

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique*

جامعة البليدة 1  
**UNIVERSITE DE BLIDA 1**



كلية التكنولوجيا  
**Faculté de Technologie**  
قسم الهندسة المدنية  
**Département de Génie Civil**

**MEMOIRE DE MASTER**

Spécialité : Géotechnique

**Emplacement optimal de la géogridde pour le renforcement  
d'une chaussée souple contre la remontée des fissures**

**Etudié par :**

**AMALOU Yacine  
HADJALA Hichem**

**Encadré par :**

**Dr M. ABDESSEMED**

## *Dédicaces*

*A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.*

*A toute ma famille pour son soutien tout au long de mon parcours universitaire.*

***AMALOU YACINE***

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à ma mère et à mon père.*

*A mes chers frères pour leur soutien et leur  
encouragement.*

*A toute ma famille pour son soutien tout au long de  
mon parcours universitaire.*

*HADJALA HICHEM*

## *Remerciements*

*Nous remercions en premier et avant tous le dieu tout  
puissant pour nous avoir  
donné le courage et la patience d'accomplir ce travail.  
Un hommage appuyé revient aussi à nos parents pour  
leurs aides et sacrifices  
pour qu'on termine nos études.*

*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et  
notre profonde gratitude à notre promoteur le **Dr.**  
**Mouloud ABDESSEMED** de nous avoir fait confiance, et  
nous avoir estimés capables de traiter ce sujet, et pour sa  
patience et ses conseils.*

*Nous remercions les membres de jury qui nous font  
l'honneur d'avoir acceptés  
de lire et examinés ce modeste travail.*

## ملخص

تتأثر الأرصفة المرنة عموماً بالشقوق في طبقتها السطحية بسبب الأحمال المتكررة والتأثير المناخي خاصة في المناطق ذات المناخ الحار، يركز هذا العمل على تحديد الموضع الأمثل لـ بقعة الجيوغريل في جسم الرصيف المرن لهذا، بدأنا بدراسة الهياكل المختلفة لهذه الأرصفة من أجل فهم كيفية عملها، ومعرفة المواد التي تشارك في تحقيقها. ثم بدأنا الجزء التالي الذي يتم فيه سرد أنواع مختلفة من التدهور وأسبابه. وقد جعل ذلك من الممكن معرفة ما هي الوسائل اللازمة للصيانة والوقاية الممكنة وفي النهاية، استخدم برنامج ( Alizé/Lcpc ) في نمذجة الهيكل المقترح للتحقق من الضغوط والتشوهات فيما يتعلق بالأحمال التي تمارس

**الكلمات المفتاحية:** الرصيف ، التعزيز ، الجيوغريد ، الاجهادات ، التشوهات ، Alizé/Lcpc .

## Résumé

Les chaussées souples sont généralement affectées par des fissures dans leur couche de surface, dus aux charges répétées et à l'influence du climat surtout dans les zones à climat chaud.

Ce travail s'intéresse à la détermination de la position optimale de la nappe géogridle qu'on va utiliser comme une solution de renforcement contre la remonter des fissures.

Pour ce faire, nous avons commencé d'abord par l'étude des différentes structures de ces chaussées afin de comprendre leur fonctionnement, et connaître les matériaux qui interviennent dans leur réalisation. Ensuite on a entamé la partie suivante dans laquelle sont énumérés les différents types des dégradations et leurs causes. Ce qui a permis de savoir quels moyens faut-il pour l'entretien et une éventuelle prévention.

En fin on a utilisé le logiciel Alizé/Lcpc pour modéliser la structure proposée dans le but de vérifier les contraintes et les déformations vis-à-vis des charges exercées.

**Mots clés :** Chaussée, renforcement, géogridle, Alizé/Lcpc, contraintes, déformations.

## Abstract

Flexible pavements are generally affected by cracks in their surface layer, due to repeated loads and climate influence especially in hot climate areas.

This work focuses on determining the optimal position of the geogrid slick in a flexible pavement body.

With this intention, we initially started with the study of the various structures of these roadways in order to understand their operation, and to know the materials which intervene in their realization and dimensioning. Then the following part was started in which the various types of degradations and their causes are enumerated. What made it possible to know which means are necessary for maintenance and a possible prevention.

Finally the software Alize/Lcpc has been used to model the structure suggested with an aim of checking the stresses and the deformations with respect to the exerted loads

**Key words:** Pavement, reinforcement, geogrid, Alize/Lcpc, stresses, strains.

# TABLE DE MATIERES

|   |      |
|---|------|
| Dédicaces .....   | I    |
| Remerciements.....  | III  |
| ملخص.....   | IV   |
| Résumé.....   | IV   |
| Abstract.....   | IV   |
| TABLE DE MATIERES .....   | V    |
| LISTES DES FIGURES .....  | IX   |
| LISTE DES TABLEAUX .....  | XII  |
| LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS.....   | XIII |
| Introduction générale .....   | 1    |
| <b>CHAPITRE I : Synthèse bibliographique</b>  |      |
| I.1. Introduction.....  | 3    |
| I.2. Les infrastructures linéaires .....  | 3    |
| I.3. Les chaussées souples et rigides et leurs dégradations .....                     | 4    |
| I.3.1. Structure de la chaussée .....   | 4    |
| I.3.1.1. La plate-forme support de chaussée .....                                     | 4    |
| I.3.1.2. La couche d'assise .....   | 4    |
| I.3.1.3. La couche de surface .....   | 4    |
| I.3.2. Différents types de structures de chaussée.....                                | 5    |
| I.3.2.1. Structures souples .....   | 5    |
| I.3.2.2. Structures semi-rigides .....  | 6    |
| I.3.2.3. Structures rigides .....   | 7    |
| I.3.3. Dégradations des chaussées .....   | 8    |
| I.3.3.1. Définition de la dégradation .....   | 8    |
| I.3.3.2 Les différentes familles de dégradation des chaussées souples et rigides..... | 8    |
| I.3.3.2.1. Les chaussées souples (flexibles) .....                                    | 8    |
| I.3.3.2.2. Les chaussées rigides.....   | 17   |
| I.4. Remontée des fissures dans la couche de roulement .....                          | 24   |
| I.4.1. Charges provoquant les mouvements de la pointe de la fissure.....              | 24   |
| I.4.2. Nature des mouvements des lèvres de la fissure .....                           | 24   |
| I.5. Méthodes de maintenance et réduction de la propagation des fissures .....        | 26   |
| I.6. Conclusion .....   | 30   |

## **CHAPITRE II : Méthodes de dimensionnement des chaussées souples**

|   |    |
|---|----|
| II.1. Introduction .....  | 32 |
| II.2. Les facteurs déterminants pour les études de dimensionnement de chaussée.....                 | 32 |
| II.3. Méthodes de dimensionnement des chaussées .....   | 33 |
| II.3.1. Les méthodes empiriques.....  | 33 |
| II.3.1.1. La méthode L.C.P.C (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées).....                      | 33 |
| II.3.1.2. Méthode américaine de l'AASHTO : (Américain Association of state highway officiels) ..... | 33 |
| II.3.1.3. Méthode de CBR (California Bearing Ration).....   | 34 |
| II.3.1.4. Méthode du catalogue de dimensionnement des chaussées neuves (CTTP) .....                 | 35 |
| II.3.2. Les méthodes théoriques ou rationnelle.....   | 39 |
| II.3.2.1. Modèle de Boussinesq (1885).....  | 39 |
| II.3.2.2. Modèle bicouche de Westergaard (1926) .....   | 39 |
| II.3.2.3. Modèle bicouche de Hogg (1938).....   | 40 |
| II.3.2.4. Modèle de Burmister (1943) .....  | 41 |
| II.4. Méthodes modernes et numériques .....   | 42 |
| II.4.1. Méthode des éléments finis.....   | 42 |
| II.4.2. Principes de la méthode des éléments finis .....  | 42 |
| II.5. Exemple de Calcul et dimensionnement des chaussées .....                                      | 43 |
| II.5.1. Exemple de dimensionnement par la Méthode du catalogue .....                                | 43 |
| II.5.2. Exemple de dimensionnement par la Méthode CBR.....  | 44 |
| II.6 Conclusion .....   | 45 |

## **CHAPITRE III : Les géo-synthétique et leurs applications récentes**

|   |    |
|---|----|
| III.1. Introduction .....                         | 47 |
| III.2. Définition de la géo-synthétique .....     | 47 |
| III.3. Principaux types des géo-synthétiques..... | 47 |
| III.3.1. Les Géotextiles .....                    | 47 |
| III.3.2. Géo-grille.....                          | 49 |
| III.3.3. Géo-filet.....                           | 50 |
| III.3.4. Géo-composite.....                       | 51 |
| III.3.5. Géo-membranes.....                       | 52 |
| III.3.5. Géo-synthétique alvéolaire .....         | 52 |
| III.4. Caractéristiques des géo-synthétiques..... | 54 |

|   |    |
|---|----|
| III.5. Les principales fonctions des géo-synthétiques .....                     | 55 |
| III.6. Application des géo-synthétiques en Algérie.....                         | 56 |
| III.7. Renforcement des chaussées par géo-grille .....                          | 56 |
| III.7.1. Principe de renforcement.....  | 56 |
| III.7.2. Mécanismes de renforcement .....                                       | 57 |
| III.8. Conclusion.....  | 60 |
| <b>CHAPITRE IV : Méthodes d'analyse et calcul du renforcement de chaussées</b>  |    |
| IV.1. Introduction.....   | 62 |
| IV.2. Méthode des éléments finis.....   | 62 |
| IV.2.1. Définition .....  | 62 |
| IV.2.2. Historique de la méthode des éléments finis (MEF) .....                 | 62 |
| IV.2.3. Principes de la méthode des éléments finis .....                        | 63 |
| IV.3. Présentation générale sur le logiciel Alizé-LCPC .....                    | 64 |
| IV.3.1. Documents de référence de logiciel Alizé-LCPC v1.3 .....                | 65 |
| IV.3.2. Architecture générale d'Alizé-Lcpc v1.3 .....                           | 65 |
| IV.3.3. Configuration informatique requise, protection contre le piratage ..... | 65 |
| IV.4. Lancement du programme Alizé-Lcpc v1.03 .....                             | 66 |
| IV.4.1. Démarrage de l'application .....  | 66 |
| IV.4.2. Configuration d'Alizé-Lcpc v1.03 .....                                  | 66 |
| IV.5. Préparation des données : la structure de chaussée.....                   | 67 |
| IV.5.1. Principe de modélisation de la structure de chaussée .....              | 67 |
| IV.5.2. Créer et modifier les données « Structures ».....                       | 67 |
| IV.5.3. Enregistrement et lecture des fichiers de données.....                  | 69 |
| IV.6. Préparation des données : Le chargement du Modèle.....                    | 70 |
| IV.6.1. Définition de la charge de référence .....                              | 70 |
| IV.6.2. Définition des charges spéciales .....                                  | 71 |
| IV.6.2.1. Caractéristiques du chargement spécial.....                           | 71 |
| IV.6.2.2. Profils verticaux de calculs.....                                     | 71 |
| IV.7. Conclusion .....  | 73 |
| <b>CHAPITRE V : Description du cas d'étude</b>                                  |    |
| V.1. Introduction .....   | 75 |
| V.2. Description du cas d'étude .....   | 75 |
| V.2.1. Présentation de région d'Illizi.....                                     | 75 |
| V.2.2. Présentation de cas d'étude.....   | 75 |



|   |    |
|---|----|
| V.3. Caractéristiques géométriques.....   | 76 |
| V.4. Caractéristiques mécaniques des différents matériaux et CBR du sol support ..... | 77 |
| V.5. Solutions de renforcement.....   | 77 |
| V.6. Les caractéristiques de géogridde .....  | 77 |
| <b>CHAPITRE VI : Résultats et discussion</b>  |    |
| VI.1. Introduction.....   | 79 |
| VI.2. Résultats numériques .....  | 79 |
| VI.2.1. Cas de renforcement sans geogridde (Piste 09/27) .....                        | 79 |
| VI.2.2. Cas de renforcement avec geogridde (Piste 09/27).....                         | 80 |
| VI.3. Analyse des résultats.....  | 89 |
| VI.4. Conclusion .....  | 90 |
| Conclusion générale.....  | 91 |
| Références bibliographiques   |    |

## LISTES DES FIGURES

|  |    |
|--|----|
| Figure I. 1: Les routes et autoroutes. ....  | 3  |
| Figure I. 2: Les différentes couches de chaussée. ....                                       | 5  |
| Figure I. 3: Les différentes couches de la chaussée souple. ....                             | 5  |
| Figure I. 4: Les différentes couches de la chaussée semi-rigide. ....                        | 6  |
| Figure I. 5: Les différentes couches de la chaussée rigide. ....                             | 7  |
| Figure I. 6: RN 22 allons de la gare routière vers l'entrée de Tlemcen. ....                 | 9  |
| Figure I. 7: Route de montagne allons vers le plateau de Lalla Setti. ....                   | 10 |
| Figure I. 8: Route à côté de jardin public hartoun. ....                                     | 10 |
| Figure I. 9: Route de montagne à côté de la maison familiale petite perdreau FOOSC. ....     | 11 |
| Figure I. 10: RN 6 qui relie le nord-ouest au sud-ouest de l'Algérie. ....                   | 11 |
| Figure I. 11: Route de montagne vers le plateau de Lalla Setti. ....                         | 12 |
| Figure I. 12: L'autoroute est-ouest de Lakhdaria vers Bouzegza. ....                         | 12 |
| Figure I. 13: Route de montagne vers le plateau de Lalla Setti ....                          | 13 |
| Figure I. 14: Route avec désordre du profil. ....  | 13 |
| Figure I. 15: Route vers Djanet. ....  | 14 |
| Figure I. 16: Allons de la gare routière vers l'entrée de Tlemcen. ....                      | 14 |
| Figure I. 17: Route en Algérie. ....   | 15 |
| Figure I. 18: Route en Algérie. ....   | 15 |
| Figure I. 19: Route située à la wilaya de Blida. ....  | 16 |
| Figure I. 20: RN 7 allons de rond-point de mansourah vers les vestiges de la mansourah. .... | 17 |
| Figure I. 21: Route située à birouana. ....  | 17 |
| Figure I. 22: fissures au niveau de la chaussée ....   | 18 |
| Figure I. 23: cassure d'angle. ....  | 19 |
| Figure I. 24: Fracture. ....   | 19 |
| Figure I. 25: Pompage identifié par les dépôts de fines. ....                                | 20 |
| Figure I. 26: Décalage. ....   | 20 |
| Figure I. 27: Epaufrure. ....  | 21 |
| Figure I. 28: Faïençage. ....  | 21 |
| Figure I. 29: Ecaillage. ....  | 22 |
| Figure I. 30: Défaut de joint. ....  | 22 |
| Figure I. 31: Réparation ponctuelle. ....  | 23 |
| Figure I. 32: Dépôt de gomme. ....   | 23 |

|  |    |
|--|----|
| Figure I. 33: Mouvements possibles des pointes de la fissure.....  | 25 |
| Figure I. 34: Scellement de fissures.....  | 27 |
| Figure I. 35: Le planage et l'épandage. ....   | 27 |
| Figure I. 36: Traitement de surface (enduit superficiel). ....   | 28 |
| Figure I. 37: Enrobé coulé à froid (ECF).....  | 28 |
| Figure I. 38: Dé-Cohésionnement/stabilisation. ....  | 29 |
| Figure I. 39: Application des nappes géo-synthétiques. ....  | 30 |
|  |    |
| Figure II. 1: Diffusion des contraintes selon Boussinesq. ....   | 39 |
| Figure II. 2: Diffusion des contraintes selon Westergaard. ....  | 40 |
| Figure II. 3: Diffusion des contraintes selon Hogg. ....   | 40 |
| Figure II. 4: Diffusion des contraintes selon Busmister. ....  | 41 |
|  |    |
| Figure III. 1: Géotextile non tissé . ....   | 48 |
| Figure III. 2: Géotextile tissé . ....   | 48 |
| Figure III. 3: Géotextile tricoté . ....   | 49 |
| Figure III. 4: à gauche la forme du géo-tuyaux, à droite la mise en œuvre de géo-tuyaux .                | 49 |
| Figure III. 5: à gauche la structure de géo-grille, à droite la mise en place du géo-grille. ..          | 50 |
| Figure III. 6: à gauche un modèle de géo-filet, à droite un géo-filet dans un merlon. ....               | 51 |
| Figure III. 7: La structure d'un géo-composite.....  | 51 |
| Figure III. 8: Géo-membrane à gauche leur forme, et à droite leur mise en place .....                    | 52 |
| Figure III. 9: à gauche la forme d'un géo-synthétique alvéolaire, à droite placement d'une<br>nappe..... | 52 |
| Figure III. 10: Géo-synthétique bentonitique . ....  | 53 |
| Figure III. 11: Renforcement par géotextille. ....   | 57 |
| Figure III. 12: Mécanisme de Confinement (autoblocage) latéral de la couche de base. ....                | 57 |
| Figure III. 13: Surface de Rupture Modifiée et Augmentation de la capacité portante.....                 | 59 |
| Figure III. 14: Comportement en membrane. ....   | 60 |
|  |    |
| Figure IV. 1: Barre de menu principal de Alizé-Lcpc. ....  | 66 |
| Figure IV. 2: Commande pour la création d'une nouvelle structure de calcul. ....                         | 68 |
| Figure IV. 3: Exemple de structure de chaussée.....  | 69 |
| Figure IV. 4: Définition des variantes de calcul, exemple.....   | 70 |
| Figure IV. 5: Configuration d'Alizé, définition de la charge de référence. ....                          | 70 |

|  |    |
|--|----|
| Figure IV. 6: Commande pour la création d'une nouvelle charge spéciale.....  | 71 |
| Figure IV. 7: Définition d'une charge spéciale, exemple d'un convoi 16 roues, définition des charges et des profils verticaux de calculs ..... | 72 |
| Figure IV. 8: Visualisation d'une charge spéciale, exemple d'un convoi 16 roues.....   | 72 |
| <br>   |    |
| Figure V. 1: La route nationale (RN-53). .....   | 76 |
| <br>   |    |
| Figure VI. 1: Définition la structure de chaussée. ....  | 79 |
| Figure VI. 2: Les résultats des contraintes et déformations.....   | 80 |
| Figure VI. 3: Définition la structure de chaussée pour le cas A. ....  | 80 |
| Figure VI. 4: Les résultats des contraintes et déformations pour le cas A. ....  | 81 |
| Figure VI. 5: Définition la structure de chaussée pour le cas b. ....  | 81 |
| Figure VI. 6: Les résultats des contraintes et déformations pour le cas b. ....  | 82 |
| Figure VI. 7: Définition la structure de chaussée pour le cas c. ....  | 82 |
| Figure VI. 8: Les résultats des contraintes et déformations pour le cas c. ....  | 83 |
| Figure VI. 9: Définition la structure de chaussée pour le cas d. ....  | 83 |
| Figure VI. 10: Les résultats des contraintes et déformations pour le cas d. ....   | 84 |
| Figure VI. 11: Définition la structure de chaussée pour le cas e. ....   | 84 |
| Figure VI. 12: Les résultats des contraintes et déformations pour le cas e. ....   | 85 |
| Figure VI. 13: Définition la structure de chaussée pour le cas f.....  | 85 |
| Figure VI. 14: Les résultats des contraintes et déformations pour le cas f.....  | 86 |
| Figure VI. 15: Définition la structure de chaussée pour le cas g. ....   | 86 |
| Figure VI. 16: Les résultats des contraintes et déformations pour le cas g. ....   | 87 |
| Figure VI. 17: Définition la structure de chaussée pour le cas h. ....   | 87 |
| Figure VI. 18: Les résultats des contraintes et déformations pour le cas h. ....   | 88 |
| Figure VI. 19: Définition la structure de chaussée pour le cas i.....  | 88 |
| Figure VI. 20: Les résultats des contraintes et déformations pour le cas i. ....   | 89 |
| Figure VI. 21: Histogramme explique la réduction d'Eps z. ....   | 90 |
| Figure VI. 22: Histogramme des déformations verticales. ....   | 90 |

