4}$	$2.08 \cdot 10^{-4}$	$1.27 \cdot 10^{-4}$	$0.58 \cdot 10^{-4}$	0
profil B (m)	$3.76 \cdot 10^{-4}$	$2.67 \cdot 10^{-4}$	$1.65 \cdot 10^{-4}$	$0.74 \cdot 10^{-4}$	0
profil C (m)	$3.76 \cdot 10^{-4}$	$2.67 \cdot 10^{-4}$	$1.65 \cdot 10^{-4}$	$0.74 \cdot 10^{-4}$	0
profil D (m)	$3.01 \cdot 10^{-4}$	$2.08 \cdot 10^{-4}$	$1.27 \cdot 10^{-4}$	$0.58 \cdot 10^{-4}$	0

**Figure 4.13.**Évolution des tassements selon les profils A, B, C et D
(Cas 02 : LG-LG).

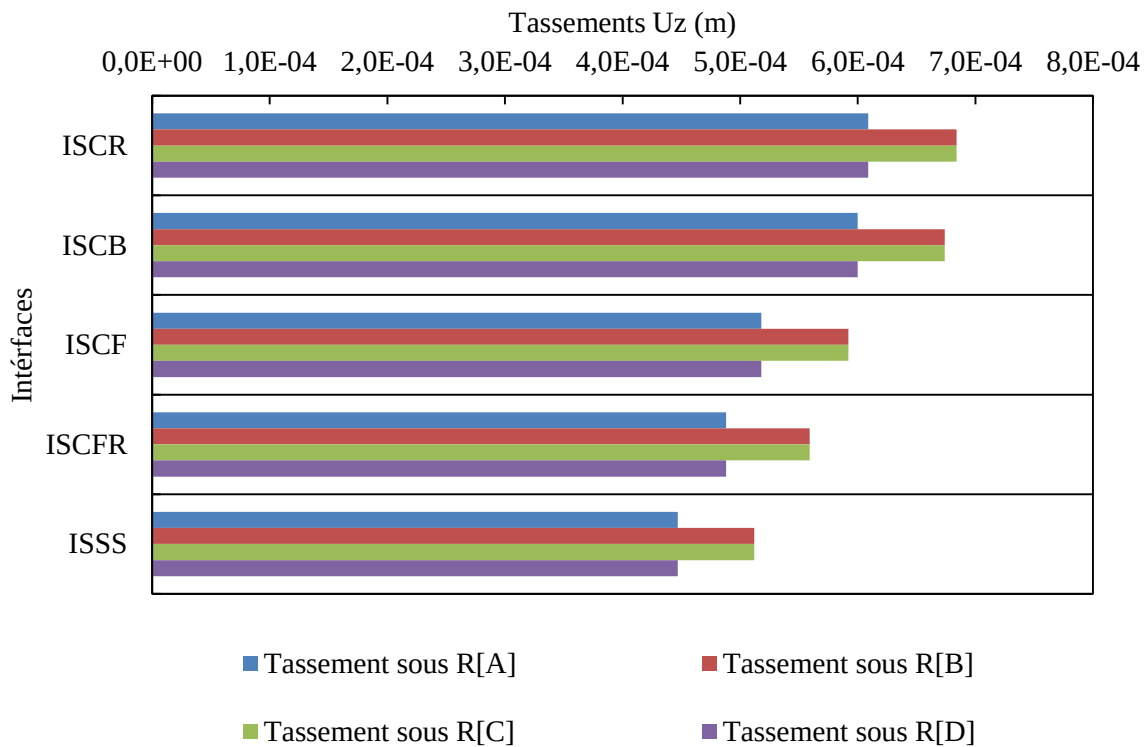


Figure 4.14. Tassements finaux sous R[A], R[B], R[C] et R[D] - (Cas02 : LG-LG)

Après le passage de véhicules légers sur les deux voies, le corps de chaussée subit la même pression ($P=220\text{KN/m}^2$).

Les tassements obtenus sous chaque roue diminuent en profondeur (Tableau 4.4), (Figure 4.14), et les tassements maximaux sont obtenus à IS^{CR} $U_z \text{ max R[A]} = U_z \text{ max R[D]} = 6.09 \times 10^{-4}\text{m}$; $U_z \text{ max R[B]} = U_z \text{ max R[C]} = 6.84 \times 10^{-4}\text{m}$.

Les tassements du sol support sur les profils [B] et [C] sont supérieurs aux tassements des profils [A] et [D] (tableau 4.5), (Figure 4.13)

4.4.3. Cas 03 : passage d'un véhicule lourd sur une seule voie (LR-0)

Le passage d'un véhicule lourd sur une seule voie engendre des tassements qui se concentrent au-dessous de chaque roue du véhicule (Figure 4.15). La roue R[A] est située à $X=7.20\text{m}$, la roue R[B] est à $X=9.10\text{m}$.