## LISTE DES TABLEAUX

|   |    |
|---|----|
| Tableau I. 1: Types de structure de chaussée selon LCPC .....   | 8  |
| Tableau II. 1: Coefficient d'équivalences et des épaisseurs des différents matériaux utilisés en structure de chaussée..... | 35 |
| Tableau II. 2: Classification des réseaux principaux .....  | 35 |
| Tableau II. 3: Duré de vie des différents matériaux.....  | 36 |
| Tableau II. 4: Zone climatique de pluviométrie .....  | 37 |
| Tableau II. 5: Choix des températures équivalentes .....  | 37 |
| Tableau II. 6: Classes de trafic TPLi adoptées .....  | 38 |
| Tableau II. 7: Classes de portance de sols Si .....   | 38 |
| Tableau II. 8: Avantages et Inconvénients des méthodes de dimensionnement.....  | 41 |
| Tableau II. 9: Organigramme d'étapes caractéristiques d'un programme d'éléments finis ..                                    | 43 |
| Tableau II. 10: Amélioration de la portance du sol support .....  | 44 |
| Tableau III. 1: Caractéristiques de quelques géo-synthétiques.....  | 55 |
| Tableau IV. 1: Organigramme d'étapes caractéristiques d'un programme d'éléments finis.                                      | 64 |
| Tableau V. 1: Modules d'élasticité et coefficients de poisson des différentes couches .....                                 | 77 |
| Tableau VI. 1 : Comparatif des déformations.....  | 89 |

## LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

|        |  |
|--------|--|
| PF     | plate-forme  |
| PST    | Partie Supérieure des terrassements                                      |
| GNT    | granulats non traités  |
| MTLH   | matériaux traités aux liants hydrauliques                                |
| ES     | enduit superficiel   |
| BAC    | Béton Armé Continu   |
| GRH    | graves recomposées humidifiées   |
| GB     | grave bitume   |
| BBTM   | Bétons Bitumineux Très Minces  |
| SETRA  | Le Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements |
| PCC    | Portland Cément Concrete   |
| FDR    | Full-Depth Repair  |
| CPCD   | Concrete Pavement Contraction Design                                     |
| CRCP   | Continuously Reinforced Concrete Pavements                               |
| HDR    | Half-Depth Repair  |
| GPR    | ground penetrating radar   |
| PSPA   | Portable Seismic Pavement Analyzer                                       |
| FWD    | Falling weigh tDeflectometer   |
| LCPC   | Laboratoire Central des Ponts et Chaussées                               |
| STAC   | Service technique de l'aviation civile                                   |
| OACI   | Organisation d'illuviation Civil Internationale                          |
| PEHD   | polyéthylène de haute densité  |
| GVB    | géo-composite bentonitique   |
| GSB    | géo-synthétiques bentonitiques   |
| ISO    | International Standards Organisation                                     |
| EN     | Europe Normalisation   |
| GCL    | Geosynthetic Clay Liner  |
| AASHTO | Guide for design of pavement structures                                  |
| HMA    | Hot Mix Asphalt  |
| MEF    | méthode des éléments finis   |
| FEA    | Finite Element Analysis  |
| [M]    | matrices de masse de la structure  |
| [K]    | matrices de rigidité de la structure                                     |

## Introduction générale

L'Algérie est dotée d'un patrimoine très important d'infrastructures linéaires, tel que les chaussées routières et aéroportuaires, qui sont les moyens qui facilitent la circulation des véhicules (chaussée routière), ou bien des aéronefs (chaussée aéroportuaire). Au fil du temps ces chaussées sont exposées à des dégradations dues à plusieurs effets tels-que le climat, le chargement des poids lourds ...etc. C'est pour cela, on doit entretenir ces infrastructures par l'application des techniques modernes avec l'utilisation de produits innovantes tel que les géo-synthétiques qui sont constituées de : polymère-synthétique tel que, le polyéthylène, le polyester, le polyamide ou polypropylène ou de polymère naturel. Ces produits améliorent la durée de service de la chaussée, garantir le service des usagers (véhicules, piétons, engins, aéronefs, ..... ) et assurer une durabilité à moyen et longs termes. Les géosynthétiques les plus utilisé dans les chaussées souples routières sont les géogrilles.

En effet, dans les dernières années la position de géogrille dans le corps d'une chaussée souple pose problème.

Dans ce mémoire, nous proposons une étude bibliographique d'application des géogrille et optimiser sa position dans le corps de chaussée souple avec une application numérique par la méthode des éléments finis avec le logiciel Alize/Lcpc.

Une comparaison sera effectuée entre les différents résultats trouvés dans chaque position qui a été proposée pour déduire la position optimale de la nappe géogrille.

Le travail est divisé en deux parties :

**La première partie** : réservée à la recherche bibliographique elle comporte quatre chapitres :

- **Le premier chapitre** : Synthèse bibliographique sur les chaussées souples et leurs dégradations.
- **Le deuxième chapitre** : c'est pour les Méthodes de dimensionnement des chaussées souples.
- **Le troisième chapitre** : contient des notions sur les matériaux géosynthétiques et leurs applications récentes, parmi ces matériaux les géogrilles.
- **Le quatrième chapitre** : c'est pour les Méthodes d'analyse et calcul du renforcement de chaussées.

**La deuxième partie** : réservée à la description du cas d'étude et l'analyse numérique, elle comporte deux chapitres.

- **Le cinquième chapitre** : descriptions du cas d'étude.
- **Le sixième chapitre** : résultats et discussions.

# **CHAPITRE I**

## **Synthèse bibliographique**



### **I.1. Introduction**

Les chaussées sont les moyens qui assurent la circulation et le déplacement, qui doivent garantir le service des usagers (véhicules, engins, piétons, aéronefs...).

C'est une structure multicouche mise en œuvre sur un ensemble appelé plateforme support de chaussée constituée du sol terrassé surmonté généralement d'une couche de forme.

Elle a pour objet de :

- répartir les charges mécaniques sur le sol support.
- assurer les déplacements des usagers et le transport des marchandises dans des conditions de sécurité et de confort adapté au type d'itinéraire

### **I.2. Les infrastructures linéaires**

On appelle infrastructures linéaires, tout ouvrage caractérisé par deux dimensions négligeables devant la 3ème dimension. Parmi les infrastructures, on peut citer :

- Les routes et autoroutes ;
- Les aéroports ;
- Les chemins de fer ;
- Toute piste destinée pour la circulation terrestre.



**Figure I. 1: Les routes et autoroutes.**

### **I.3. Les chaussées souples et rigides et leurs dégradations**

#### **I.3.1. Structure de la chaussée**

##### **I.3.1.1. La plate-forme support de chaussée**

La plate-forme support de chaussée comme son nom l'indique, sert de support au corps de chaussée. La plate-forme support de la chaussée (PFSC) doit répondre aux objectifs suivants :

##### **a- La Partie Supérieure des Terrassements (P.S.T) :**

Représentée par les sols en place ou les matériaux rapportés (remblai). Elle a une épaisseur d'environ 1,00 m. La surface de la partie supérieure de terrassement (P.S.T). Est appelée l'arase de terrassement (AR).

##### **b- Une couche de forme :**

La couche de forme permet mécaniquement d'augmenter la capacité portante de la plateforme, protéger la partie supérieure de terrassement vis à vis des agents climatiques, faciliter la circulation des engins approvisionnant la couche de fondation et assurer les exigences de nivellement lors de la réalisation du corps de chaussée (épaisseur des couches de fondation).

##### **I.3.1.2. La couche d'assise**

La couche d'assise est généralement constituée d'une couche de fondation surmontée d'une couche de base. Elles apportent à la structure de chaussée l'essentiel de sa rigidité et repartie (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.

##### **I.3.1.3. La couche de surface**

La couche de surface est formée d'une couche de roulement surmontant éventuellement une couche de liaison intermédiaire entre la couche de roulement et les couches d'assise. La couche de roulement, qui subit directement les actions agressives dues au trafic et au

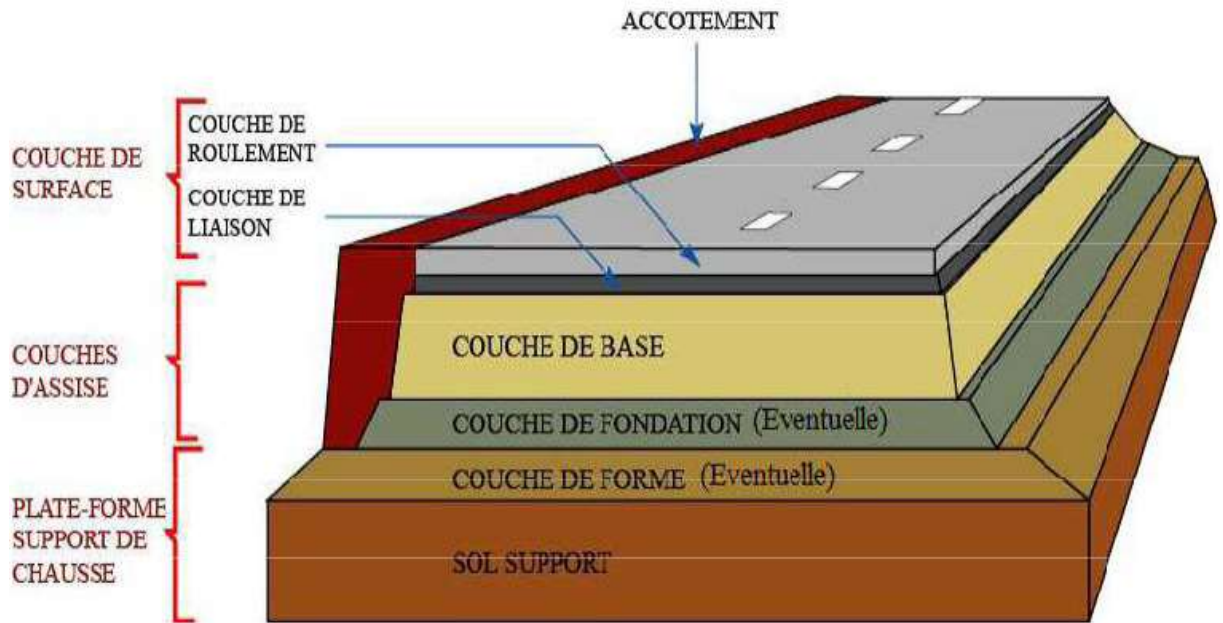


Figure I. 2: Les différentes couches de chaussée.

### I.3.2. Différents types de structures de chaussée

Les différents types de structures de chaussées sont

#### I.3.2.1. Structures souples

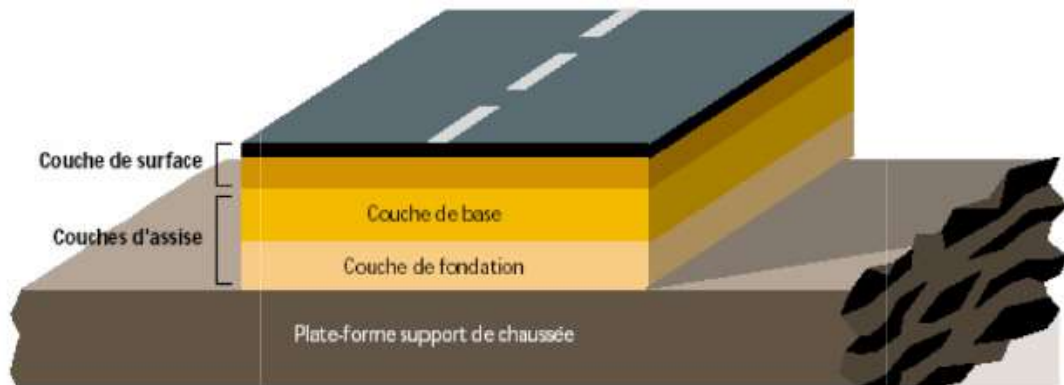
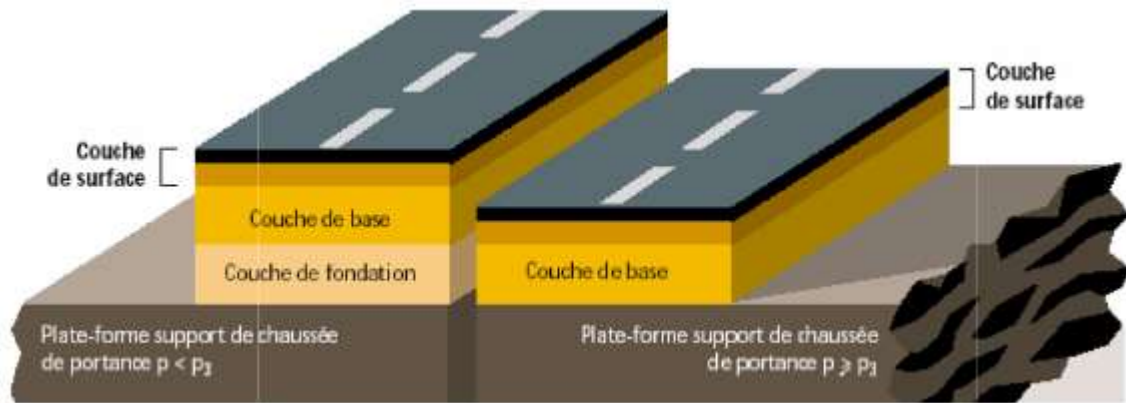


Figure I. 3: Les différentes couches de la chaussée souple.

Elles sont composées d'un revêtement bitumineux relativement mince (< à 15 cm) réduit parfois à un enduit dans le cas de chaussée à très faible trafic. L'assise est réalisée d'une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités (GNT). L'épaisseur d'ensemble de la structure est en générale comprise entre 30 et 60 cm.

### I.3.2.2. Structures semi-rigides



**Figure I. 4: Les différentes couches de la chaussée semi-rigide.**

#### **a. Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques :**

Elles sont aussi appelées chaussées semi-rigides. La couche de roulement est composée d'un revêtement bitumineux, elle repose sur une assise traitée aux liants hydrauliques dont l'épaisseur totale est d'environ 20 à 50 cm. Ce type de chaussée présente un fort risque de retrait qui fait apparaître, dans la couche de base, des fissures remontant rapidement dans la couche de surface.

#### **b. Les chaussées à structure mixte :**

La couche de roulement et la couche de base (10 à 20 cm) sont en matériaux bitumineux. La couche de fondation est en matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm). L'épaisseur de matériaux bitumineux doit être de la moitié de l'épaisseur totale de la chaussée. Ce type de chaussée empêche la remontée de fissures entre la couche traitée aux liants hydrauliques (retrait) et la couche de grave bitume.

#### **c. Les chaussées à structure inverse :**

Cette structure est composée d'une couche de surface en matériaux bitumineux d'environ 15 cm d'épaisseur ; d'une couche de base en matériaux granulaires non traités, environ 12 cm ; d'une fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques. L'épaisseur totale de la structure est de l'ordre de 60 à 80 cm.

### I.3.2.3. Structures rigides

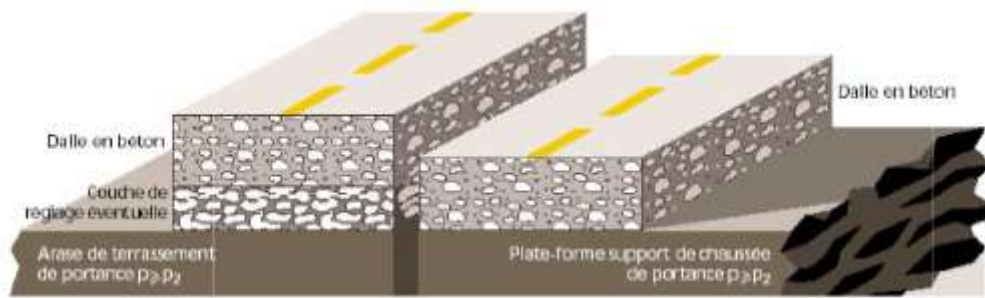


Figure I. 5: Les différentes couches de la chaussée rigide.

**a. Dalles non goudonnées avec fondation :**

Elles sont constituées de dalles de béton de ciment de 20 à 28 cm sans armature, reposant sur une fondation en béton maigre (12 à 18 cm), ou en matériaux traités aux liants hydrauliques (15 à 20 cm) au choix.

**b. Dalles goudonnées avec fondation :**

Elles sont constituées de dalles béton de ciment de 17 à 23 cm (avec armatures de liaison entre les dalles), reposant sur une fondation en béton maigre (14 à 22 cm) au choix.

**c. Dalles sans fondation :**

Elles sont constituées de dalles de béton de ciment de 28 à 39 cm qui reposent sur une couche drainante en matériaux granulaires ou sur un géotextile.

Béton armé continu (avec aciers filants sur toute la longueur de voirie) :

- Type A: Dalle de béton de ciment (16 à 24 cm), reposant sur une fondation en béton maigre de 12 à 14 cm au choix.
- Type B : Dalle de béton de ciment (18 à 24 cm) reposant sur une assise en matériaux bitumineux de 5cm et une fondation en sable traité aux liants hydrauliques (50 à 60 cm).