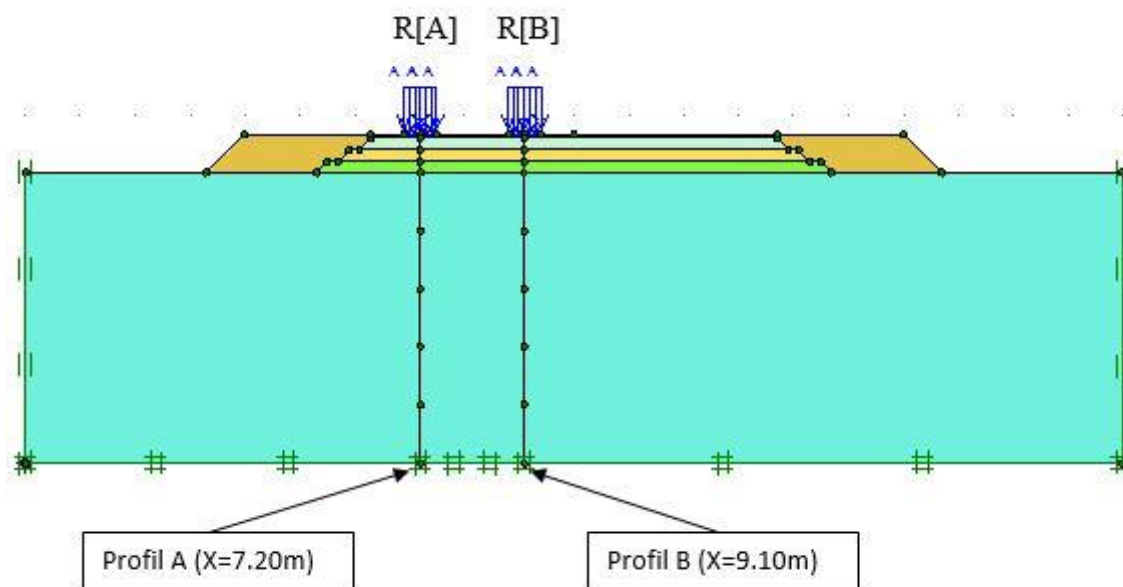


Figure 4.15.Position des profils en X sous les roues (Cas 03 : LR-0).

Les tassements obtenus sur la figure 4.16 représente l'effet du passage d'un véhicule lourd ($P=660\text{KN/m}^2$) sur une seule voie.

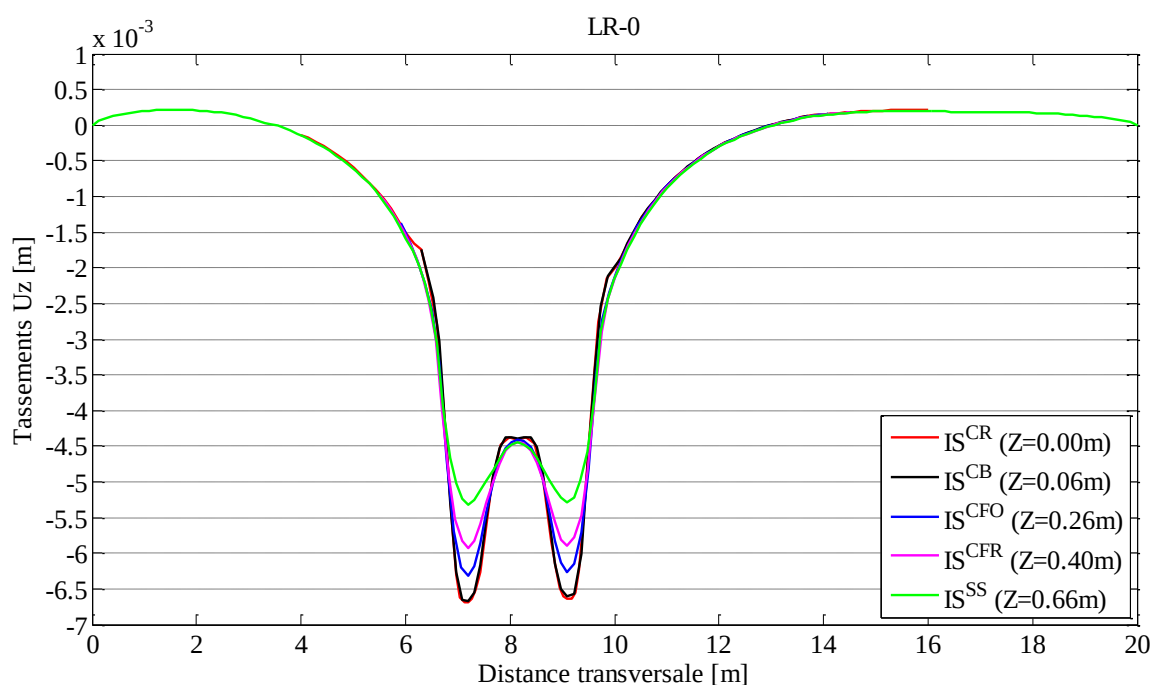


Figure 4.16.Évolution des tassements sur les interfaces supérieures (Cas03 : LR-0).

Tableau 4.6. Tassements aux niveaux des interfaces des couches
(Cas03 : LR-0).

Interfaces	IS ^{CR} (Z=0.00m)	IS ^{CB} (Z=0.06m)	IS ^{CF} (Z=0.26m)	IS ^{CFR} (Z=0.46m)	IS ^{SS} (Z=0.66m)
Tassements sous R[A]	6.69 10 ⁻³	6.67 10 ⁻³	6.31 10 ⁻³	5.93 10 ⁻³	5.32 10 ⁻³
Tassements sous R[B]	6.64 10 ⁻³	6.60 10 ⁻³	6.26 10 ⁻³	5.89 10 ⁻³	5.30 10 ⁻³

Tableau 4.7. Tassements du sol support (Cas03 : LR-0).

Profondeurs (m)	Z=1.66m	Z=2.66m	Z=3.66m	Z=4.66m	Z=5.66m
profil A (m)	3.53 10 ⁻³	1.91 10 ⁻³	1.17 10 ⁻³	0.59 10 ⁻³	0
profil B (m)	3.54 10 ⁻³	2.03 10 ⁻³	1.19 10 ⁻³	0.53 10 ⁻³	0