**Tableau I. 1: Types de structure de chaussée selon LCPC [1]**

| Structures types     | Nature des couches                          |                           |   | Commentaires   |
|----------------------|---|---------------------------|---|--|
|                      | Surface                                     | Base                      | Fondation                                       |  |
| Souples              | Bitumineuse                                 | Graves Non Traitées (GNT) |   | Epaisseur totale de la structure comprise entre 300 et 600mm   |
| Bitumineuses Epaises | Matériaux bitumineux                        |                           |   | Epaisseur des couches d'assise comprise entre 150 et 400 mm  |
| Semi-rigides         | Bitumineuse                                 | MTLH                      |   | Epaisseur des couches d'assise comprise entre 200 et 500 mm  |
| Rigides              | Béton de ciment (150 jà 400 mm d'épaisseur) |                           | Soit en MTLH<br>Soit en GNT<br>Soit bitumineuse | Couche de forme en MTLH<br>Dispositions particulières (dalle goujonnées ou non, béton armé continu, etc.) afin d'assurer une continuité mécanique au franchissement<br>d'une fissure due au retrait du béton |
| Mixtes               | Matériaux bitumineux                        |                           | MTLH  | Rapport de 0,5 entre l'épaisseur de matériaux bitumineux et celle de la structure de chaussée  |
| Inverses             | Bitumineuse                                 | GNT                       | MTLH  | Epaisseur de la GRH (environ 120 mm)   |
| Composite            | Béton bitumineux                            | Béton armé                | Graves  | Epaisseur de GB de 5 à 10cm  |
|                      | très mince<br>Enduit superficiel            | continu                   | bitumineux (GB)                                 |  |

### **I.3.3. Dégradations des chaussées**

#### **I.3.3.1. Définition de la dégradation**

La dégradation c'est l'ensemble des distorsions de la chaussée causée par de nombreux facteurs tels que : le trafic, le climat, types de sol support. D'une manière générale, les dégradations observées dans les chaussées peuvent être répertoriées en quatre principales familles qui sont : les déformations, les arrachements et les dégradations en milieu urbain.

#### **I.3.3.2 Les différentes familles de dégradation des chaussées souples et rigides**

##### **I.3.3.2.1. Les chaussées souples (flexibles)**

Selon le manuel d'identification des dégradations des chaussées flexibles (BERNARD, et

al. 2002) et le DT721 entretien préventif du réseau routier national, les dégradations des chaussées peuvent être regroupées en quatre grandes familles :

- Les fissures.
- Les déformations.
- Les arrachements.
- Les remontées.

### A. Les Fissures

Le vieillissement et la répétition des charges de trafic sur la couche de roulement d'une chaussée souple causent une dégradation sous la forme des fissures d'abord isolées puis évoluant peu à peu vers un nid-de-poule, on distingue :

**Les fissures transversales :** ce sont des lignes de rupture perpendiculaires à l'axe de la chaussée, survenant sur tout ou une partie de la chaussée soit la couche de roulement et de base.



**Figure I. 6:** RN 22 allons de la gare routière vers l'entrée de Tlemcen.

Les causes probables :

- Retrait thermique.
- Fragilisation et vieillissement du bitume.
- Remontée des fissures après des travaux de resurfaçage.

**Les fissures longitudinales :** pour les fissures longitudinales il existe deux types :

En piste de roue : ce sont des lignes de rupture parallèles à l'axe de la chaussée et situées dans les bandes des roulements.



**Figure I. 7: Route de montagne allons vers le plateau de Lalla Setti.**

Les causes probables :

- Fatigue du revêtement (trafic du poids lourd).
- Insuffisance de la capacité structurale de la chaussée.
- Une couche granulaire de la chaussée de mauvaise qualité de drainage.

Hors-piste de roue : ce sont des lignes de rupture parallèles à l'axe de la chaussée et situées en dehors des bandes de roulement, excluant les fissures de gel.



**Figure I. 8: Route à côté de jardin public hartoun.**

Les causes probables :

- Ségrégation de l'enrobé à la pose.
- Vieillissement du revêtement.

**Les fissures de gel :** ce sont des ruptures du revêtement générant une ou plusieurs fissures actives sous l'effet du gel, soit ils sont rectilignes et localisés au centre de la voie, ou ils sont d'apparence lézardée et n'ont pas d'emplacement précis sur la chaussée





**Figure I. 9:** Route de montagne à côté de la maison familiale petite perdreau FOSC.

Les causes probables :

- Soulèvements différentiels.
- Comportement gélif différentiel.
- Instabilité de remblai de la chaussée.
- Mauvais drainage.

**Fissure en carrelage :** c'est une rupture du revêtement sur des superficies plus ou moins étendues, formant un patron de fissuration à petites mailles polygonales dont la dimension moyenne est de l'ordre de 300 mm ou moins.



**Figure I. 10:** RN 6 qui relie le nord-ouest au sud-ouest de l'Algérie.

Les causes probables :

- Fatigue et vieillissement de la chaussée.
- Capacité portante insuffisante de la chaussée.



**Figure I. 11: Route de montagne vers le plateau de Lalla Setti.**

**Fissure en rive** : il s'agit d'une rupture en ligne droite ou en arc le long de l'accotement ou du bord de la chaussée.

Les causes probables :

- Manque de support latéral.
- Discontinuité dans la structure (par exemple élargissement de la chaussée).

### **B. Les déformations**

Ce sont des dégradations qui apportent une transformation de la chaussée donnant à la surface de cette dernière une forme différente et rendant la circulation plus difficile et dangereuse. Ces dégradations commencent généralement dans la couche inférieure de la chaussée ensuite la couche de roulement parmi ces déformations, on a :

**L'ornièrè** : c'est une dépression longitudinale simple, double et parfois triple située dans la bande de roulement. Le profil latéral de ces dépressions ressemble généralement à des traces de pneus simples ou jumelés.



**Figure I. 12: L'autoroute est-ouest de Lakhdaria vers Bouzegza.**

Les causes probables :

- Stabilité réduite de l'enrobé par temps chaud.
- Faible résistance de l'enrobé vis-à-vis le trafic du poids lourd.
- Manque de compactage de l'enrobé lors de la mise en place.
- Instabilité des matériaux qui constituent la couche de roulement ou la couche de base.
- Sous-dimensionnement ou fatigue du corps de chaussée.

**L'affaissement** : c'est une distorsion du profil généralement localisé près du bord de la chaussée ou près des conduites souterraines.



**Figure I. 13: Route de montagne vers le plateau de Lalla Setti**

Les causes probables :

- Rempli instable et manque de support latéral.
- Manque de compactage ou présence des matériaux inadéquats.
- Zone de déblai argileux ou secteurs marécageux.
- Assèchement du sol support.
- Réseaux souterrains de mauvais état (dans le milieu urbain)

**Désordre du profil** : il s'agit des pentes et géométries inappropriées favorisant l'accumulation des eaux de ruissellement en flaques sur la surface de la chaussée.



**Figure I. 14: Route avec désordre du profil.**

Les causes probables :

- Points bas non drainés.
- Affaissement le long des bordures (dans le milieu urbain).

### C. Les arrachements

Il s'agit des dégradations qui affectent généralement la couche de roulement. Parmi ces dégradations, on a :

**Désenrobage et arrachement** : c'est une érosion et départ du mastic et perte des gros granulats en surface produisant une détérioration progressive du revêtement.



**Figure I. 15: Route vers Djanet.**

Les causes probables :

- Un trafic très important
- Mauvais enrobage ou sous dosage du bitume.
- Utilisation d'agrégats hydrophiles ou bitumophobes.
- Manque de compactage.
- Vieillesse ou fragilisation de l'enrobé.
- Zone de freinage.

**Pelade** : c'est un arrachement par plaques de l'enrobé de la couche de surface.



**Figure I. 16: Allons de la gare routière vers l'entrée de Tlemcen.**

Les causes probables :

- Mauvaise adhérence de la couche de surface (ex. : manque du liant d'accrochage).
- Sous dimensionnement de la couche de surface.
- Un trafic très important.

**Nid-de-poule** : c'est une désagrégation localisée du revêtement sur toute son épaisseur formant des trous de forme généralement arrondie, au contour bien défini, de taille et de profondeur variables. Les trous peuvent être comblés par du rapiéçage temporaire.



**Figure I. 17: Route en Algérie.**

Les causes probables :

- Des faiblesses ponctuelles dans la couche de fondation.
- Sous dimensionnement de la couche de surface.

### **D. Les remontés**

Pour les remontées : on parle de ressuage qui est dû à la remontée de bitume à la surface du revêtement, accentuée dans les pistes des roues.



**Figure I. 18: Route en Algérie.**

Les causes probables :

- Surdosage du bitume.

- Effet combiné de la température élevée du revêtement et des sollicitations du trafic.
- Excès du liant d'accrochage.
- Formulation d'enrobé inadapté aux sollicitations.

### E. Dégradations et défauts en milieu urbain

On distingue les trois types suivants :

**Fissuration autour des regards et des puisards :** il s'agit d'une rupture du revêtement selon une trajectoire circulaire et/ou radiale.



**Figure I. 19: Route située à la wilaya de Blida.**

Les causes probables :

- Tassement ou consolidation de la chaussée.
- Chaussée sollicitée à l'effet du gel et de dégel.
- Influence dynamique.
- Perte de matériaux autour de la structure.

**Coupe et tranchée :** c'est des fissurations ou affaissement dans la tranchée ou dans son voisinage.



**Figure I. 20: RN 7 allons de rond-point de mansourah vers les vestiges de la mansourah.**

Les causes probables :

- Manque de compactage des matériaux de remblai de la tranchée.
- Hétérogénéité des matériaux.
- Remblai insuffisant sous les bords du revêtement.
- Manque d'étanchéité du joint de coupe.

**Dénivellation des regards et des puisards :** ce sont des inégalités entre la surface du revêtement et le dessus d'un puisard ou d'un regard.



**Figure I. 21: Route située à birouana**

Les causes probables :

- Tassement ou consolidation de la chaussée.
- Déformation engendrée par les cycles de gel et de dégel.
- Impacts dynamiques cumulant des déformations permanentes.

### **I.3.3.2.2. Les chaussées rigides**

Selon le catalogue des dégradations (2eme édition Avril 2007) une chaussée rigide peut présenter les dégradations suivantes :

- A. Dégradation de structure.
- B. Dégradation de surface.
- C. Dégradation de joints.
- D. Autres.

### A. Dégradations de structure :

**Fissure (longitudinale, transversale, oblique) :** Rupture de la dalle en deux morceaux sauf si celle-ci concerne un coin de dalle (dans ce cas, voir « fissure en coin »).



**Figure I. 22: fissures au niveau de la chaussée [2].**

Les causes probables :

- Portance insuffisante (épaisseur trop faible de la dalle, résistance insuffisante du béton à la traction...);
- Dégradation des conditions d'appui de la dalle (tassement ou érosion du sol de fondation);
- Sciage trop tardif des joints à la mise en œuvre (fissure transversale);
- Saignée pour balisage axial favorisant l'effet d'entaille sous fortes sollicitations,
- Dimensions excessives de la dalle par rapport à son épaisseur donnant lieu à des contraintes thermiques importantes.

**Fissure en coins / Cassure d'angle :** Rupture de la dalle en deux morceaux, les intersections de la fissure avec les bords de la dalle étant situées dans le quart de dalle adjacent au coin considéré.





**Figure I. 23: cassure d'angle [2].**

Les causes probables :

- Mauvaises conditions d'appui de la dalle et de transfert de charge combinées à la répétition des charges ;
- La présence ou non d'épaufrures ;
- L'existence ou non de départ de matériaux.

**Fracture** : Rupture de la dalle en plus de deux morceaux, les fissures étant longitudinales, transversales ou obliques. Les cassures d'angle ne sont pas à prendre en compte dans le dénombrement des morceaux de dalle.



**Figure I. 24: Fracture [2].**

Les causes probables :

- Portance insuffisante (épaisseur trop faible de la dalle, résistance insuffisante du béton à la traction...);
- Dégradation des conditions d'appui de la dalle (tassement ou érosion du sol de fondation).

**Pompage :** Remontée d'eau accompagnée éventuellement de fines à travers les joints ou les fissures.



**Figure I. 25: Pompage identifié par les dépôts de fines [2].**

Les causes probables :

- Dégradation des conditions d'appui de la dalle en présence d'eau due aux sollicitations dynamiques (les battements de dalles sous charge génèrent des mouvements d'eau sous pression aux interfaces dalles fondation qui provoquent des remontées d'eau et de fines à travers les joints ou les fissures).

**Décalage / Marche :** Différence de niveau entre deux dalles successives ou les lèvres d'une fissure. Une épaufrure avec départ de matériaux ne constitue pas une marche.



**Figure I. 26: Décalage [2].**

Les causes probables :

- Pompage.
- Tassement différentiel du sol de fondation.

### B. Dégradations de surface :

**Épaufrure** : Bris du bord de la dalle en coin ou en partie courante à moins de 30 cm du joint; généralement cette dégradation affecte simplement une partie de l'épaisseur de la dalle.



Figure I. 27: Épaufrure [2].

Les causes probables :

- Présence de matériaux incompressibles dans les joints (défaut d'entretien des joints).
- Faiblesse du béton face aux sollicitations dynamiques amplifiée par le sciage du joint (effet d'entaille).
- Résistance à la compression du béton insuffisante.
- Détérioration locale du béton par un sciage prématuré.

**Faièncage / Écaillage** : Faièncage : Ensemble de petites fissures formant un maillage serré affectant la surface de la dalle pouvant évoluer vers l'écaillage.



Figure I. 28: Faièncage [2].

Écaillage : Départ par petites plaques (écailles) de la pellicule de laitance en surface de la dalle.



**Figure I. 29: Ecaillage [2].**

Les causes probables :

- Défaut de mise en œuvre (remontées de laitance);
- Effets thermiques (variation de température, gel dégel) ;
- Chocs thermiques (thermo-soufflante, réacteurs);
- Produits déverglaçant.

### **C. Dégradations de joints :**

**Défaut de joints :** Le joint est défectueux lorsqu'il n'assure plus la fonction d'étanchéité.



**Figure I. 30: Défaut de joint [2].**

Les causes probables :

- Défaut du produit pour joint (vieillesse, durcissement, mauvaise adhérence, décollement, incompatibilité entre produits...)
- Défaut de mise en œuvre (nettoyage insuffisant du corps de joint avant application)

du produit, rapport incorrect entre la largeur et la profondeur du joint, absence de fond de joint) ;

- Actions thermiques, chimiques et mécaniques diverses (souffle des réacteurs d'avions, thermo-soufflage, kérosène, acides...);
- Arrachement du produit pour joint.

### D. Autres dégradations :

**Réparation ponctuelle dégradée** : Réparation ponctuelle, quelle que soit son origine, à l'exception des scellements de fissures, concernant une fraction de dalle supérieure ou égale à 0,5 m<sup>2</sup> et présentant des dégradations sur sa surface ou son contour.



**Figure I. 31: Réparation ponctuelle [2].**

Les causes probables :

- Défaut de mise en œuvre des matériaux d'apport. L'examen du type des dégradations apparaissant à sa surface permet de mieux cerner la nature du défaut (se référer pour cela au paragraphe « causes possibles » de la Dégradation rencontrée).

**Dépôt de gomme** : Dépôt de caoutchouc localisé dans la zone de toucher des roues.



**Figure I. 32: Dépôt de gomme [2].**

Les causes probables :

- Usure des pneumatiques des avions lors de la mise en rotation des roues aux atterrissages

### **I.4. Remontée des fissures dans la couche de roulement**

La remontée d'une fissure existante, au travers de la couche de roulement, est le résultat de mouvements des lèvres de la fissure qui sont transférés à la base de la couche de surface. Afin d'identifier correctement le problème de la remontée de fissure, il importe de bien identifier les différents paramètres qui peuvent causer ces mouvements et d'en analyser leur nature. [3]

#### **I.4.1. Charges provoquant les mouvements de la pointe de la fissure**

Trois types de charges provoquent des mouvements des lèvres de la fissure :

- **Trafic** : Les véhicules, et plus particulièrement les essieux de camions, qui passent au droit de la fissure ou à proximité, induisent des mouvements horizontaux et verticaux de la fissure.
- **Variations de température** : Les changements de températures, jour&nuit et entre les saisons été&hiver, causent des dilatations et contractions des sections comprises entre deux fissures existantes. Ces mouvements horizontaux alternent entre l'ouverture et la fermeture des fissures.
- **Variation de teneur en eau du sol** : La variation de teneur en eau se traduit par un changement de la portance du sol qui se répercute aussitôt sur la fissure par une ouverture ou une fermeture. [3]

#### **I.4.2. Nature des mouvements des lèvres de la fissure**

Les nature et forme des fissures existantes dépendent du type de structure de chaussée ainsi que des charges, ou contraintes, auxquelles sont soumises les lèvres de la fissure.

- **Combinaison de mouvements possibles** :

Les trois mouvements possibles des lèvres sont clairement identifiés et classés selon un schéma conventionnel d'Irwin [IRW57] :

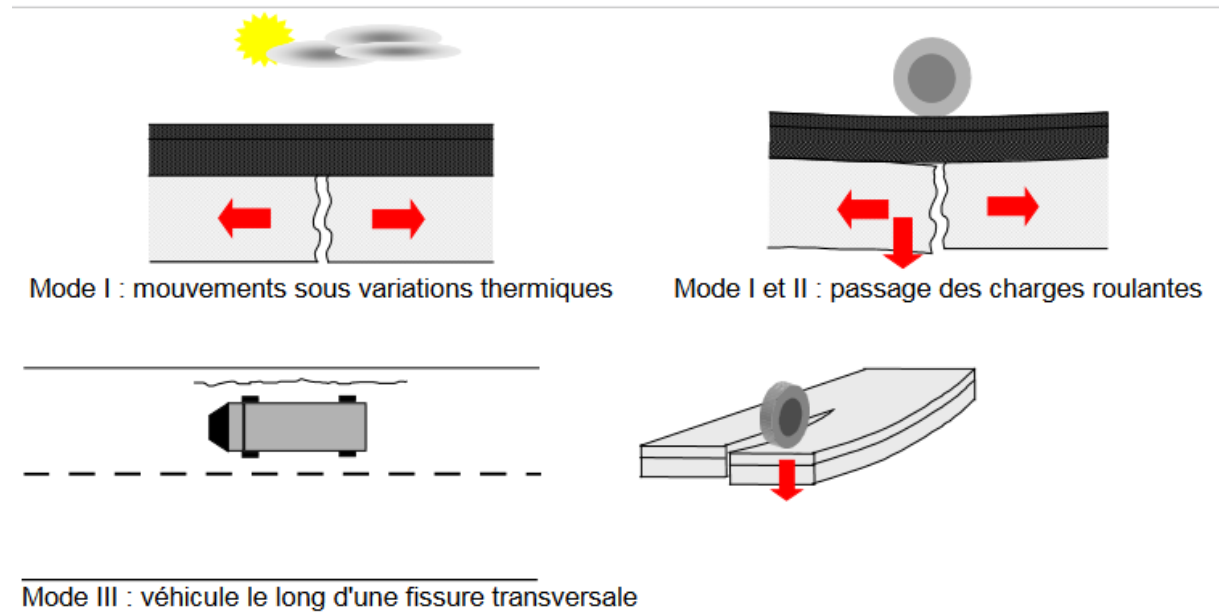
Mode I : ouverture des lèvres

Mode II : cisaillement

Mode III : déchirement

Sur la chaussée, ces trois types de mouvements vont causer la rupture de la couche de surface

selon une combinaison des mouvements présentés en figure I.32



**Figure I. 33: Mouvements possibles des pointes de la fissure.**

Le retrait thermique, ou hydraulique du béton, s'apparente systématiquement au mouvement de type mode I, c'est à dire d'ouverture. Le trafic est une combinaison des 3 mouvements, dépendant de la position du véhicule sur la chaussée et de la géométrie de la fissure existante.

- **Fréquence de sollicitation**

Les différents mouvements de la pointe de fissure, sont fonctions de la charge qui s'applique pour la partie cinématique, mais ces mouvements se distinguent aussi par la vitesse du chargement.

- des mouvements rapides induits par le trafic et plus particulièrement les charges lourdes, tels les camions. La durée du chargement est estimée à 1/10ème de seconde.
- des mouvements lents dus aux retraits thermiques par variations de température (entre le jour et la nuit).
- des mouvements très lents résultant des retraits dus aux variations thermiques entre l'été et l'hiver ou des variations hydriques (dans le sol support).

- **Amplitude des mouvements**

L'amplitude des mouvements dus aux charges roulantes est directement fonction de la charge roulante. Elle est aussi directement reliée à la déformation possible de la structure. Concernant les mouvements de retraits thermiques, l'amplitude des mouvements des lèvres

de la fissure est fonction de l'amplitude de variation de température mais aussi du coefficient de dilatation thermique.

L'ouverture sous chargement thermique est plus grande si les joints sont espacés ; mais elle est aussi fonction de la qualité du collage entre les couches.

- **En conclusion**

Le trafic induit des contraintes dans les chaussées fissurées qui se traduisent par des mouvements des lèvres des fissures en mode I (ouverture), II (cisaillement) et III (déchirement), en fonction de la position du véhicule par rapport à la fissure.

Le mouvement est rapide (donc une fréquence élevée) avec des amplitudes variables

Le retrait thermique (ou hydraulique) crée des mouvements d'ouverture des lèvres de la fissure (mode I). Les mouvements sont lents, voire très lents, avec de fortes amplitudes. [3]

### **I.5. Méthodes de maintenance et réduction de la propagation des fissures**

Il existe plusieurs techniques de réparation (maintenance) des chaussées, nous pouvons citer :

#### **A. Scellement de fissures :**

Le scellement de fissures représente l'un des procédés les plus importants dans d'entretien des chaussées. Ce procédé retarde les dégradations de la chaussée en prévenant l'infiltration de l'eau et des matériaux incompressibles dans les couches sous-jacentes de la chaussée. Le scellement de fissures a une durée de vie de trois à huit ans et est considéré comme un traitement permanent.





Figure I. 34: Scellement de fissures.

### **B. Le planage et l'épandage :**

La technique d'entretien la plus conventionnelle consiste à renouveler les caractéristiques de sécurité et de confort et de diminuer le bruit routier par planage de la couche de roulement existante et l'épandage d'une nouvelle couche d'enrobés.



Figure I. 35: Le planage et l'épandage.

### **C. Traitement de surface :**

Le traitement de surface, parfois appelé enduit superficiel, est une technique d'entretien de surface des chaussées constituée de couches superposées d'émulsion de bitume et de granulats sélectionnés. Il peut être constitué d'une, deux ou trois couches. Chaque couche varie de 5 à 20 mm d'épaisseur selon l'état du support, le trafic et d'autres besoins particuliers. Il permet de créer une couche de roulement sur une surface donnée. Il protège

et scelle la surface. Il redonne les caractéristiques de surface d'une chaussée usée prolongeant ainsi sa durée de vie de plusieurs années.



**Figure I. 36: Traitement de surface (enduit superficiel).**

### **D. Enrobé coulé à froid (ECF) :**

L'enrobé coulé à froid (ECF) est un procédé d'entretien des chaussées et il est constitué de granulats concassés de haute performance, d'émulsion de bitume polymère et d'additifs. Ce mélange est coulé sur la chaussée en améliorant son adhérence. L'ECF, permet aussi de corriger de légers défauts de surface tels que l'orniérage mineur, la porosité, l'esthétique tout comme le confort de roulement. Ce procédé mince (entre 6 et 20 mm) a un temps de prise d'environ une heure, ce qui permet une reprise rapide de la circulation.



**Figure I. 37: Enrobé coulé à froid (ECF).**

### **E. Dé-Cohésionnement/stabilisation :**

C'est un procédé de réhabilitation qui renforce une chaussée fortement dégradée. En utilisant les matériaux en place, cette intervention stabilise et homogénéise la couche de fondation. Ce procédé s'effectue sur une épaisseur de 100 à 300 mm et nécessite des opérations de profilage et de compactage.



**Figure I. 38: Dé-Cohésionnement/stabilisation.**

### **F. Application des nappes géo-synthétiques :**

L'application des géosynthétiques sont parmi la solution idéale pour optimiser la rénovation des chaussées. Sur les projets d'autoroute de grande envergure ou les interventions de réparation du réseau secondaire, la construction de pistes d'aéroport ou d'un parc de stockage, ils améliorent le nouveau revêtement tout en offrant un ratio coût-performance idéal. Depuis plus de 30 ans, on utilise des géo-synthétiques imprégnés de bitume pour lutter contre les remontées de fissures et pour assurer l'entretien des chaussées en asphalte et en béton. Cette méthode offre un moyen économique pour allonger significativement les intervalles d'entretien et la durée de vie du réseau routier.



**Figure I. 39: Application des nappes géo-synthétiques.**

### **I.6. Conclusion**

En résumé, Une chaussée se présente comme une structure composite réalisée par empilements successifs de couches de matériaux granulaire, Dans ce chapitre, on a présenté les différents types de structure de chaussée et les matériaux qui constituent leurs différentes couches, après on a passé vers les différents facteurs et familles de dégradation qui influent sur la chaussée et causent sa dégradation. Malheureusement la majorité des chaussées en Algérie sont dégradées (pleines de fissures et de déformations). Il est donc très important de penser à des solutions économiques et durables pour les réduire, et même éliminer ses différentes pathologies. Pourquoi pas l'utilisation des produits géosynthétiques qui offrent des solutions alternatives, techniquement efficaces rentables et respectueuses de l'environnement.

## **CHAPITRE II**

# **Méthodes de dimensionnement des chaussées souples**

### **II.1. Introduction**

Des millions de conducteurs roulent chaque jour sur une chaussée qui n'est pour eux qu'un simple ruban de bitume. Or cette couche de surface doit assurer sécurité et confort (adhérence des véhicules, limitation du bruit de roulement) dans les meilleures conditions économiques (durabilité de la structure pour en limiter les coûts d'entretien et de réfection). Pour cela, une chaussée doit reposer sur une assise, -face cachée de la route- et avoir un revêtement propre apte à résister à des sollicitations géotechniques, climatiques (gel, infiltration des eaux), et à la nature et l'intensité du trafic à supporter.

Ainsi revêtement et corps de chaussée constituent un ensemble mécanique complexe de couches de granulats et de liant dont la teneur, le dosage, les caractéristiques, répondent à une approche fonctionnelle et économique et à une stratégie intégrant coûts d'investissement, d'entretien et niveau de service à l'utilisateur.

### **II.2. Les facteurs déterminants pour les études de dimensionnement de chaussée**

Le nombre des couches, leurs épaisseurs et les matériaux d'exécution, sont conditionnées par plusieurs facteurs parmi les plus importants on cite :

#### **A. Le trafic :**

Le trafic de dimensionnement est essentiellement le poids lourd (véhicules supérieurs à 3.5t).

Il intervient comme paramètre d'entrée dans le dimensionnement des structures de chaussées et le choix des caractéristiques intrinsèque des matériaux pour la fabrication des matériaux de chaussée.

#### **B. L'environnement :**

L'environnement extérieur de la chaussée est l'un des paramètres d'importance essentielle dans le dimensionnement ; la teneur en eau des sols détermine leurs propriétés, la température a une influence marquée sur les propriétés des matériaux bitumineux et conditionne la fissuration des matériaux traités par des liants hydrauliques.

#### **C. Le sol support :**

Les structures de chaussées reposent sur un ensemble dénommé « plate-forme support de chaussée » constitué du sol naturel terrassé, éventuellement traité, surmonté en cas de besoin d'une couche de forme.

### **D. Les matériaux :**

Les matériaux utilisés doivent résister à des sollicitations répétées un grand nombre de fois (le passage répété des véhicules lourds).

### **II.3. Méthodes de dimensionnement des chaussées**

On distingue deux familles des méthodes :

- Les méthodes empiriques dérivées des études expérimentales sur les performances des chaussées.
- Les méthodes dites « rationnelles » basées sur l'étude théorique du comportement des chaussées.

#### **II.3.1. Les méthodes empiriques**

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

##### **II.3.1.1. La méthode L.C.P.C (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées)**

La méthode L.C.P.C est une méthode française de dimensionnement des chaussées, elle est basée sur la détermination du trafic équivalent  $e$  (en fonction de la température équivalente  $T_{eq}$ , et l'indice CBR ICBR), à partir de l'abaque L.C.P.C. [4]

##### **II.3.1.2. Méthode américaine de l'AASHO : (Américain Association of state highway officiels)**

C'est une méthode empirique basée sur l'observation du comportement de la chaussée sous trafic (essai AASHO). Chaque section reçoit l'application d'environ un million des charges roulantes, ce qui permet notamment de savoir : l'état structural de la chaussée et l'évolution dans le temps, l'équivalence entre les différentes couches de matériaux, et aussi l'équivalence entre les différents types de charge par essai. [4]

**II.3.1.3. Méthode de CBR (California Bearing Ration)**

C'est une méthode empirique qui se base sur un essai de poinçonnement sur un échantillon du sol support, elle permet de déterminer l'épaisseur du corps de chaussée à mettre en œuvre par la formule suivante : [5]

$$e = \frac{100 + \sqrt{p} * (75 + 50 \log(\frac{N}{10}))}{I_{CBR} + 5} \quad (II.1)$$

Avec :

e : épaisseur équivalente ;

ICBR : indice CBR (sol support) ;

P : charge par roue égale a 6.5t (essieu 13t) ;

Log : logarithme décimale ;

N : désigne le nombre journalier de poids lourd à vide à l'année horizon.

$$N = TJMA_n \times PL\% \quad (II.2)$$

Avec :

TJMA : trafics prévus pour une durée de vie de 20ans ;

n : année de prévision ;

Pl % : Pourcentage des poids lourd.

- L'épaisseur équivalente :

C'est un paramètre qui tient compte des qualités mécaniques différentes des couches.

L'épaisseur équivalente est donnée par la relation suivante :

$$e = \sum e_{réelle} \times a = a_1 \times e_1 + a_2 \times e_2 + a_3 \times e_3 \quad (II.3)$$

a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, a<sub>3</sub> : coefficients d'équivalence des matériaux des couches de la chaussée ;

e<sub>1</sub>, e<sub>2</sub>, e<sub>3</sub> : épaisseurs réelles des couches.

Les épaisseurs et les coefficients d'équivalence utilisés généralement sont regroupés dans le tableau ci-contre :



**Tableau II. 1: Coefficient d'équivalences et des épaisseurs des différents matériaux utilisés en structure de chaussée. [5]**

| <b>Matériaux</b>              | <b>Coefficients d'équivalences<br/>(a)</b> | <b>Epaisseurs des couches (e)<br/>(cm)</b> |
|-------------------------------|--|--|
| <b>Béton bitumineux (BB)</b>  | 2  | 6-8  |
| <b>Grave bitumineux (GB)</b>  | 1.5  | 10-20                                      |
| <b>Grave ciment (GC)</b>      | 1.5  | 15-25                                      |
| <b>T.V.O</b>                  | 0.75                                       | 25 et plus                                 |
| <b>Grave non traité (GNT)</b> | 1  | -  |

**II.3.1.4. Méthode du catalogue de dimensionnement des chaussées neuves (CTTP)**

L'utilisation du catalogue de dimensionnement des chaussées neuves fait appel aux paramètres suivants :

- Type de réseau principal ;
- Durée de vie ;
- Les données climatiques ;
- Le trafic ;
- Le sol support de chaussée ;
- Les caractéristiques des matériaux. [6]

**a. Type de réseau principal**

La classification des réseaux principaux se fait d'après le tableau suivant :

**Tableau II. 2: Classification des réseaux principaux**

| <b>Réseau principal</b> | <b>Trafic (véhicule/jour)</b> |
|-------------------------|-------------------------------|
| RP1                     | >1500                         |
| RP2                     | <1500                         |

### b. Durée de vie

La durée de vie est en étroite relation avec la stratégie d'investissement retenue par le maître de l'ouvrage. Elle correspond à un investissement initial moyen à élevé et des durées de vie allant de 15 à 25 ans en fonction du niveau de réseau considéré. Les durées de vie fixées par niveau de réseau principal (RP1, RP2) et par matériaux types sont synthétisées dans le tableau suivant :

**Tableau II. 3: Duré de vie des différents matériaux**

| Niveau de réseau principal (RPi) | Matériaux types                                  | Structures types               | Durée de vie (années) |
|----------------------------------|--|--------------------------------|-----------------------|
| RP1                              | MTB (matériaux traité au bitume)                 | GB/GB, GB/GNT, GB/TUF, GB/SG   | 20                    |
|                                  | MTLH (matériaux traités aux liants hydrauliques) | GL/GL                          | 20                    |
|                                  |  | BCg                            | 25                    |
| RP2                              | MNT (matériaux non traités)                      | GNT/GNT, TUF/TUF, SG/SG, AG/AG | 15                    |
|                                  | MTB (matériaux traités au bitume)                | SB/SG                          | 15                    |

Avec :

GB : grave bitume, GL : grave laitier, BCg : béton de ciment goujonné, SB : sable bitume, GNT : grave non traitée, SG : sable gypseux, AG : arène granitique, TUF : encroûtement calcaire.

### c. Données climatiques

Les données directement utilisées dans le calcul de dimensionnement des chaussées se rapportent :

- **L'état hydrique du sol support** : elle est prise en compte à travers la portance du sol support. Cette portance est estimée à partir d'un essai de poinçonnement CBR dont les conditions d'imbibition (immédiat ou à 4jours) sont liées à la zone climatique. Les zones climatiques de l'Algérie sont mentionnées dans le tableau suivant :

**Tableau II. 4: Zone climatique de pluviométrie**

| Zone climatique | Pluviométrie (mm/an) | Climat      | région               |
|-----------------|----------------------|-------------|----------------------|
| I               | >600                 | Très humide | Nord                 |
| II              | 350-600              | Humide      | Nord, hauts plateaux |
| III             | 100-350              | Semi-aride  | Hauts-plateaux       |
| IV              | <100                 | aride       | Sud                  |

- **Cycles saisonniers de température :** Les cycles saisonniers de température qui influent sur les caractéristiques mécaniques des matériaux bitumineux (GB, BB, SB) sont pris en compte à travers la notion de température équivalente.

Température équivalente : le calcul de dimensionnement est fait pour une température constante dite température équivalente  $\theta_{eq}$ . Cette dernière se détermine par application du cumul des dommages de la loi de Miner.

Les valeurs de température équivalentes ( $\theta_{eq}$ ) retenues pour le calcul du dimensionnement sont données dans le tableau suivant :

**Tableau II. 5: Choix des températures équivalentes**

| Température équivalente $\theta_{eq}$ (°) | Zone climatique |     |    |
|---|-----------------|-----|----|
|   | I et II         | III | IV |
|   | 20              | 25  | 30 |

### D. Le trafic

La connaissance du trafic, essentiellement le trafic poids lourd (véhicule de plus de 3.5tonne) intervient comme paramètre d'entrée dans le dimensionnement des structures de chaussées et dans le choix des caractéristiques intrinsèque des matériaux (MDE, LA), pour la fabrication des matériaux des chaussées.

La classe de trafic (TPLi) est déterminée à partir du trafic PL/j/sens compté en moyenne journalière annuelle (MJA), sur la voie la plus chargée, à l'année de mise en service. Le tableau suivant donne par niveau de réseau (RP1 ou RP2) les classes de trafic adoptées :

**Tableau II. 6: Classes de trafic TPLi adoptées**

|             |     | TPL0   | TPL1        | TPL2         | TPL3         | TPL4           | TPL5          | TPL6           | TPL7           |
|-------------|-----|--------|-------------|--------------|--------------|----------------|---------------|----------------|----------------|
| (PL/J/sens) | RP1 | -      | -           | -            | 150 à<br>300 | 300 à -<br>600 | 600 à<br>1500 | 1500 à<br>3000 | 3000 à<br>6000 |
|             | RP2 | 0 à 50 | 50 à<br>100 | 100 à<br>150 | 150 à<br>300 | -              | -             | -              | -              |

### E. Les classes de sols support

Le sol support de chaussées est assimilé à un massif demi-infini élastique, homogène et isotrope.

Les classes de portances sont données dans le tableau suivant :

**Tableau II. 7: Classes de portance de sols Si**

| Portance | CBR     |
|----------|---------|
| S4       | < 5     |
| S3       | 5 – 10  |
| S2       | 10 – 25 |
| S1       | 25 – 40 |
| S0       | >40     |

Il existe une relation entre la qualité du sol support de chaussée et le bon comportement des chaussées. Pour cette raison, et pour chaque niveau de réseau principal (RP1 et RP2), les classes de sol support considérées sont les suivantes :

- Pour le réseau principal RP1 : S0, S1, S2.
- Pour le réseau principal RP2 : S0, S1, S2, S3.

Si ces niveaux de portance ne sont pas atteints, il faudra alors prévoir une couche de forme de manière à améliorer le module du sol support de chaussée et ce conformément aux tableaux de sur- classement des sols supports donné précédemment.

### F. Matériaux

Les performances mécaniques des matériaux sont différentes et sont en fonction de leurs natures, on distingue les matériaux traités au bitume (MTB) et les matériaux non traité (MNT).