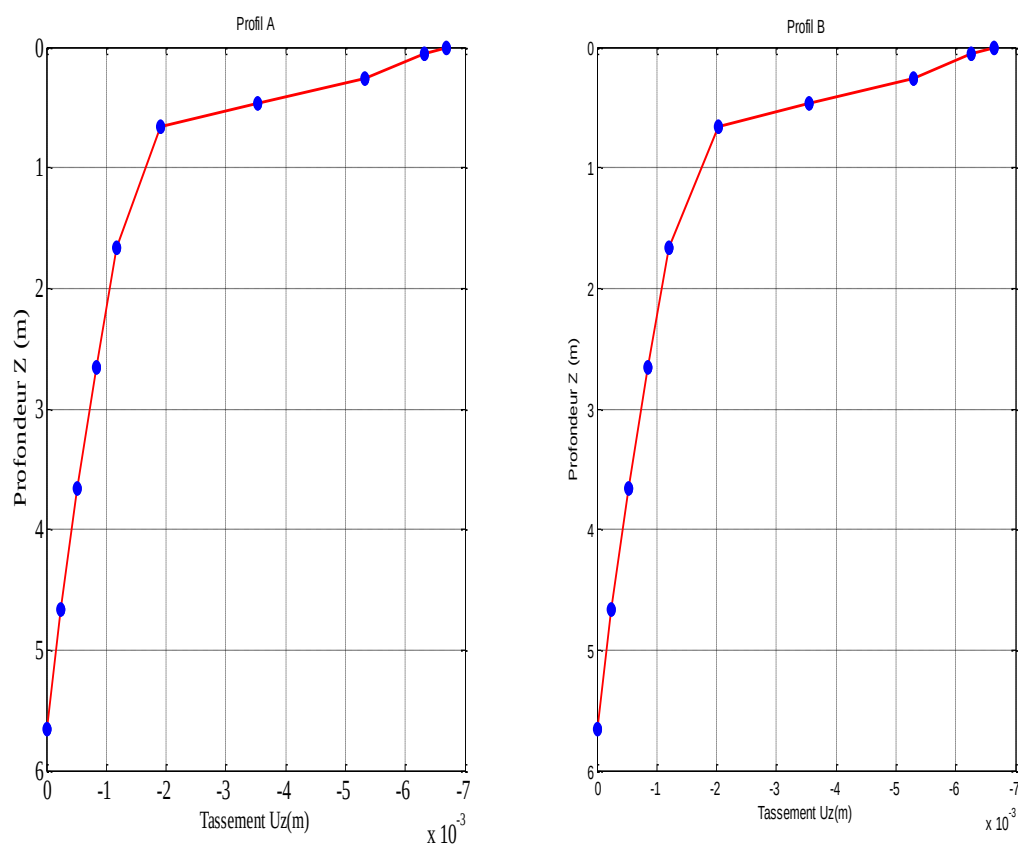


Figure 4.17.Évolution des tassements selon les profils A et B (Cas 03 : LR-0).

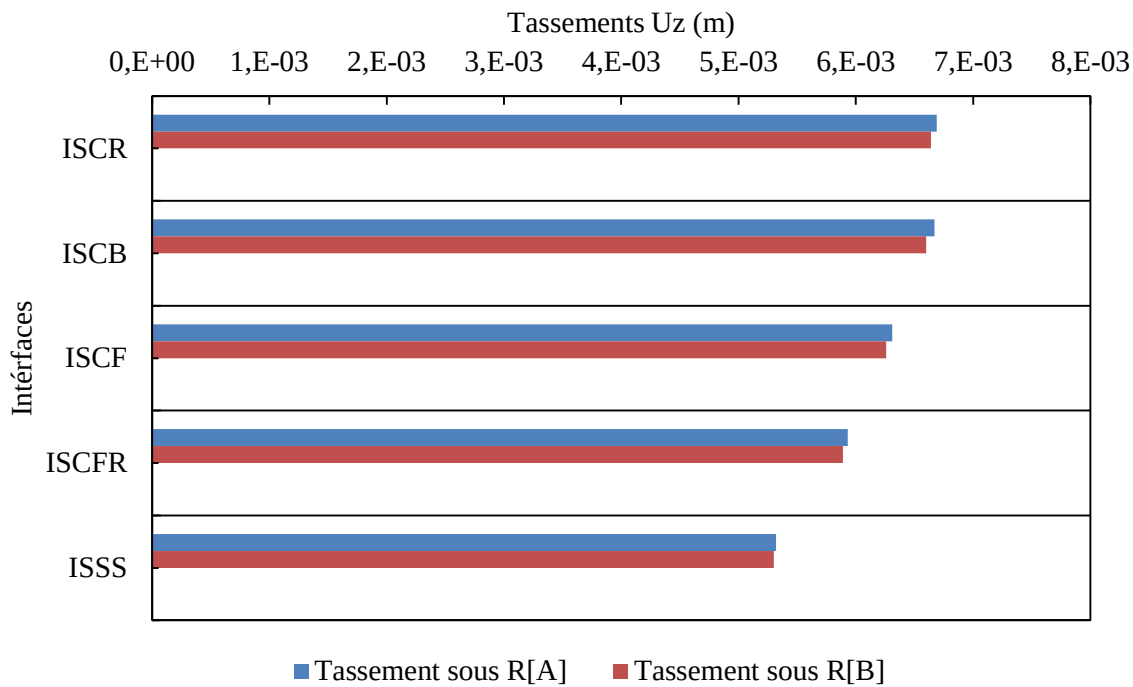


Figure 4.18. Tassements finaux sous R[A] et R[B]-(Cas03 : LR-0)

Le passage d'un véhicule lourd ($P=660\text{KN/m}^2$) sur une seule voie engendre des tassements concentrés au-dessous des roues du trafic (figure 4.15), ces tassements ont une valeur maximale au voisinage de $U_z \text{ max} = 6.65 \times 10^{-3}\text{m}$ à $\text{ISCR}(Z=0.00\text{m})$ (Tableau 4.6).

Les tassements du sol support des deux profils [A] et [B] diminuent de $U_z (Z=1.66\text{m}) = 3.54 \times 10^{-3}\text{m}$ jusqu'à atteindre un tassement nul $U_z (Z=5.66\text{m}) = 0\text{m}$ (Tableau 4.7).

4.4.4. Cas 04 : Passage de véhicule lourd sur les deux voies (LR-LR)

Le passage de véhicule lourd sur les deux voies d'un corps de chaussée engendre des tassements des couches de la chaussée au-dessous de chaque roue du véhicule (Figure 4.19). La roue R[A] est située à $X=7.20\text{m}$, la roue R[B] est à $X=9.10\text{m}$, la roue R[C] est à $X=10.90\text{m}$ et la roue R[D] est à $X=12.80\text{m}$.