**II.3.2. Les méthodes théoriques ou rationnelle**

Cette approche propose un modèle mathématique représentant le mieux possible le comportement de la structure de chaussée. On a dans cette approche, le modèle de Boussinesq, bicouche de Hoog, Westergaard et le modèle multicouche de Burmister.

**II.3.2.1. Modèle de Boussinesq (1885)**

Créé et utilisé initialement en mécanique des sols, ce modèle s'appuie sur un massif élastique semi-infini soumis à l'action d'une charge statique ponctuelle.

La figure ci-dessous référencée figure II.1, illustre le principe du modèle de Boussinesq.

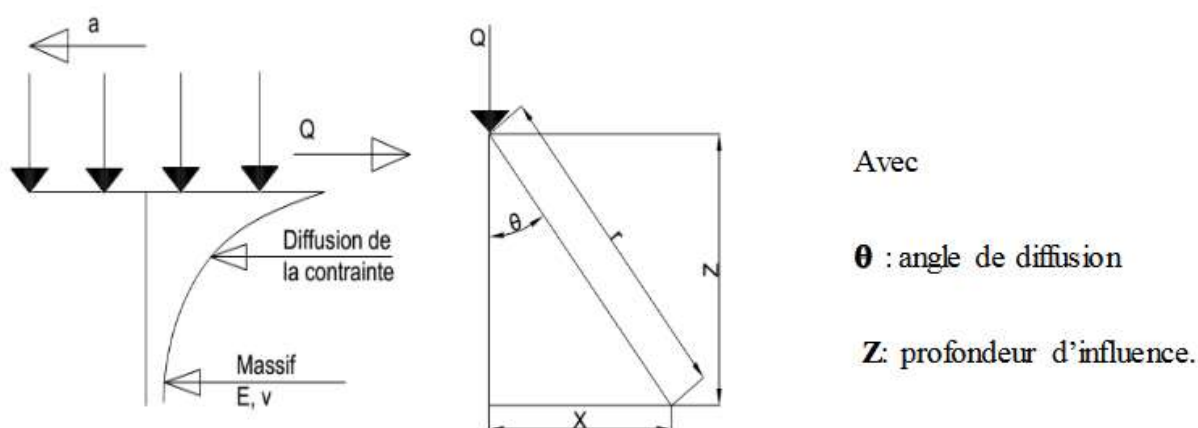


Figure II. 1: Diffusion des contraintes selon Boussinesq.

**II.3.2.2. Modèle bicouche de Westergaard (1926)**

Ce modèle donne les contraintes et déformations d'un système constitué d'une plaque reposant sur un sol assimilé à un ensemble de ressorts verticaux sans connexions horizontales. Modèle trop théorique et donne une surestimation des contraintes.

La figure ci-dessous référencée figure II.2, illustre le principe du modèle de Westergaard.

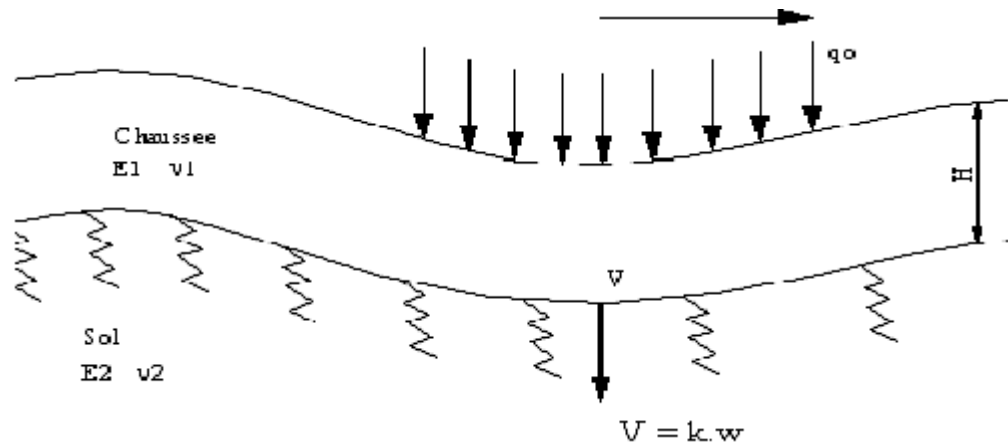


Figure II. 2: Diffusion des contraintes selon Westergaard.

**II.3.2.3. Modèle bicouche de Hogg (1938)**

Il donne les contraintes et déformations d'une plaque reposant sur un massif élastique semi-indéfini de type Boussinesq.

La figure cis-bas référencée figure II.3, illustre le principe du modèle de Hogg.

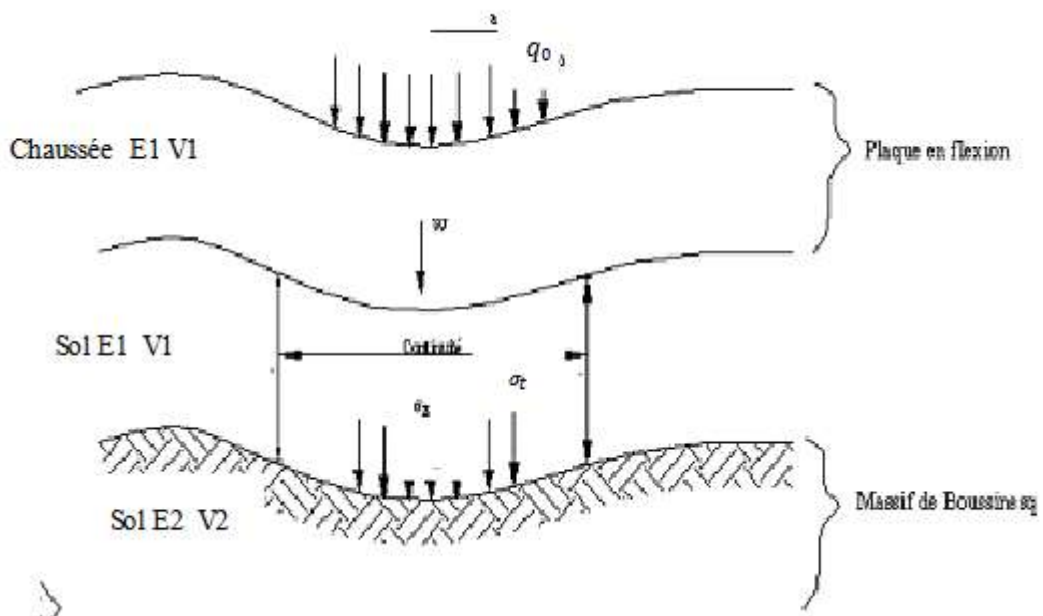
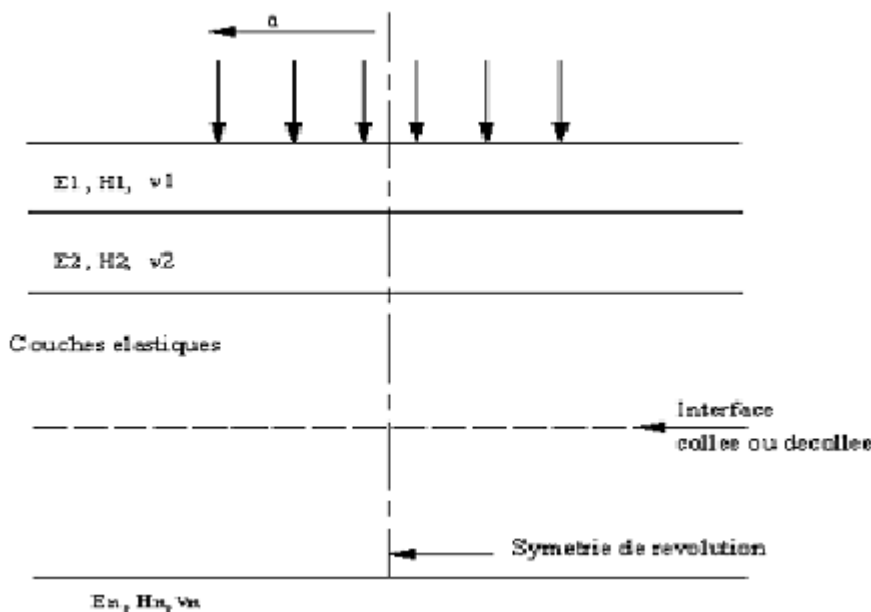


Figure II. 3: Diffusion des contraintes selon Hogg.

**II.3.2.4. Modèle de Burmister (1943)**

Il fallut attendre près de 20 ans avant de disposer d'un modèle pour les chaussées souples. C'est en 1943 que Burmister, professeur à l'Université de New-York, publia sa solution du multi-couche élastique. Il aborde et traite le problème général d'une structure à n couches reposant sur un massif élastique semi-indéfini.

La figure cis-bas référencée figure II.4, illustre le principe du modèle de Busmister.



**Figure II. 4: Diffusion des contraintes selon Busmister.**

Au vue de ce qui a été développé dans cette partie, Nous constatons que chaque approche présente des avantages et inconvénients résumés dans le tableau II.8 :

**Tableau II. 8: Avantages et Inconvénients des méthodes de dimensionnement**

| <b>Méthode</b>     | <b>Avantages</b>  | <b>Inconvénients</b>  |
|--------------------|---|---|
| <b>Empirique</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>* facilité de calcul</li> </ul>  | Les résultats des analyses ne peuvent pas être généralisés car ne s'appliquant qu'aux matériaux étudiés, aux conditions d'environnement de l'expérience et aux sols supports rencontrés |
| <b>Rationnelle</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Minimise les erreurs</li> <li>* Prise en compte des compositions réelles du Trafic et des matériaux locaux.</li> <li>* Adaptation aux différentes conditions environnementales et climatiques</li> </ul> | Base théorique donc aucune certitude pratique   |

### **II.4. Méthodes modernes et numériques**

Ces méthodes sont basées sur l'utilisation des logiciels numériques qui sont travail avec la méthode des éléments finis **MEF**, tel que le logiciel ANSYS, Alizé-lcpc, Abaqus, plaxis 2d et 3d, et autres logiciels.

#### **II.4.1. Méthode des éléments finis**

La méthode des éléments finis est l'une des méthodes les plus utilisées aujourd'hui pour résoudre effectivement ces équations. Elle nécessite l'utilisation intensive de l'ordinateur. C'est une méthode très générale qui s'applique à la majorité des problèmes rencontrés dans la pratique : problèmes stationnaires ou non stationnaires, linéaires ou non linéaires, définis dans un domaine géométrique quelconque à une, deux ou trois dimensions. De plus elle s'adapte très bien aux milieux hétérogènes souvent rencontrés dans la pratique par l'ingénieur.

#### **II.4.2. Principes de la méthode des éléments finis**

La MEF consiste à remplacer la structure physique à étudier par un nombre fini d'éléments ou de composants discrets qui représentent un maillage. Ces éléments sont liés entre eux par un nombre de points appelés nœuds. On considère d'abord le comportement de chaque partie indépendante, puis on assemble ces parties de telle sorte qu'on assure l'équilibre des forces et la compatibilité des déplacements réels de la structure en tant qu'objet continu.

La MEF est extrêmement puissante puisqu'elle permet d'étudier correctement des structures continues ayant des propriétés géométriques et des conditions de charges compliquées. Elle nécessite un grand nombre de calculs qui, à cause de leur nature répétitive, s'adaptent parfaitement à la programmation numérique.

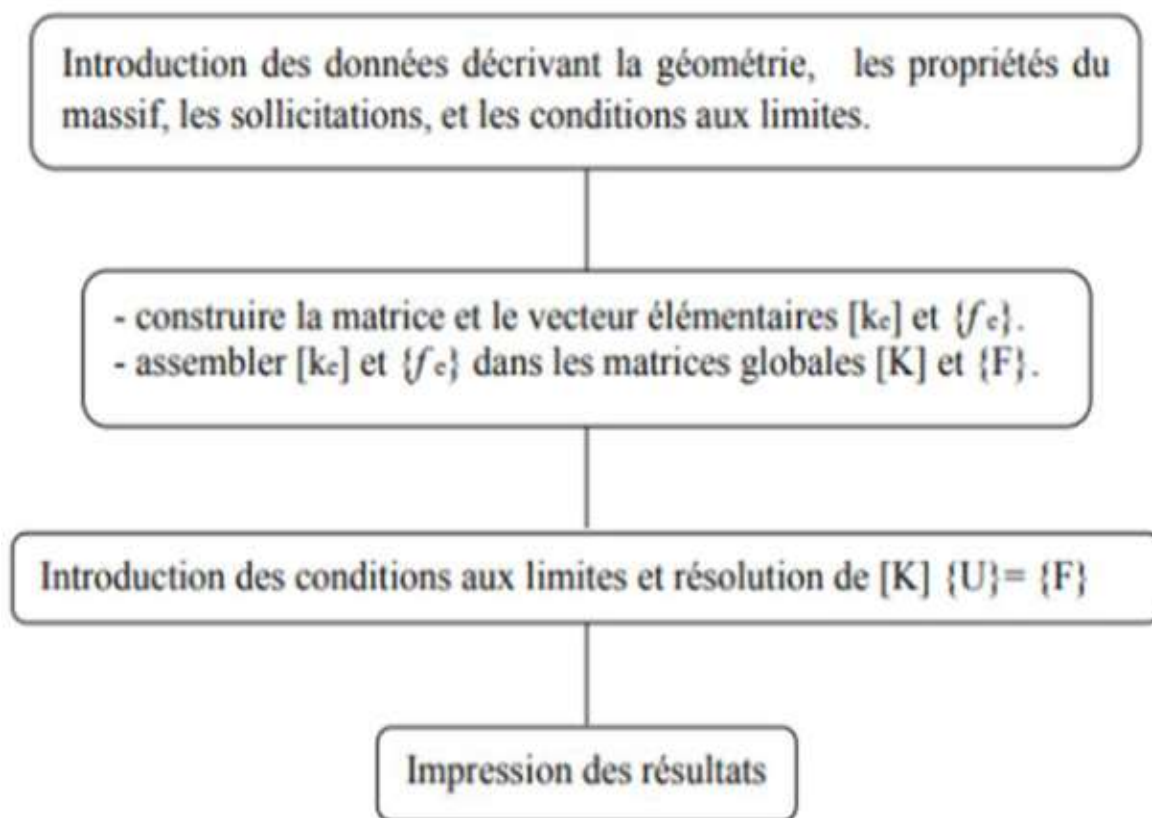
L'analyse de type éléments finis d'une structure sol-géo synthétiques peut notamment comporter les étapes suivantes :

- la définition des conditions aux limites,
- le choix de la relation déformations-contraintes des matériaux utilisés,
- les caractéristiques mécaniques des interfaces,
- la définition des chargements.

Le tableau suivant résume les parties de base du programme d'ordinateur pour la résolution complète d'un problème par la méthode des éléments finis



Tableau II. 9: Organigramme d'étapes caractéristiques d'un programme d'éléments finis



### II.5. Exemple de Calcul et dimensionnement des chaussées

#### II.5.1. Exemple de dimensionnement par la Méthode du catalogue

- **Type de réseau principal :**

On a  $TJMA=20\ 000 > 1500$  v/j/sens réseau principal RP1.

- **Classe de trafic :**

$TJMA_{2013} = (1+0.04)^4 \times 20000 = 23398$  v/j/sens.

$PL = 23398 \times 0.045 = 1053$  PL/j/sens.

D'après le tableau X on a :  $600 < PL < 1500$  classe de trafic TPL5.

- **Classe de portance :**

Notre sol est de classe S4 (ICBR =4), donc on doit procéder à une amélioration du sol support en ajoutant une couche de forme de 60cm en deux couches pour atteindre une classe de portance S2.

- **Données climatiques :**

D'après le tableau II.5 et la carte climatique (fournis en annexe), notre projet se situe en zone climatique I.

- **Durée de vie :**

Notre réseau principal est de classe RP1, et on a utilisé des matériaux traités au bitume, alors d'après le tableau II.3 la durée de vie de notre chaussée est de 20 ans. D'après le catalogue de dimensionnement des corps de chaussée (fascicule 3 fournis en annexe) on aboutit au corps de chaussée suivant :

Béton bitumineux : 6cm

Grave bitumineux : 20cm

Grave non traité : 30cm

### II.5.2. Exemple de dimensionnement par la Méthode CBR

TJMA2013= 24311V/J/sens (année de mise en service).

T= 5%.

ICBR=4.

Z=4.5%.

$$TJMA2033=(1 + 0.05)^{20} \times 24311$$

$$TJMA2033=64505 \text{ v/j/sens}$$

$$NPL2033= 64505 \times 0.045$$

$$NPL2033= 2903 \text{ PL/J/sens}$$

**Remarque :** Dans notre cas on a ICBR=4(classe de portance S4) alors on doit améliorer la portance du sol en ajoutant une couche de forme selon le tableau suivant :

**Tableau II. 10: Amélioration de la portance du sol support**

| Portance du sol | Matériaux de CF | Epaisseur de CF  | Portance visée |
|-----------------|-----------------|------------------|----------------|
| <S <sub>4</sub> | Non traité      | 50 cm (2couches) | S <sub>3</sub> |
| S <sub>4</sub>  | Non traité      | 35 cm            | S <sub>3</sub> |
| S <sub>4</sub>  | Non traité      | 60 cm (2couches) | S <sub>2</sub> |
| S <sub>3</sub>  | Non traité      | 40 cm (2couches) | S <sub>2</sub> |
| S <sub>3</sub>  | Non traité      | 70 cm (2couches) | S <sub>1</sub> |

## CHAPITRE II : Méthodes de dimensionnement des chaussées souples

---

Notre sol est de classe S4 on veut l'améliorer en classe S2, on ajoute 60cm de Tuf pour atteindre un ICBR=10.

$$e = \frac{100 + \sqrt{6.5} \left[ 75 + 50 \log \frac{2903}{10} \right]}{10 + 5}$$

$$e = 40.34 \text{ cm}$$

**On utilisera les matériaux suivants :**

Béton bitumineux : 6cm.

Grave bitume : 10cm.

Grave non traité : x (à calculer).

$$40.34 = (6 \times 2) + (10 \times 1.4) + (x \times 1)$$

$$x = 14.36 \text{ cm}$$

**Donc le corps de chaussée et come suite :**

Béton bitumineux : 6cm

Grave bitumineux : 10cm

Grave non traité : 15cm

### **II.6 Conclusion**

En résumé, Le dimensionnement des structures de chaussée constitue une étape importante de l'étude d'un projet routier. Il s'agit simultanément de choisir les matériaux nécessaires ayant des caractéristiques requises et de déterminer les épaisseurs des différentes couches de la structure de la chaussée. Afin d'assurer de bonnes caractéristiques mécaniques qui lui permettra de résister à toutes les charges pendant toute sa durée de vie, Dans ce chapitre nous avons parlé sur les méthodes utiliser pour le dimensionnement des structures de chaussée.

# **CHAPITRE III**

## **Les géo-synthétique et leurs applications récentes**

### **III.1. Introduction**

Les chaussées sont influencées par plusieurs facteurs, ce qui diminue leur durée de vie et de service. Pour cela, on utilise les produits géo-synthétiques pour le renforcement et/ou la réparation, et ces produits vont influencer sur le comportement de la chaussée.

### **III.2. Définition de la géo-synthétique**

Un géosynthétique est un terme générique (commun), désignant un produit manufacturé (produit) en usine disposant d'une qualité industrielle de caractéristiques précises et régulières, dont l'un des constituants est à base de polymères synthétique ou naturel. Les géosynthétiques permettent d'améliorer les caractéristiques mécaniques et/ou hydrauliques des sols ou matériaux, d'économiser le volume des matériaux nobles (couteux) ou de remplacer certains matériaux granulaires (trop de vides). Ils permettent aussi, de construire plus rapidement et plus efficacement, et ainsi augmenter de la durabilité des ouvrages et diminuer leurs coûts de revient.

### **III.3. Principaux types des géo-synthétiques**

#### **III.3.1. Les Géotextiles**

##### **a. Géotextile non tissé :**

C'est un géotextile se présentant sous forme d'une feuille manufacturée, constituée d'une voile ou d'une nappe de fibre, orientée selon une direction ou distribuée aléatoirement, et dont la liaison peut être de différents types :

- **La liaison mécanique** : est faite par entrelacement des fibres, à partir d'une série d'aiguilles qui s'enfoncent dans la nappe qui défile (non tissé aiguilles).
- **La liaison chimique** : est réalisée soit à l'aide de résines soit d'émulsions qui appartiennent à des décomposées proches des caoutchoucs naturels.
- **La liaison thermique** : est faite par calandrage (effets conjugués de la chaleur et de la pression) entre deux rouleaux presseurs chauffants. On obtient une fusion partielle des points de contacts des fibres (non tissé thermo soudé).

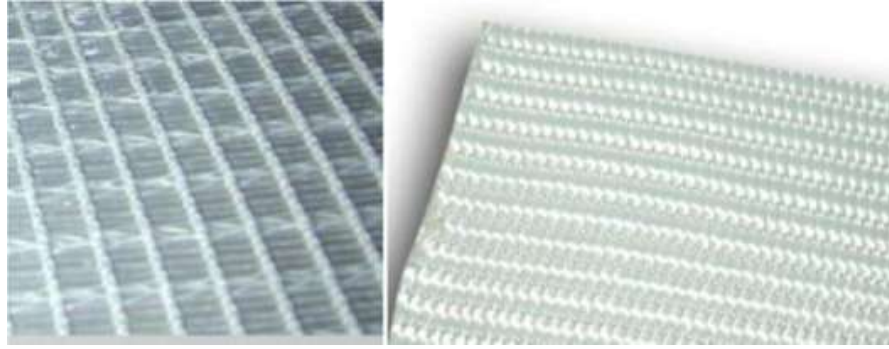


Figure III. 1: Géotextile non tissé [7].

**b. Géotextile tissé :**

Les tissés sont soit des tissés de fils mono filaments, soit des tissés de fils multifilaments dont chaque fil est constitué de plusieurs brins élémentaires soit des tissés de bandelettes de films extrudés à base de polyéthylène, ou de polypropylène. Le tissage permet d'obtenir un module de traction élevé, une faible déformabilité et une régularité des pores intéressante sur le plan hydraulique cependant il entraîne une anisotropie en plan.

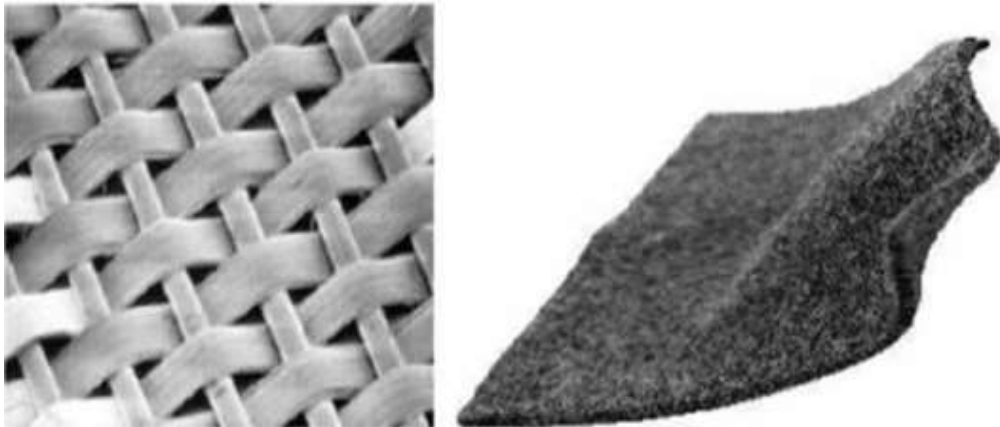


Figure III. 2: Géotextile tissé [7].

**c. Géotextile tricoté :**

C'est un géotextile produit par assemblage de deux nappes de fils parallèles au moyen d'un fil de liaison, de façon à obtenir la répartition géométrique désirée.

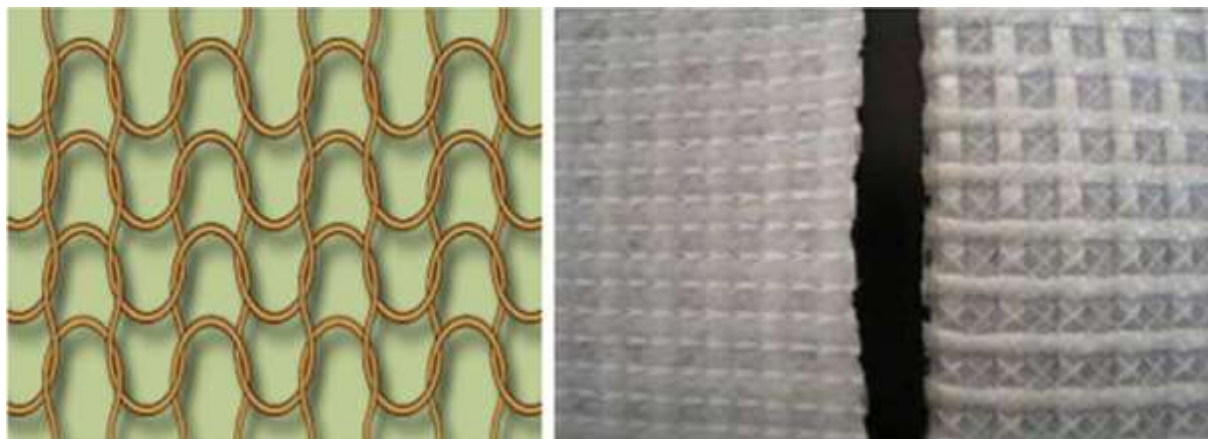


Figure III. 3: Géotextile tricoté [7].

**d. Géotextile tube (géo-tuyaux) :**

C'est un géotextile en forme de tube tissé sur un métier circulaire. L'emploi d'un géotextile tube présente des avantages pour les fondations sur colonnes ballastées, et sont couramment utilisé en installation de stockage de déchet.

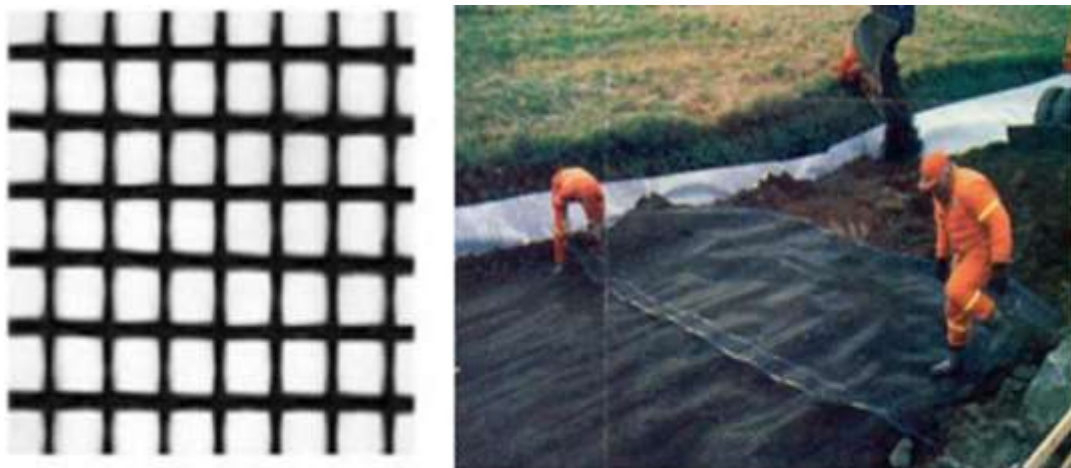


Figure III. 4: à gauche la forme du géo-tuyaux, à droite la mise en œuvre de géo-tuyaux [7].

**III.3.2. Géo-grille**

C'est une structure plane, à base de polymère, constituée par un ouvert d'éléments résistants à la traction, reliés entre eux selon un motif régulier, dont les ouvertures sont des dimensions supérieures à celle des constituants. Elles sont utilisées en contact avec le sol pour renforcer les fondations, emblais...etc. Elles sont disponibles avec différentes résistances à la traction (entre 20 kN/m et 1000 kN/m) et différentes ouvertures de maille. Les caractéristiques de traction et d'allongement des géo-grilles ne varient que faiblement sous des variations importantes de température et sous des contraintes permanentes. Elles sont faciles à manier

et à mettre en œuvre, car elles peuvent être déroulées et pliées. Elles peuvent être facilement découpées aux dimensions voulues et n'ont pas de bord coupant entraîné des blessures.



**Figure III. 5:** à gauche la structure de géo-grille, à droite la mise en place du géo-grille [7].

Il y a deux types de géo-grilles : uni-axiale et bi-axiale

**a. Géo-grille uni-axiale :**

La résistance à la traction est plus importante dans un sens (longitudinal ou transversal) que dans l'autre sens.

**b. Géo-grille bi-axiale :**

La résistance à la traction est sensiblement équivalente dans le sens longitudinal et transversal.

### **III.3.3. Géo-filet**

C'est un géo-synthétique constitué d'ensemble de tiges parallèles et superposés entièrement reliés à d'autres ensembles similaires selon des angles variables. Dans le cas d'un géo-filet le liage est constitué par des nœuds, les filets sont toujours souples, alors que les grilles sont généralement rigides.





Figure III. 6: à gauche un modèle de géo-filet, à droite un géo-filet dans un merlon [7].

### III.3.4. Géo-composite

Un géo-composite est un assemblage manufacturé de matériaux dont au moins l'un des composants est un produit géo-synthétique, par exemple une géo-grille complexée avec un géotextile non-tissé. Il peut être utilisé, soit en géotechnique (fonction de séparation et renforcement), soit pour les couches de roulement. Les géo composites empêchent dans le même temps l'apparition de fissures et l'élargissement de celles existantes. Ceci grâce à leur capacité d'absorption des forces de cisaillement. Les géo-composites permettent également de renforcer les enrobés, non seulement en travaux neufs, mais aussi en entretien et réparation, La limitation de l'apparition et de l'élargissement des fissures augmente de ce fait la durée de vie des chaussées.



Figure III. 7: La structure d'un géo-composite [7].

### III.3.5. Géo-membranes

Ce sont des feuilles étanches, souples, minces et continues, fabriquées à partir de produits synthétiques ou bitumineux, La principale application des géo-membranes est donc de constituer une barrière étanche soit entre un sol et un fluide, soit entre un sol et un gaz, et sont utilisés pour l'installation de stockage de déchets.



Figure III. 8: Géo-membrane à gauche leur forme, et à droite leur mise en place [7].

### III.3.5. Géo-synthétique alvéolaire

Sont relativement épais, étant constitués de réseaux tridimensionnels réalisés à partir de feuilles de polymères découpées en bandes. Les bandes sont jointes entre elles pour former des cellules interconnectées qui sont remplies de sol et parfois de béton. Dans certains cas des bandes de grilles polyoléfiniques larges de 0,5 m à 1 m ont été attachées ensemble avec des barres en polymères verticales et utilisées pour former des couches épaisses des géo-synthétiques alvéolaires appelées géo-matelas.



Figure III. 9: à gauche la forme d'un géo-synthétique alvéolaire, à droite placement d'une nappe [7].

### a. Tissé de bandelette :

C'est une sorte de tissu résultant de l'entrecroisement de bandelette. Ces produits sont surtout employés comme renforcement et protection contre l'érosion.

### b. Mattes :

Elles sont constituées de fils relativement rigides, liées thermiquement à leurs intersections, créant des structures (tridimensionnelles) très ouvertes.

### c. Géo-conteneurs :

Ils sont des géo-synthétiques à structure tridimensionnelle alvéolaire. Ils sont principalement utilisés jusqu'à présent pour la protection de talus contre l'érosion ou pour la construction de remblais de forte pente ou allégés. De nouvelles applications se présentent pour ces procédés tels que le renforcement de chaussées, la protection de cuves de gaz ou bien la réalisation de mur en sol renforcé.

### III.3.6. Géo-synthétiques bentonitiques

Sont des géo-composites préfabriqués avec une couche de bentonite incorporée de façon typique entre un géotextile supérieur et un géotextile inférieur ou collée à une géo-membrane ou une couche unique de géotextile. Les géo-synthétiques bentonitiques (GSB) à base de géotextiles sont souvent cousus ou aiguilletés à travers le cœur de bentonite pour augmenter la résistance au cisaillement interne. Lorsqu'ils sont hydratés, ils sont efficaces comme barrière aux liquides et gaz et sont communément utilisés dans les étanchéités de décharges, souvent en association avec une géo-membrane



Figure III. 10: Géo-synthétique bentonitique [7].

### **III.4. Caractéristiques des géo-synthétiques**

Les géo-synthétiques sont définies par des caractéristiques physiques, mécaniques et hydrauliques, selon des essais normalisés, identifiés par des normes internationales de type ISO, Européenne de type EN, Française de type NF, DIN, ASTM, ou Algériennes (CNERIB, IANOR, etc.).

#### **Les caractéristiques physiques sont :**

- L'Épaisseur ;
- La masse surfacique ;
- Le type de fabrication (tissé non tissé, tricoté, géogrid, etc....) ;
- Le type de polymère (polypropylène, polyéthylène, polystyrène, ...)
- Le taux de noir de carbone selon la norme ASTM D 1603 ;
- La densité ;
- La stabilité dimensionnelle selon la norme ASTM 1204 (pour les géo-membranes).

#### **Les caractéristiques mécaniques sont :**

- La résistance à la rupture ;
- L'allongement à la rupture ;
- Le poinçonnement ;
- La perforation dynamique ;
- Le fluage ;
- La résistance au seuil d'écoulement pour les géo-membranes ;
- La résistance à la déchirure ;
- La résistance à la fissuration.
- etc...

#### **Les caractéristiques hydrauliques sont :**

- La perméabilité normale au plan (norme ISO 11038) ;
- La capacité d'écoulement dans le plan selon la norme ISO 12958 ;
- L'ouverture de filtration selon la norme 12956.

Le tableau suivant présente quelques caractéristiques de trois types des géo-synthétiques :

**Tableau III. 1: Caractéristiques de quelques géo-synthétiques [7]**

| Caractéristiques                  | unité            | Géomembrane |       | Géotextile |      | Géogrille |     |
|-----------------------------------|------------------|-------------|-------|------------|------|-----------|-----|
|                                   |                  | min         | max   | min        | max  | min       | max |
| Epaisseur                         | mm               | 1,5         | 1,59  | 0,7        | 1,6  | 0,6       | 0,9 |
| Masse surfacique                  | g/m <sup>2</sup> | 1380        | 1463  | 150        | 380  | 125       | 380 |
| Masse volumique                   | g/m <sup>3</sup> | 0,939       | 0,953 | -          | -    | -         | -   |
| Taux de noire de carbone          | %                | 2           | 3     | -          | > 2  | 2         | 4   |
| Résistance à la traction          | kN/m             | -           | -     | 8,1        | 30,1 | 12        | 19  |
| Déformation à l'effort parallèle  | %                | 16,7        | 18,5  | 50         | 55   | 24        | 28  |
| Résistance au seuil d'écoulement  | kN/m             | 13          | 15    | 0,67       | 1,5  | -         | -   |
| Déformation au seuil d'écoulement | kN/m             | 10          | 11,8  | 0,4        | 1,4  | -         | -   |
| Perméabilité normal au plan       | mm/s             | impermeable |       |            | 80   | 105       | 250 |
| Ouverture de filtration           | µm               | -           | -     | 70         | 90   | 400       | 540 |

### **III.5. Les principales fonctions des géo-synthétiques**

#### **a. La séparation (ou anticontamination) :**

C'est la prévention contre le mélange de deux sols ou matériaux de remplissages adjacents de nature différente par l'emploi d'un géotextile ou d'un produit apparenté.

#### **b. La filtration :**

C'est le maintien du sol ou d'autres particules soumis à des forces hydrauliques, tout en permettant le passage de fluides à travers un géotextiles ou produit apparenté.

#### **c. Le drainage :**

C'est la collecte et le transport de fluides dans le plan d'un géotextile ou produit apparenté.

#### **d. Le renforcement :**

C'est l'utilisation de la capacité de résistance d'un géotextile ou d'un produit apparenté à des fins d'amélioration des propriétés mécaniques du sol ou d'autres matériaux de construction. Ce rôle donne lieu à des gains dans les contraintes et déformations.

### e. L'Étanchéité :

Elle permet de contrôler la migration des liquides ou des gaz. Elle joue la fonction de barrière, comme le cas d'étanchéité d'un bassin ou d'une décharge publique.

### f. La lutte contre l'érosion des surfaces :

Afin d'éviter les mouvements des terres et des sols ou d'autres particules et plus particulièrement les surfaces inclinées, on utilise la géotextile ou produits apparentés.

## **III.6. Application des géo-synthétiques en Algérie**

Les premières applications des géo-Synthétiques en Algérie, furent en 2004, à l'aérodrome national de Djanet, sur la piste réhabilitée 'renforcée', après avoir observé la remontée des fissures (dus aux gradients thermiques avoisinant les 35°).