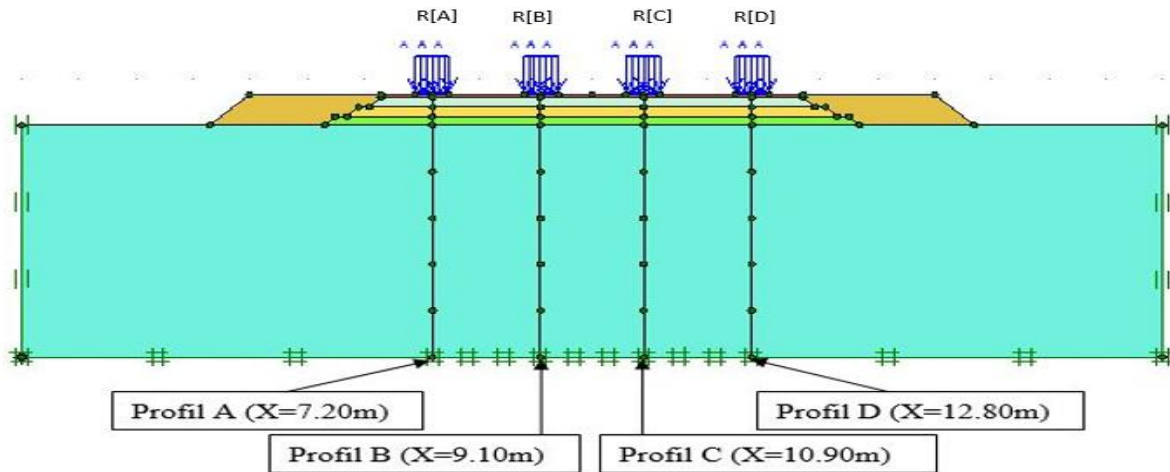


Figure 4.19. Position des profils en X sous les roues (Cas 04 : LR-LR).

Les tassements obtenus sur la figure 4.20 représentent l'effet du passage de deux véhicules de poids lourds d'ordre 660KN/m^2

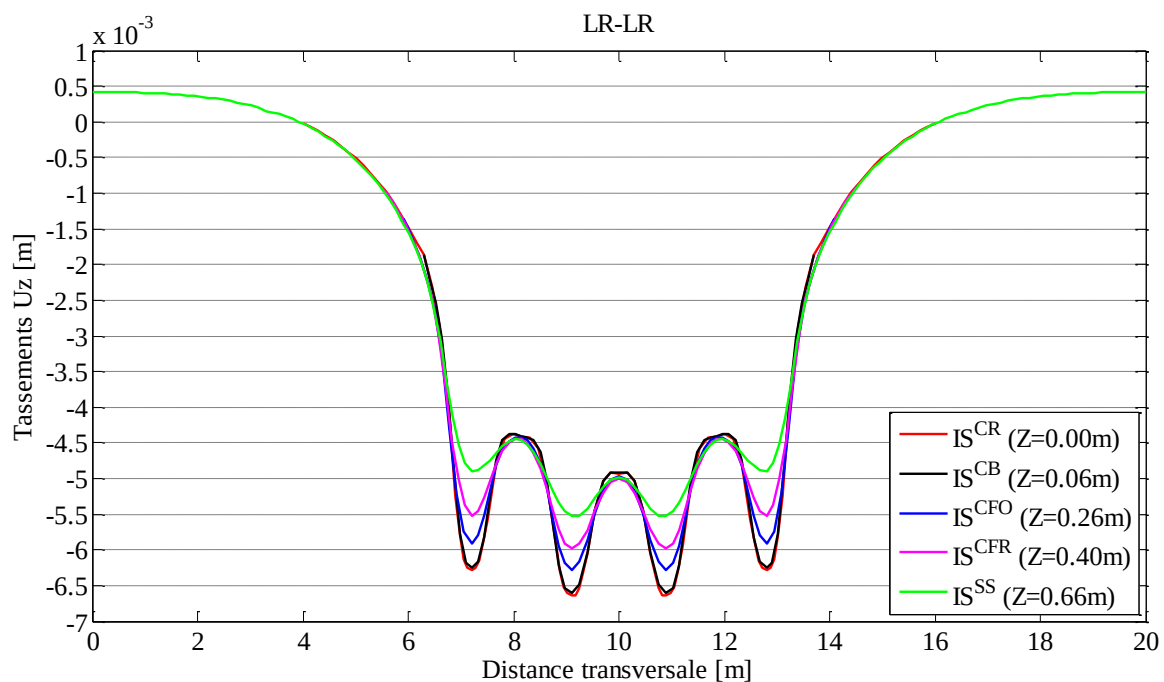


Figure 4.20. Évolution des tassements sur les interfaces supérieures (Cas 04 : LR-LR).

Tableau 4.8. Tassements aux niveaux des interfaces des couches
(cas04 : LR-LR).

Interfaces	IS ^{CR} (Z=0.00m)	IS ^{CB} (Z=0.06m)	IS ^{CF} (Z=0.26m)	IS ^{CFR} (Z=0.46m)	IS ^{SS} (Z=0.66m)
Tassements sous R[A]	6.28 10 ⁻³	6.25 10 ⁻³	5.90 10 ⁻³	5.52 10 ⁻³	4.89 10 ⁻³
Tassements sous R[B]	6.64 10 ⁻³	6.61 10 ⁻³	6.29 10 ⁻³	5.98 10 ⁻³	5.53 10 ⁻³
Tassements sous R[C]	6.64 10 ⁻³	6.61 10 ⁻³	6.29 10 ⁻³	5.98 10 ⁻³	5.53 10 ⁻³
Tassements sous R[D]	6.28 10 ⁻³	6.25 10 ⁻³	5.90 10 ⁻³	5.52 10 ⁻³	4.89 10 ⁻³

Tableau 4.9. Tassements du sol support (Cas04 : LR-LR).

Profondeurs (m)	Z=1.66m	Z=2.66m	Z=3.66m	Z=4.66m	Z=5.66m
profil A (m)	3.14 10 ⁻³	2.12 10 ⁻³	1.32 10 ⁻³	0.62 10 ⁻³	0
profil B (m)	4.14 10 ⁻³	3.10 10 ⁻³	1.88 10 ⁻³	0.86 10 ⁻³	0
profil C (m)	4.14 10 ⁻³	3.10 10 ⁻³	1.88 10 ⁻³	0.86 10 ⁻³	0
profil D (m)	3.14 10 ⁻³	2.12 10 ⁻³	1.32 10 ⁻³	0.62 10 ⁻³	0

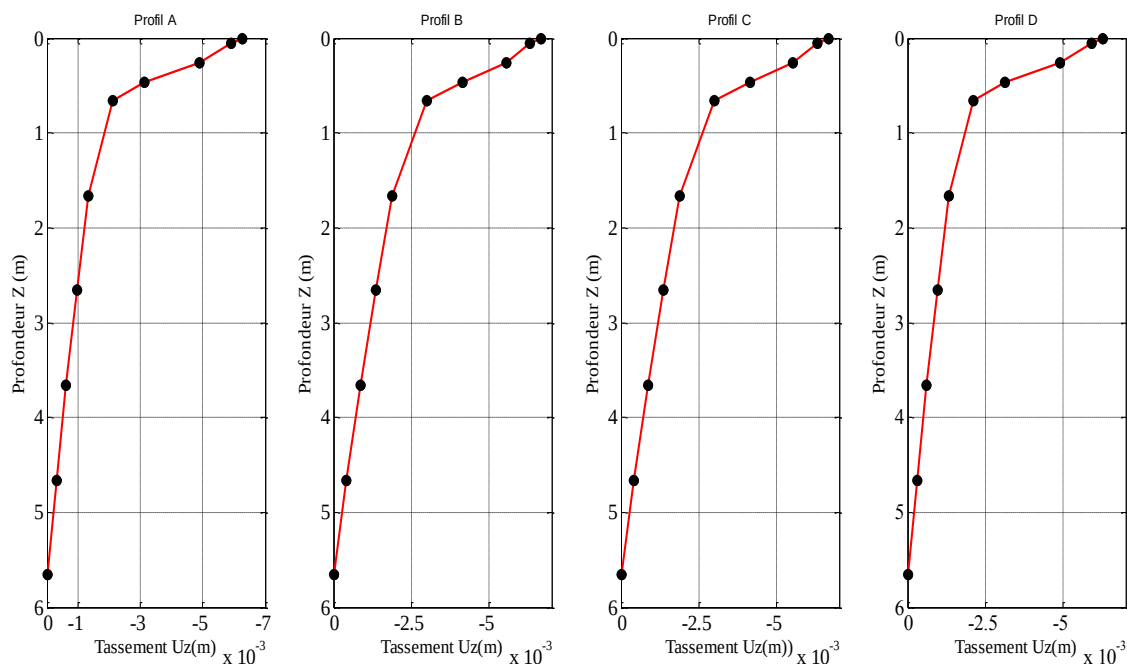


Figure 4.21.Évolution des tassements selon les profils A, B, C et D
(Cas 04 : LR-LR).

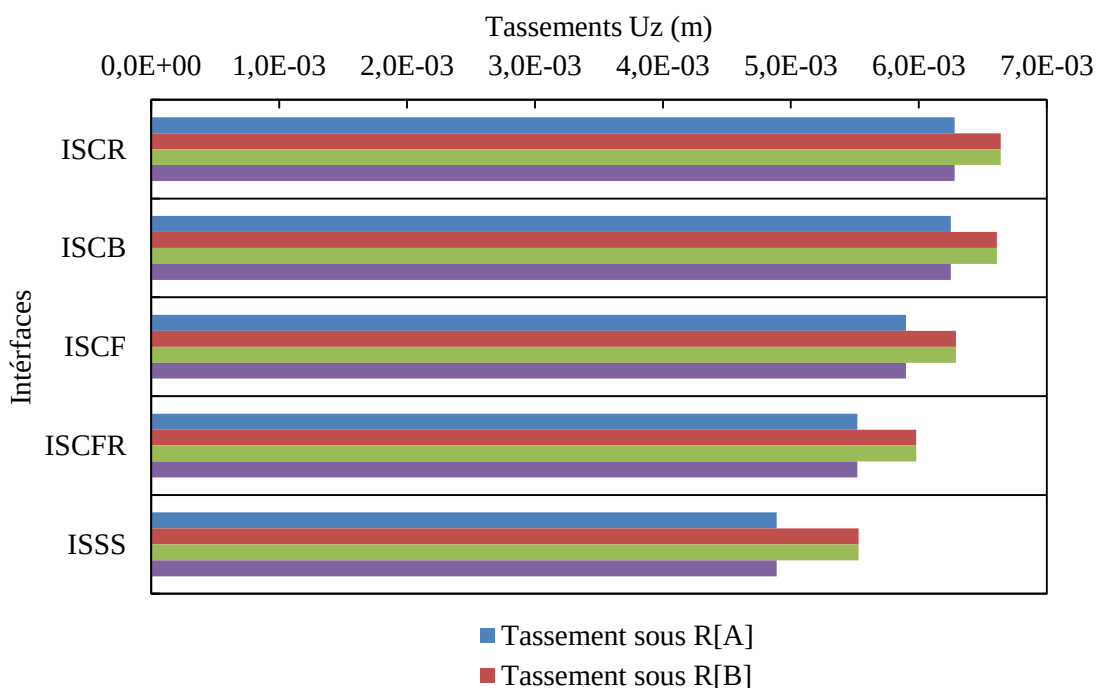


Figure 4.22.Tassements finaux sous R[A], R[B], R[C] et R[D]-(Cas04 : LR-LR)

Après le passage des véhicules lourds sur les deux voies, le corps de chaussée subit la même pression ($P = 660 \text{ kN/m}^2$).

Les tassements obtenus sous chaque roue diminuent en profondeur (Tableau 4.8)(Figure 4.20), et les tassements maximaux sont obtenus à IS^{CR} $Uz \max R[A] = Uz \max R[D] = 6.64 \times 10^{-3} \text{ m}$; $Uz \max R[B] = Uz \max R[C] = 6.28 \times 10^{-3} \text{ m}$ (Figure 4.22)

Les tassements du sol support sur les profils [B] et [C] sont supérieurs aux tassements des profils [A] et [D] (Tableau 4.9).