Cette technique s'est propagée à d'autres infrastructures linéaires :

- Piste d'aérodrome de Sétif en 2005 ;
- Remplissage des cavités à la piste principale de l'aérodrome d'Oran en 2006 ;
- Renforcement de l'aérodrome d'Adrar en 2009 ;
- Renforcement de l'aérodrome d'Ouargla en 2011 ;
- Elargissement et réhabilitation de aires de stationnement et de voie taxiway (aérodrome Houari Boumediène/Alger) en 2014 ;
- Les diverses applications de drainage, des talus, des remblais d'accès entre 2010 et 2020.

## **III.7. Renforcement des chaussées par géo-grille**

### **III.7.1. Principe de renforcement**

Renforcer signifie créer une structure de sol ayant des propriétés améliorées, composée d'un sol qui a généralement une résistance à la traction quasiment nulle, mais qui résiste à la compression, et d'un géotextile qui a une bonne résistance à la traction. [8]

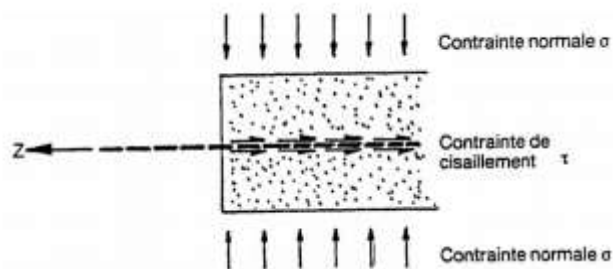


Figure III. 11: Renforcement par géotextille.

### III.7.2. Mécanismes de renforcement [9]

Le but de ce paragraphe est de décrire l'état des connaissances concernant les mécanismes par lesquels les géosynthétiques fournissent le renforcement de la couche de base (ou couche de fondation) des chaussées souples.

Le renforcement des chaussées par du géosynthétique, a été expliqué comme on le détaillera ci-après, à travers trois mécanismes connus à ce jour et qui sont :

- a. Mécanisme de confinement (autoblocage) latéral de la couche de base ;
- b. Mécanisme de surface de rupture par cisaillement modifiée ;
- c. Mécanisme de membrane tendue.

#### a. Mécanisme de Confinement (autoblocage) latéral de la couche de base

C'est le mécanisme principal de renforcement attribué aux géosynthétiques (notamment les géo-grilles) dans les routes revêtues ou non revêtues

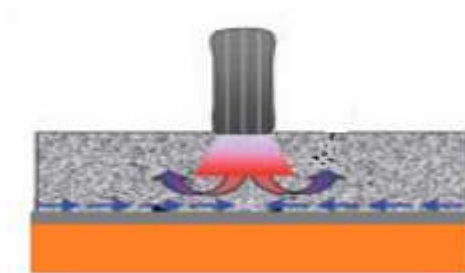


Figure III. 12: Mécanisme de Confinement (autoblocage) latéral de la couche de base.

En 1999, Perkins attribut quatre avantages au confinement du matériau de couche de base pour les routes revêtues et Giroud et Han (2004), confirment que ces quatre avantages existent également pour les routes non revêtues :

1. Empêchement de l'étalement latéral de l'agrégat de la base :

Sous l'action des charges de trafic les deux matériaux ont tendance à se déplacer latéralement sauf s'ils sont retenus par le géosynthétique alors les deux matériaux sont

cisaillés sur leur interface. L'interaction entre le sol et le géosynthétique permet le transfert de la charge de cisaillement du sol vers une contrainte de traction dans le géosynthétique, donc la rigidité de traction du géosynthétique limite les tensions latérales dans le sol.

#### 2. Augmentation de la rigidité de l'agrégat de la couche de base :

La contrainte de cisaillement développée entre l'agrégat de la couche de base et le géosynthétique permet une augmentation de la contrainte de confinement latéral dans la base. Les matériaux granulaires montrent, généralement, une augmentation du module élastique avec une contrainte de confinement accrue. Un deuxième mécanisme de renforcement de la base résulte d'une augmentation de la rigidité de l'agrégat de la couche de base, quand une interaction adéquate se développe entre la base et le géosynthétique.

#### 3. Amélioration de la distribution verticale des contraintes sur le sol de fondation

En général, la contrainte verticale dans le sol de fondation directement sous le géosynthétique et sous la charge d'application devrait diminuer à mesure que la rigidité de la couche de base augmente. Ce confinement des agrégats aussi augmente la résistance et le module, phénomène qui à son tour fait diminuer la contrainte de compression sur l'infrastructure et répartissant mieux la charge sous la pression des roues, signifiant que la déformation à la surface sera plus faible et plus uniforme

#### 4. Réduction des contraintes de cisaillement dans le sol de fondation :

On s'attend à ce que la déformation de cisaillement transmise de la couche de base au sol de fondation diminue, puisque, le cisaillement de la base transmet des efforts de tension au renforcement

Dans les routes non renforcées, si la contrainte verticale sur la fondation dépasse la limite élastique du sol, une partie limitée ou cisaillement ' local ' permanent se produit et se développe. Le renforcement adéquat entre la couche de base et le sol de fondation empêche le développement et la croissance des zones locales de cisaillement et permet au sol de fondation de supporter des contraintes proches de la limite de plasticité tout en agissant comme si, il est toujours dans sa limite d'élasticité (Giroud et Noiray 1981). Il est important de comprendre que les contraintes de cisaillement transmises de la couche de base au sol de fondation peuvent être orientées à l'extérieur ou vers l'intérieur. Selon un résultat classique de la théorie de plasticité, les contraintes de cisaillement centrifuges diminuent la capacité portante du sol de fondation tandis que les contraintes de cisaillement centripètes augmentent la capacité portante du sol de fondation. Les contraintes de cisaillement induites par les



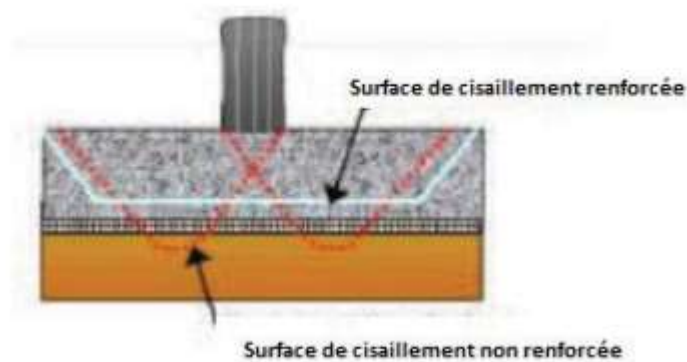
charges des véhicules dans les chaussées non renforcées, tendent à être orientées vers l'extérieur, ce qui diminue la capacité portante du sol de fondation

Giroud et Han (2004a) soulignent que l'enchevêtrement entre la géo-grille et l'agrégat de la couche de base (figure 3.1) a notamment pour conséquence, deux effets bénéfiques :

- Le mouvement latéral de l'agrégat de la couche de base est réduit ou éliminé et, en conséquence, aucune contrainte de cisaillement centrifuge n'est transmise au sol de fondation ;
- La surface inférieure de la couche de base, dont l'agrégat confiné frotte à travers les ouvertures de la géogrille, fournit une surface rugueuse qui résiste au mouvement latéral du sol de fondation, ce qui génère des contraintes de cisaillement centripètes qui augmentent la capacité portante du sol de fondation. Aussi, moins de déformation de cisaillement, couplée à une contrainte verticale moindre, a comme conséquence, un état moins grave de chargement (Houlsby et Jewell, 1990), menant à abaisser la déformation verticale dans le sol de fondation.

#### **b. Mécanisme de surface de rupture modifiée et Augmentation de la capacité portante**

Le renfort de géosynthétique force la surface de rupture potentielle à suivre un chemin plus haut alternatif. Ceci tend à augmenter la capacité portante de la chaussée



**Figure III. 13: Surface de Rupture Modifiée et Augmentation de la capacité portante**

#### **a. Mécanisme de Membrane Tendue**

L'effet de membrane est le mécanisme principal de renforcement attribué aux géosynthétiques (notamment les Alvéolaires) dans les routes revêtues ou non revêtues. Ce mécanisme a été à l'origine décrit par Bender et Barenberg (1978). Il agit efficacement lorsqu'un géotextile est posé sur un sol déformable et que des charges verticales sont

appliquées. L'effort de traction dans le sol se transmet au géotextile, soulageant le sous-sol incapable de l'absorber. Cette force dans le plan s'équilibre avec la composante horizontale de la charge provenant de la diffusion des charges verticales appliquées (Problème plan et charge uniforme). Cet effet revêt donc une grande importance dans la construction de routes provisoires, où il permet de déduire la formation d'ornières de manière considérable. Plus le module initial du géotextile n'est élevé, plus la possibilité de réduire la formation d'ornières est grande

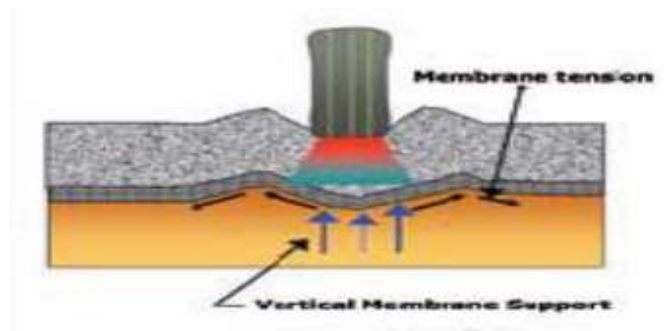


Figure III. 14: Comportement en membrane.

### **III.8. Conclusion**

Pour conclure, ce chapitre nous a donné quelques informations sur les produits géosynthétiques, leurs différents types, fonctions et domaines d'application qui est très vaste et toujours en progrès grâce aux nombreux travaux de recherche menés ces dernières années. Donc il est devenu nécessaire d'intégrer l'utilisation des produits géosynthétiques dans le domaine du génie civil en Algérie, car ils représentent une solution très efficace qui peut résoudre de très nombreuses problématiques, et en même temps offrent d'autres avantages notamment le gain de temps, la réduction des coûts de construction, ainsi que la protection des ressources naturelles et de l'environnement. Comme est déjà évoqué dans ce chapitre les matériaux utilisés dans la fabrication des géosynthétiques sont principalement des polymères synthétiques généralement dérivés du pétrole brut et notre pays est producteur du pétrole. Alors pourquoi ne pas profiter de ces produits par exemple dans la stabilisation et le renforcement des corps de chaussée pour diminuer leur dégradation.

# **CHAPITRE IV**

## **Méthodes d'analyse et calcul du renforcement de chaussées**

### **IV.1. Introduction**

L'évolution de la technologie amène l'ingénieur à réaliser des projets de plus en plus complexes, coûteux et soumis à des contraintes de sécurité de plus en plus sévères. Pour réaliser ces projets et vu la complexité des méthodes analytiques de la résistance des matériaux, l'ingénieur a recours aux méthodes qui lui permettent de simuler le comportement des systèmes physiques complexes. La méthode des éléments finis est devenue éventuellement la plus performante des méthodes numériques vu son grand champ d'application où elle est utilisée dans de nombreux secteurs de l'industrie : aérospatiale, nucléaire, génie civile, construction navale, mécanique, technique off-shore, ... etc. [10]

### **IV.2. Méthode des éléments finis**

#### **IV.2.1. Définition**

La méthode des éléments finis est l'une des méthodes les plus utilisées aujourd'hui pour résoudre effectivement ces équations. Elle nécessite l'utilisation intensive de l'ordinateur. C'est une méthode très générale qui s'applique à la majorité des problèmes rencontrés dans la pratique : problèmes stationnaires ou non stationnaires, linéaires ou non linéaires, définis dans un domaine géométrique quelconque à une, deux ou trois dimensions. De plus elle s'adapte très bien aux milieux hétérogènes souvent rencontrés dans la pratique par l'ingénieur.

#### **IV.2.2. Historique de la méthode des éléments finis (MEF)**

L'historique de la méthode des éléments finis a commencé en 1819 quand NAVIER définit une méthode d'étude des systèmes hyperstatiques basés sur l'application des conditions d'équilibre et de compatibilité, puis MAXWELL en 1864 et CASTINGLIANO en 1878 établissent d'une façon complète les théorèmes de l'énergie. Au début de 20<sup>ème</sup> siècle des résultats fondamentaux dans le domaine des méthodes d'approximation en ont établi les bases en effectuant une discrétisation spatiale du domaine tout en utilisant les méthodes d'approximations variationnelles.

En 1955 ARGYRIS présente une méthode unifiée des méthodes de déplacements et des forces, l'année suivante TURNER et CLOUGH publient une présentation systématique de la méthode des déplacements. Ces deux publications sont particulièrement importantes et présentent véritablement le début de la MEF comme technique de calcul des structures complexes.

**IV.2.3. Principes de la méthode des éléments finis**

La MEF consiste à remplacer la structure physique à étudier par un nombre fini d'éléments ou de composants discrets qui représentent un maillage. Ces éléments sont liés entre eux par un nombre de points appelés nœuds. On considère d'abord le comportement de chaque partie indépendante, puis on assemble ces parties de telle sorte qu'on assure l'équilibre des forces et la compatibilité des déplacements réels de la structure en tant qu'objet continu.

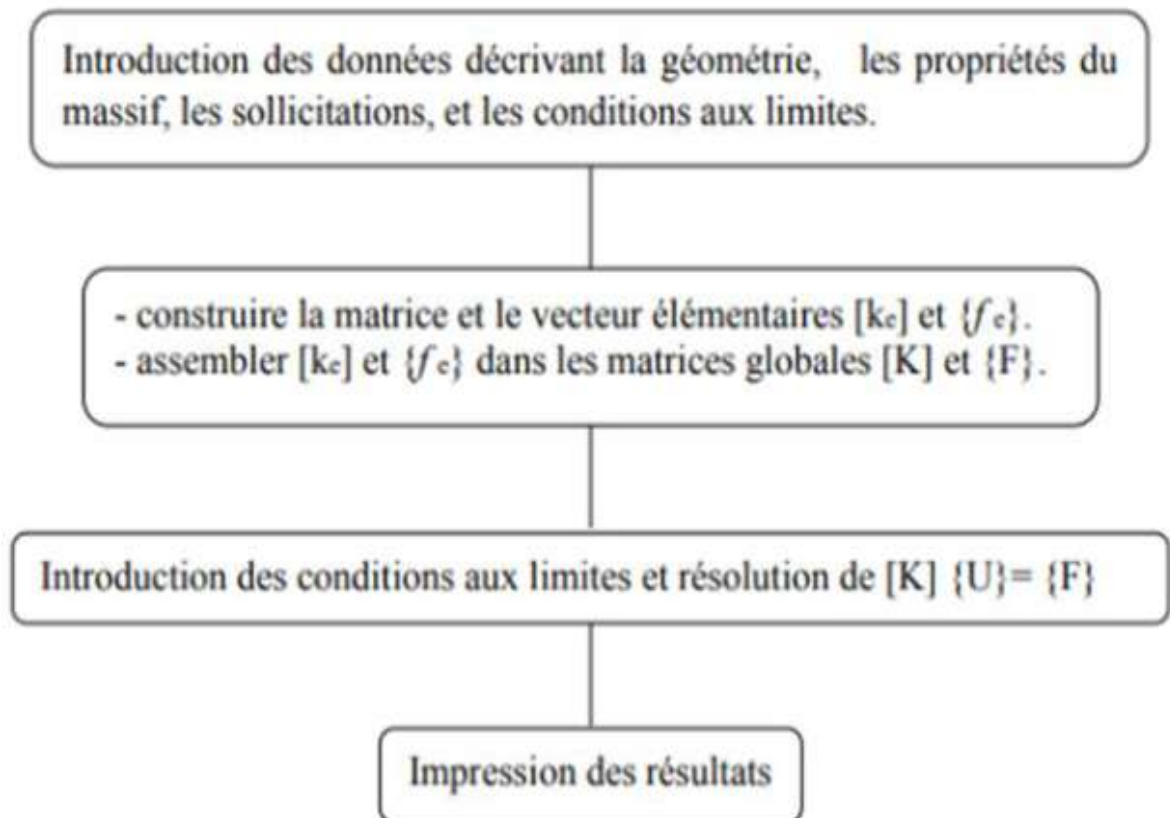
La MEF est extrêmement puissante puisqu'elle permet d'étudier correctement des structures continues ayant des propriétés géométriques et des conditions de charges compliquées. Elle nécessite un grand nombre de calculs qui, à cause de leur nature répétitive, s'adaptent parfaitement à la programmation numérique.

L'analyse de type éléments finis d'une structure sol-géo synthétiques peut notamment comporter les étapes suivantes :

- la définition des conditions aux limites,
- le choix de la relation déformations-contraintes des matériaux utilisés,
- les caractéristiques mécaniques des interfaces,
- la définition des chargements,

Le tableau suivant résume les parties de base du programme d'ordinateur pour la résolution complète d'un problème par la méthode des éléments finis

**Tableau IV. 1: Organigramme d'étapes caractéristiques d'un programme d'éléments finis.**



### **IV.3. Présentation générale sur le logiciel Alizé-LCPC**

LIZE-LCPC est un logiciel de calcul des structures des chaussées. Ces chaussées peuvent être routières, portuaires, logistiques ou aéronautiques.

Les fonctionnalités permettent le dimensionnement des chaussées neuves dans le contexte français (NF P98-086) mais aussi de reprendre des projets réalisés suivant les contextes anciens (Guide 1994 ou Catalogue 1998).

Le logiciel ALIZE-LCPC est aussi ouvert à la saisie de matériaux et de contextes de vérification hors cadre, comme ceux des projets en Afrique ou sous d'autres latitudes.

ALIZE-LCPC est un logiciel développé par l'IFSTTAR. Itech en assure la distribution, le support technique et la formation depuis 2003.

L'option Aéronautique du logiciel a été développée avec le support du STAC qui en est copropriétaire. [11]

**IV.3.1. Documents de référence de logiciel Alizé-LCPC v1.3**

Les documents de référence à consulter pour une présentation approfondie de la méthode de dimensionnement française sont :

Le guide technique Conception et dimensionnement des structures de chaussées, Lcpc-Sétra 1994 (guide Cdsc), qui présente dans le détail les principes du dimensionnement rationnel des chaussées ; le Catalogue des structures types de chaussée neuves, Lcpc-Sétra 1998, et le guide technique Spécification des variantes, Sétra 2003. Ces deux documents décrivent les modalités d'application du dimensionnement rationnel aux structures de chaussées du réseau routier national français. [11]

**IV.3.2. Architecture générale d'Alizé-Lcpc v1.3**

L'architecture générale d'Alizé-Lcpc a été conçue pour faciliter autant que faire se peut la mise en œuvre de la méthode rationnelle. Cet objectif conduit par une démarche logique, à articuler le programme autour des huit fonctionnalités suivantes

- définition de la structure de chaussée ;
- définition du chargement appliqué à la surface (charge de référence ou autre chargement désigné par chargement spécial) ;
- réalisation du calcul mécanique à l'aide du moteur de calcul Alizé ;
- présentation des résultats du calcul mécanique ;
- détermination des sollicitations admissibles par les matériaux en fonction du trafic ;
- assistance et aide pour le choix pratique des hypothèses de calcul et des valeurs numériques à donner aux différents paramètres, en accord avec le Guide technique Cdsc et/ou le Catalogue des structures 1998 ;
- gestion d'une bibliothèque de matériaux standard et utilisateur ;
- vérification au gel-dégel des chaussées. La version 1.3 de Alizé-Lcpc n'intègre pas cette dernière fonctionnalité faisant l'objet d'un module spécifique dans le logiciel.

[11]

**IV.3.3. Configuration informatique requise, protection contre le piratage**

Alizé-Lcpc doit être installé sur micro-ordinateur de type PC, fonctionnant sous un système d'exploitation Windows 32 bits (version Windows 95 et au-delà). Il permet une installation mono-poste ou réseau.

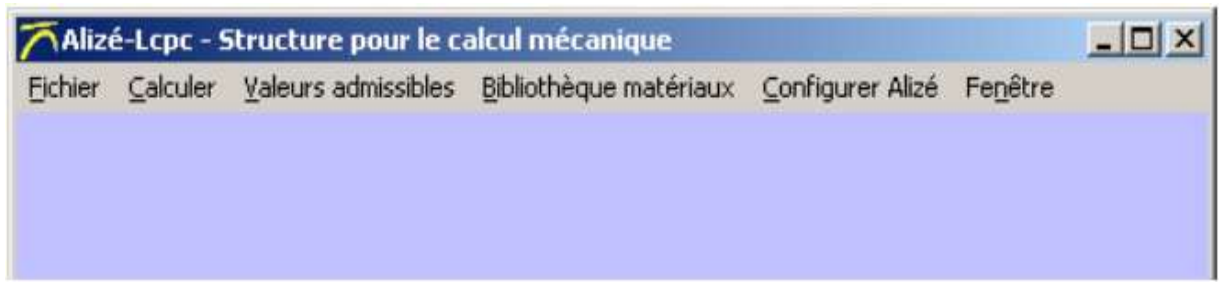
La configuration minimale requise est la suivante : type : PC Pentium MMX 200 Mhz, RAM 128 Mo, disque dur 20 Giga octets.

La protection d'Alizé-Lcpc vis à vis du piratage est réalisée par une clef physique mono-poste ou réseau, fournie avec le logiciel. La clef de protection doit obligatoirement être installée sur le port parallèle du micro-ordinateur (installation individuelle) ou du poste serveur (installation sur un réseau), préalablement à toute utilisation du logiciel. [11]

### **IV.4. Lancement du programme Alizé-Lcpc v1.03**

#### **IV.4.1. Démarrage de l'application**

Le lancement du programme s'effectue par double click sur l'icône de Alizé-Lcpc affichée sur le bureau de l'ordinateur PC à l'issue de l'installation du logiciel. Le programme s'ouvre sur sa feuille principale qui se limite alors à la barre de menu principal assurant la gestion des différentes fonctionnalités offertes par le logiciel. [11]



**Figure IV. 1: Barre de menu principal de Alizé-Lcpc.**

#### **IV.4.2. Configuration d'Alizé-Lcpc v1.03**

A la première utilisation d'Alizé-Lcpc, il est recommandé de procéder à la configuration du programme, à l'aide de la commande Configurer Alizé de la barre de menu principal. Dans la version 1.03 du logiciel, la configuration se limite à la définition de la charge de référence pour les calculs mécaniques, les autres options de configuration suivantes sont imposées :

- unités : m, MN et unités associées. En particulier, les modules d'Young et les pressions s'expriment donc en Mpa ;
- conventions de signes :
  - extensions et tractions comptées négativement (résultats des calculs mécaniques),
  - déflexion comptée positivement dans le sens de la gravité,



- valeurs admissibles exprimées positivement ;

- langage : français.

#### **IV.5. Préparation des données : la structure de chaussée**

##### **IV.5.1. Principe de modélisation de la structure de chaussée**

La modélisation de la chaussée selon la démarche du dimensionnement rationnel s'appuie sur la représentation de la structure par un massif multicouche à comportement élastique, isotrope et linéaire.

Les différentes couches de matériau constituant la structure possèdent une épaisseur constante, et leur extension dans le plan horizontal XoY est infinie. De plus, l'extension selon la direction verticale ZZ de la couche inférieure du massif multicouche, représentant en général le substratum ou le sol support, est supposée infinie. La description du fonctionnement mécanique des différentes couches constituant la chaussée se ramène finalement aux paramètres suivants :

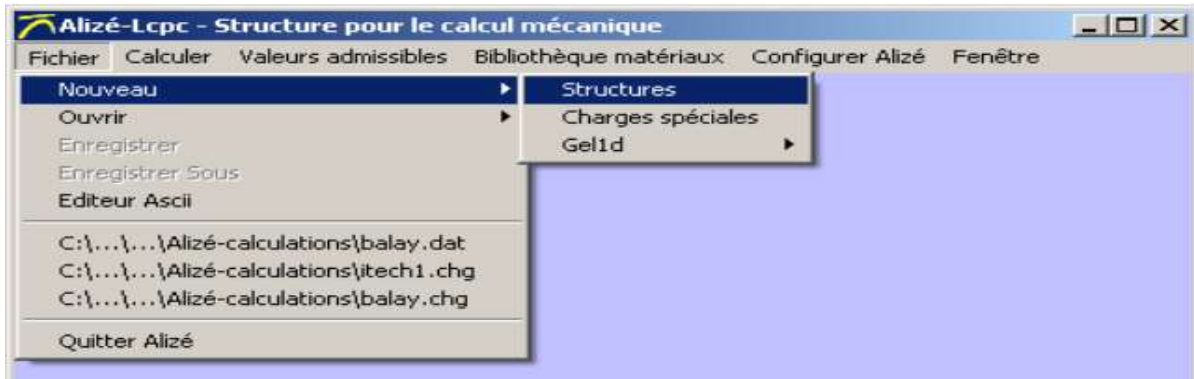
- l'épaisseur H ;
- le module d'Young E du matériau ;
- le coefficient de Poisson  $\nu$  du matériau (noté Nu dans Alizé-Lcpc) ;
- les conditions d'interface au sommet et à la base de la couche, avec les couches adjacentes.

Le modèle prévoit que trois types de contact possible pour caractériser le fonctionnement de l'interface entre couches adjacentes : collée, ou glissante, ou enfin semi-collé (par commodité de traitement). [11]

##### **IV.5.2. Créer et modifier les données « Structures »**

En utilisation courante, les données nécessaires à la réalisation des calculs sont consignées dans des fichiers de données gérés par la commande Fichier de la barre de menu principal. La commande Fichier gère à la fois les fichiers de données Structure, et les fichiers de données Chargement spécial.

La création d'une nouvelle structure de chaussée est initiée par la commande Fichier/nouveau/structure.



**Figure IV. 2: Commande pour la création d'une nouvelle structure de calcul.**

Une structure de base de type 3-couches est alors initialisée dans la fenêtre principale. En fonction de la structure de chaussée visée par l'étude en cours, l'utilisateur doit alors faire évoluer cette structure modèle de base et renseigner les différents champs de valeurs qui définissent son comportement mécanique. [11]

Il dispose à cet effet des commandes, fonctions et aides suivantes :

| <b>Action à réaliser</b>   | <b>Bouton ou cellule à actionner</b>  |
|--|---|
| ajouter une couche   | «Ajouter 1 couche»  |
| supprimer une couche   | «Supprimer 1 couche»  |
| définir la nature d'une interface  | cellule «collé» ou «1/2collé» ou «glissante» à gauche de l'interface concernée                |
| définir les paramètres H (épaisseur), E (module d'Young) et Nu (coefficient de Poisson des différentes couches | pour chaque matériau : cellule H, E et Nu   |
| utiliser la bibliothèque des matériaux standards   | cellule «autre» ou matériau «xxx» de la colonne matériau type à droite de la couche concernée |
| modifier les niveaux de calcul   | «Modifier les niveaux»  |
| gérer les variantes de calcul  | «Voir/gérer les variantes»  |
| consulter l'aide Interface   | «Nature des interfaces»   |
| consulter l'aide Epaisseurs technologiques minimales et maximales des couches                                  | «Epaisseurs mini-maxi»  |

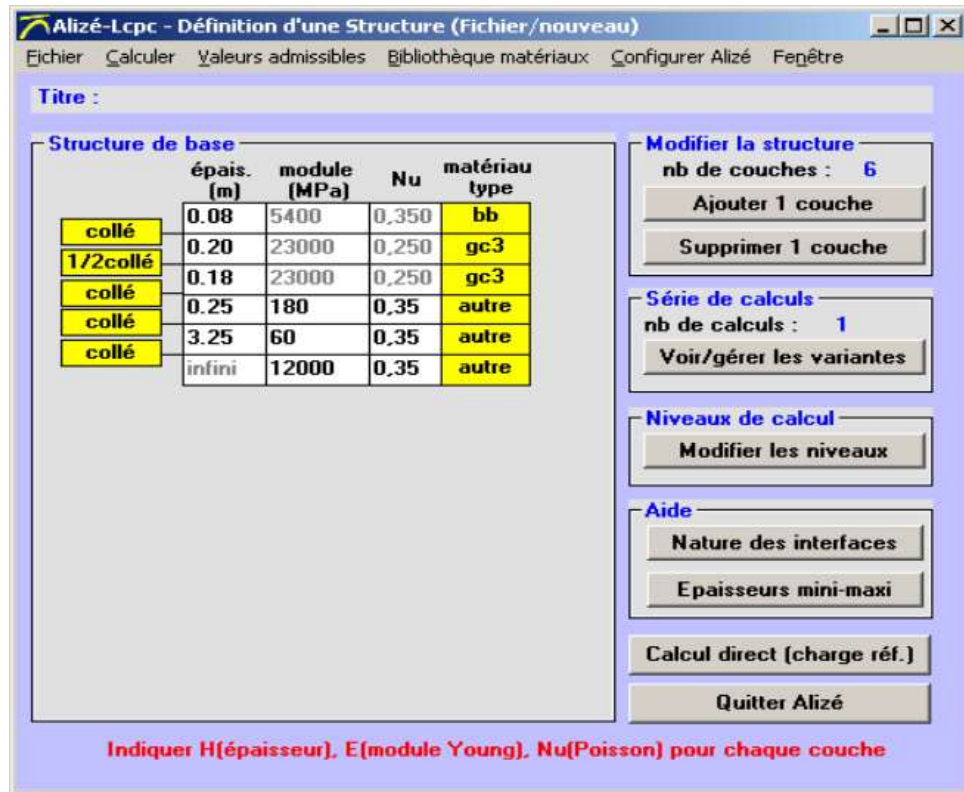


Figure IV. 3: Exemple de structure de chaussée.

### IV.5.3. Enregistrement et lecture des fichiers de données

Lorsqu'une structure de chaussée a été complètement définie et avant de poursuivre dans l'utilisation du logiciel, il est recommandé de sauvegarder l'ensemble des données relatives à cette structure. La sauvegarde s'effectue par la commande Fichier/Enregistrer sous de la barre de menu principal.

L'opération d'enregistrement sur fichier est assurée classiquement par une boîte de dialogue au standard Windows.

Les commandes Fichier/Ouvrir et Fichier/Enregistrer sont également au standard Windows. Elles permettent quant à elles la lecture et l'enregistrement de fichiers de structures préalablement définis. [11]

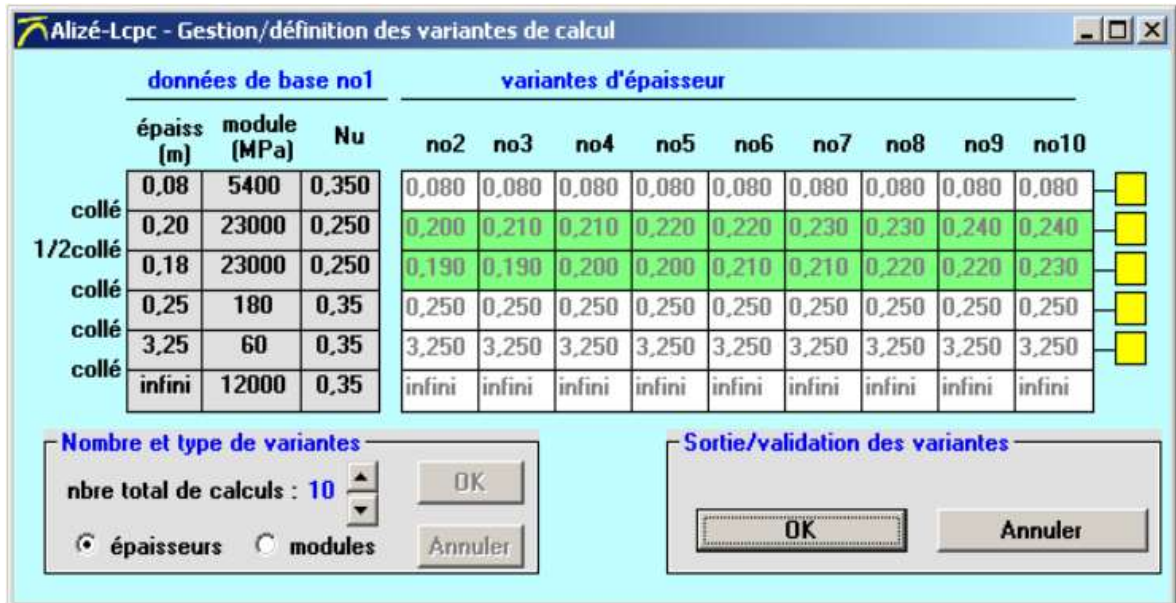


Figure IV. 4: Définition des variantes de calcul, exemple.

#### IV.6. Préparation des données : Le chargement du Modèle

##### IV.6.1. Définition de la charge de référence

La définition de la charge de référence est réalisée dans Alizé-Lcpc par la commande Configurer Alizé/Charge de référence de la barre de menu principal. La charge de référence définie ici sera mémorisée par le logiciel pour les utilisations futures, jusqu'à ce qu'une charge de référence différente soit éventuellement fixée. [11]

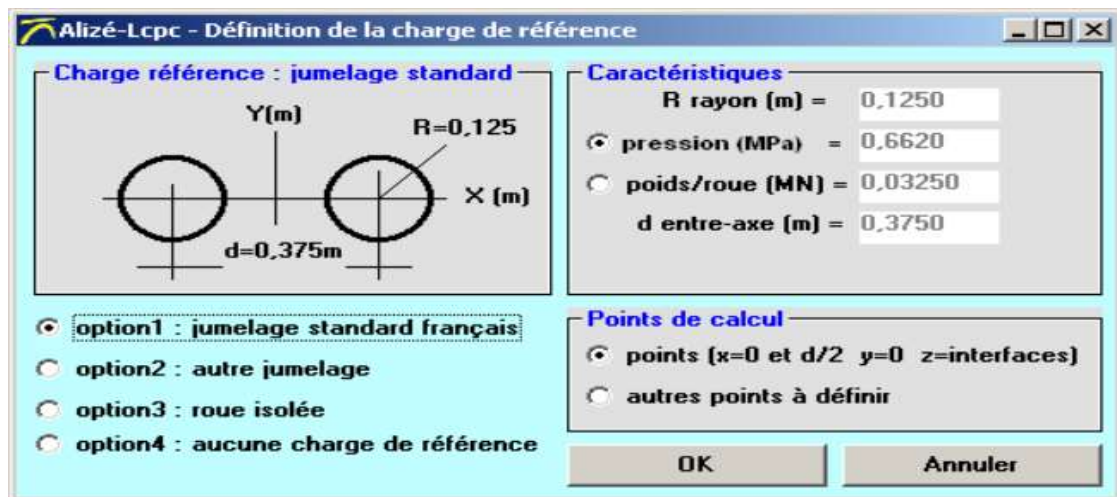


Figure IV. 5: Configuration d'Alizé, définition de la charge de référence.

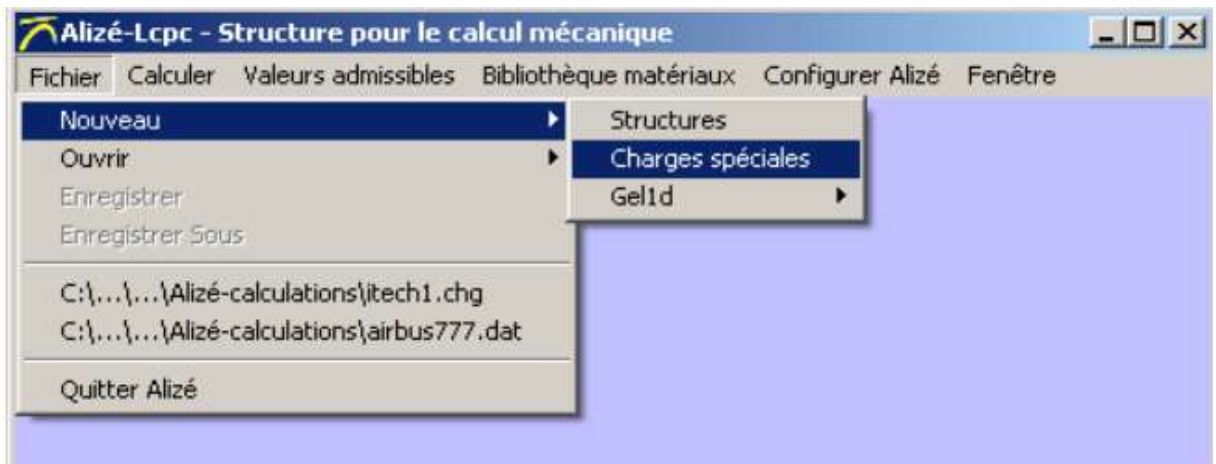
## **IV.6.2. Définition des charges spéciales**

### **IV.6.2.1. Caractéristiques du chargement spécial**

Une charge spéciale est constituée d'un ensemble de charges unitaires, circulaires verticales, appliquées à la surface de la chaussée. Le nombre de charges isolées constituant ce chargement complet peut varier entre 1 et 1000. Les caractéristiques des charges (rayon, poids et pression) peuvent varier d'une charge isolée à l'autre. [11]

### **IV.6.2.2. Profils verticaux de calculs**

Outre les données définissant l'ensemble du chargement spécial en termes de géométrie et de charges appliquées aux différentes roues, il est en général nécessaire de définir également les profils verticaux de calcul. [11]



**Figure IV. 6: Commande pour la création d'une nouvelle charge spéciale**