4.4.5. Cas 05 : passage de véhicules lourds et légers sur les deux voies (LR-LG)

Le passage de véhicule lourd et léger sur les deux voies provoque des tassements qui vont se concentrer au-dessous de chaque roue du véhicule (figure 4.23) La roue R[A] est située à $X = 7.20 \text{ m}$, la roue R[B] est à $X = 9.10 \text{ m}$, la roue R[C] est à $X = 11.03 \text{ m}$ et la roue R[D] est à $X = 12.67 \text{ m}$.

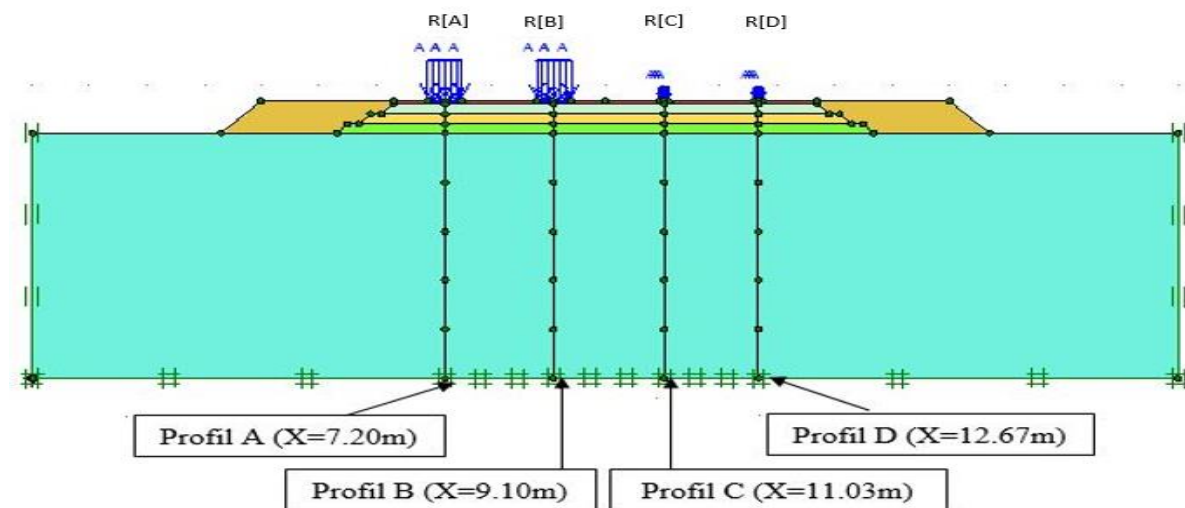


Figure 4.23. Position des profils en X sous les roues (Cas 05 : LR-LG).

Les tassements obtenus sur la figure 4.24 représente l'effet du passage de deux véhicules de poids différents (véhicule lourd de 660KN/m² et véhicule léger de 220KN/m²)

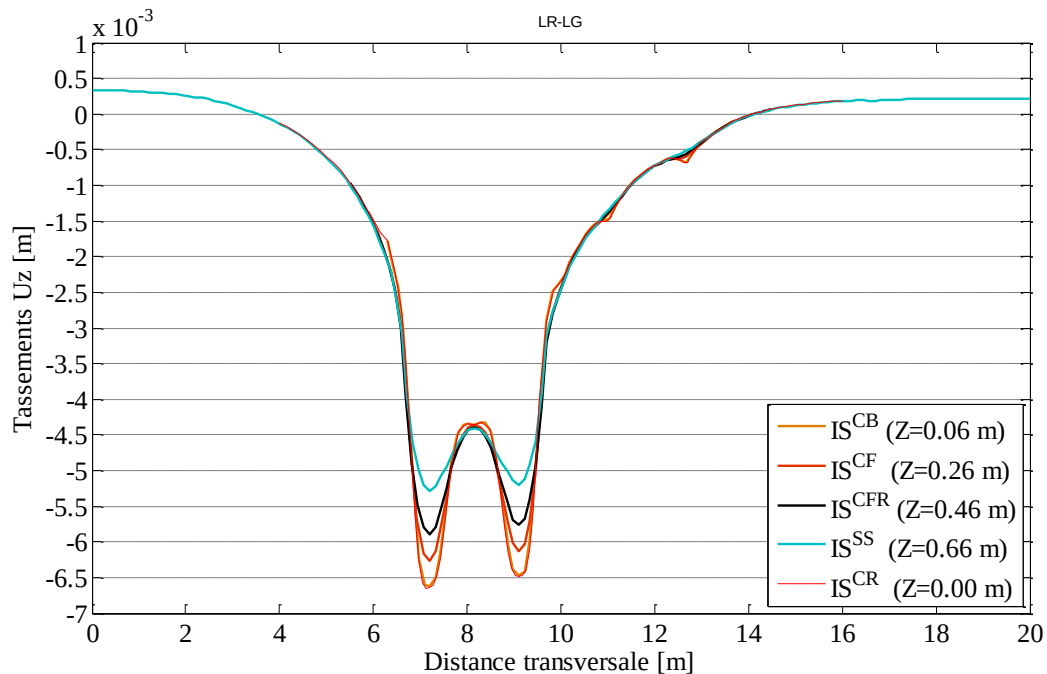


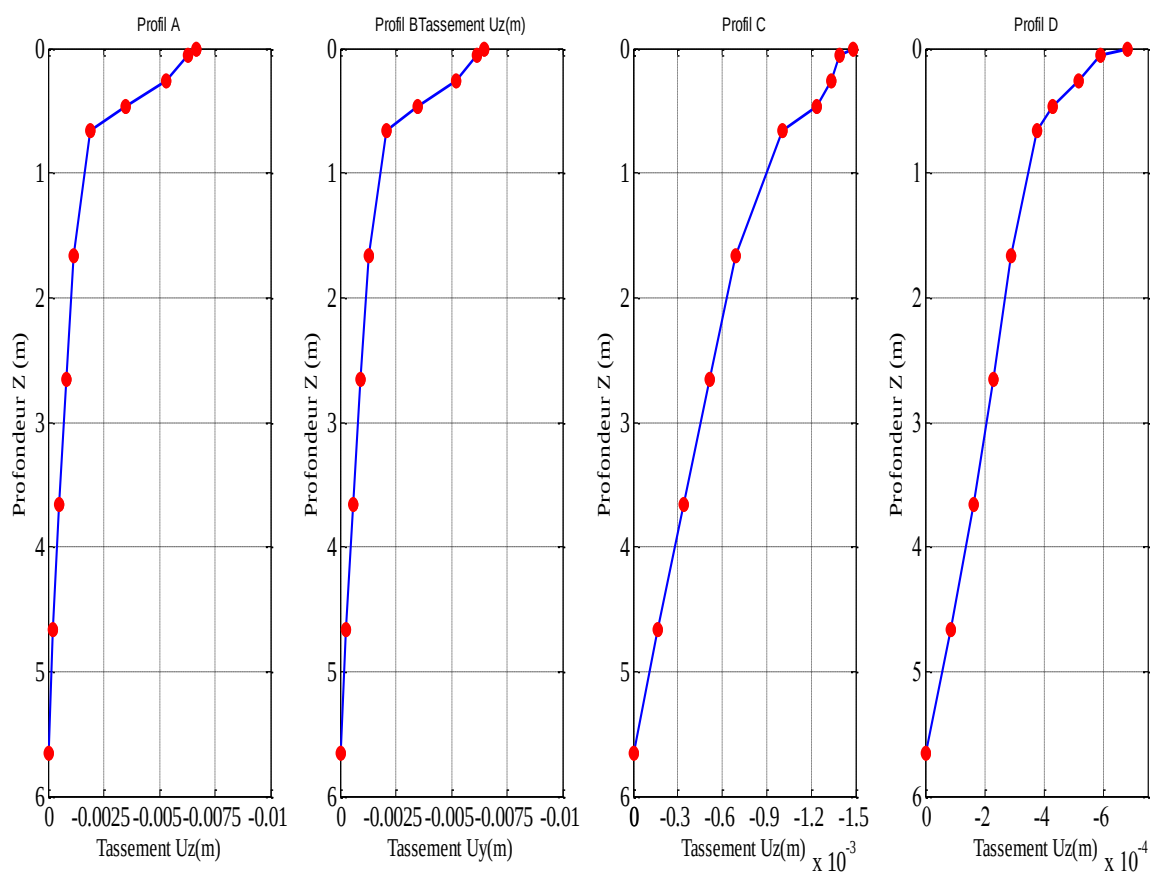
Figure 4.24.Évolution des tassements sur les interfaces supérieures
(cas05 : LR-LG).

Tableau 4.10. Tassements aux niveaux des interfaces des couches
(cas05 : LR-LG).

Interfaces	IS ^{CR} (Z=0.00m)	IS ^{CB} (Z=0.06m)	IS ^{CF} (Z=0.26m)	IS ^{CFR} (Z=0.46m)	IS ^{SS} (Z=0.66m)
Tassements sous R[A]	6.64 10 ⁻³	6.62 10 ⁻³	6.27 10 ⁻³	5.89 10 ⁻³	5.28 10 ⁻³
Tassements sous R[B]	6.48 10 ⁻³	6.48 10 ⁻³	6.12 10 ⁻³	5.75 10 ⁻³	5.20 10 ⁻³
Tassement sous R[C]	1.48 10 ⁻³	1.46 10 ⁻³	1.39 10 ⁻³	1.36 10 ⁻³	1.33 10 ⁻³
Tassement sous R[D]	0.68 10 ⁻³	0.67 10 ⁻³	0.59 10 ⁻³	0.56 10 ⁻³	0.51 10 ⁻³

Tableau 4.11. Tassements du sol support (Cas05 : LR-LG).

Profondeurs (m)	Z=1.66m	Z=2.66m	Z=3.66m	Z=4.66m	Z=5.66m
profil A (m)	$3.50 \cdot 10^{-3}$	$1.90 \cdot 10^{-3}$	$1.16 \cdot 10^{-3}$	$0.51 \cdot 10^{-3}$	0
profil B (m)	$3.49 \cdot 10^{-3}$	$2.06 \cdot 10^{-3}$	$1.27 \cdot 10^{-3}$	$0.56 \cdot 10^{-3}$	0
profil C (m)	$1.23 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$0.69 \cdot 10^{-3}$	$0.34 \cdot 10^{-3}$	0
profil D (m)	$0.43 \cdot 10^{-3}$	$0.38 \cdot 10^{-3}$	$0.29 \cdot 10^{-3}$	$0.16 \cdot 10^{-3}$	0

**Figure 4.25.**Évolution des tassements selon les profils A, B, C et D
(Cas 05 : LR-LG).

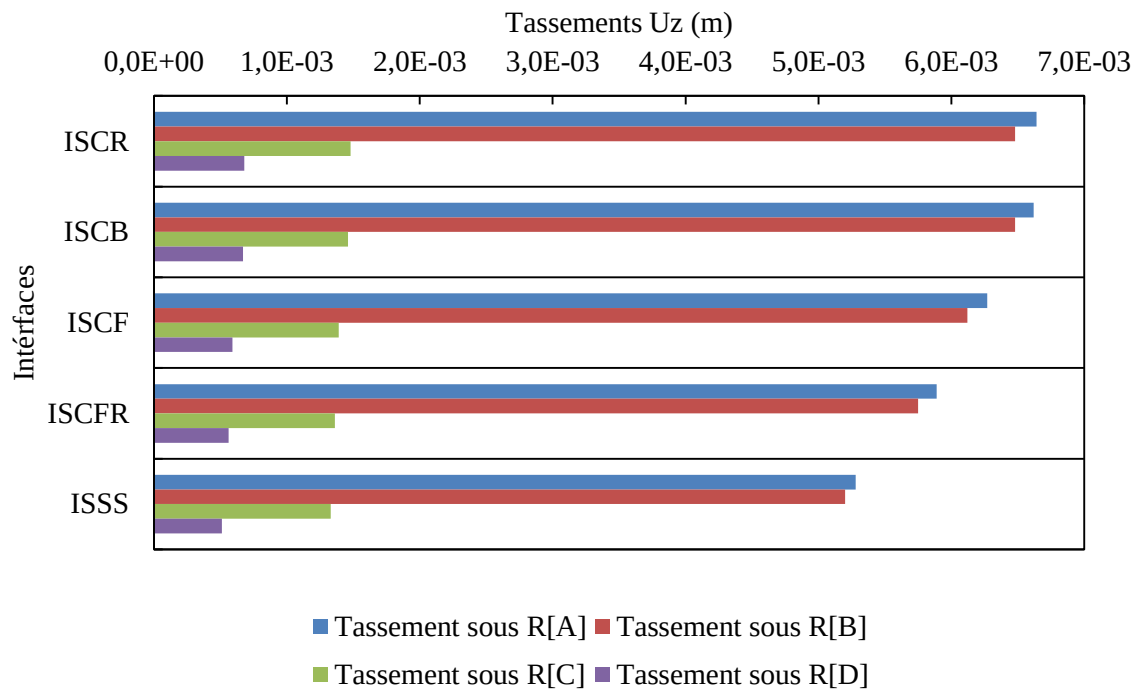


Figure 4.26. Tassements finaux sous R[A], R[B], R[C] et R[D]-(Cas 05 : LR-LG)

Le corps de chaussée après le passage du véhicule lourd et léger, subit à des pressions de 660KN/m² et 220KN/m² respectivement, chaque pneu engendre des tassements du corps de chaussée.

Les tassements obtenus sous les roues du poids lourd sont largement supérieurs aux tassements du corps de chaussée sur le côté du poids léger (Figure 4.26), avec un tassement maximal de $U_z \text{ max} = 6.64 \times 10^{-3} \text{ m}$ du côté du poids lourd et de $U_z \text{ max} = 1.48 \times 10^{-3} \text{ m}$ du côté du poids léger (Figure 4.26).

Les tassements obtenus au profil [A] sont plus grand par rapport aux autres profils ($U_z \text{ max} = 3.50 \times 10^{-3} \text{ m}$). (Tableau 4.11)

4.5. Conclusion

Après avoir modélisé le corps de chaussée sous l'effet du passage du trafic avec PLAXIS 2D. On constate que :

Les tassements obtenus après le passage du véhicule lourd, sont largement supérieurs aux tassements obtenus après le passage du véhicule léger ($Uz_{\max}[\text{lourd}] = 6.69 \times 10^{-3} \text{m} < Uz_{\max}[\text{léger}] = 6.84 \times 10^{-4} \text{m}$).

Les tassements des couches du corps de chaussée, sont admissibles dans les deux cas (véhicule lourd et véhicule léger).

La charge du trafic est l'un des paramètres importants influençant sur la déformation du corps de chaussée.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

La réalisation d'une route n'est pas seulement l'obtention d'un bon tracé, mais aussi elle devra résister à l'agression extérieure (passage du trafic et les agressions naturelles).

Le passage du trafic (léger et lourd) peut créer des déformations qui induisent la dégradation de la chaussée. Cette dégradation peut être due aux tassements de la couche de roulement, ou bien aux déformations des couches inférieures non traitées.

Le véhicule de poids léger n'a aucune influence sur les tassements du corps de chaussée, par contre le poids lourd provoque des déformations plus importantes.

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 :

- Les tassements ne dépassent pas $5.95 \times 10^{-4} \text{m}$ au passage du trafic poids léger ($P=220 \text{KN/m}^2$) sur une seule voie, et $6.84 \times 10^{-4} \text{m}$ au passage du trafic poids léger sur les deux voies.
- Les tassements obtenus après le passage du trafic poids lourd ($P=660 \text{KN/m}^2$) sur une seule voie ne dépassent pas $6.69 \times 10^{-3} \text{m}$, et ne dépassent pas aussi $6.64 \times 10^{-3} \text{m}$ lors du passage du poids lourd sur les deux voies.
- Les tassements de la structure de chaussée après le passage du trafic lourd ($P=660 \text{KN/m}^2$) et léger ($P=220 \text{KN/m}^2$) sur les deux voies vont atteindre $6.64 \times 10^{-3} \text{m}$

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

Références Bibliographiques

- A. CARTER, D. P., 2002. *La mesure du module complexe des enrobés bitumineux*. Montréal
- Abderrahim, 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.
- Badra, A., 2008. *Comportement mécanique des enrobés bitumineux renforcés par la fibre de verre*, Batna: département de mécanique, faculté des sciences et de l'ingénieur, université de batna .
- Brinkgreve, 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
- Coquand, 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.
- Emmanuel Mengue, 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, p. 3.
- Fauré, M., 1998. *Route. cours de l'ENTPE, Tome 2*. s.l.:Aléas.
- Houda, H., 2010. *Etude numérique d'un mur de soutènement en sol stabilisé et renforcé avec fibres et géogrilles*, Annaba: Université Badji Mokhtar.
- 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.
- Joseph ABDO, R. D. C. D. P. G. E. H., 2009. *voiries et aménagements urbains en béton (conception et dimensionnement)*.
- Koiter, w., 1960. *General Theorems for Elastic-Plastic Solids. In: Progress in Solid Mechanics*. I.N. Sneddon, R. Hill, Vol.1 éd. Amsterdam
- LAMRI, I., 2008. *Etude du comportement d'un sol cohérent sous chargement monotonique et cyclique*, Skikda: Université 20 Aout 1955 .
- LCPC SETRA, 2000. *Réalisation des remblais et des couches de forme ;Guide technique fascicule 1et 2..* deuxième édition éd. Paris
- LCPC, SETRA, 1998. *Catalogue des structures types de chaussée neuves*. Paris
- LCPC, 1998. *Méthodes d'essai N°52 Complément à la méthode d'essai N°38-2 (Catalogue des dégradations de surface des chaussées)*. paris: LCPC.

LCPC, S., 1994. *conception et dimensionnement des structures de chaussée (guide technique)*. Paris

MEZIANI, F., 2008.thèse magister. *Amélioration des caractéristiques mécaniques d'une couche de chaussée souple par des matériaux composites*, Tizi Ouzou: UMMTO.

Mohammed, A. R., 2011. *Étude par éléments finis du comportement du sol environnant un pieu sous sollicitation horizontale*, Annaba: université Badji mokhtar.

Smith, I. G. D., 1982. *programming the finite element method*. second edition éd. U.K: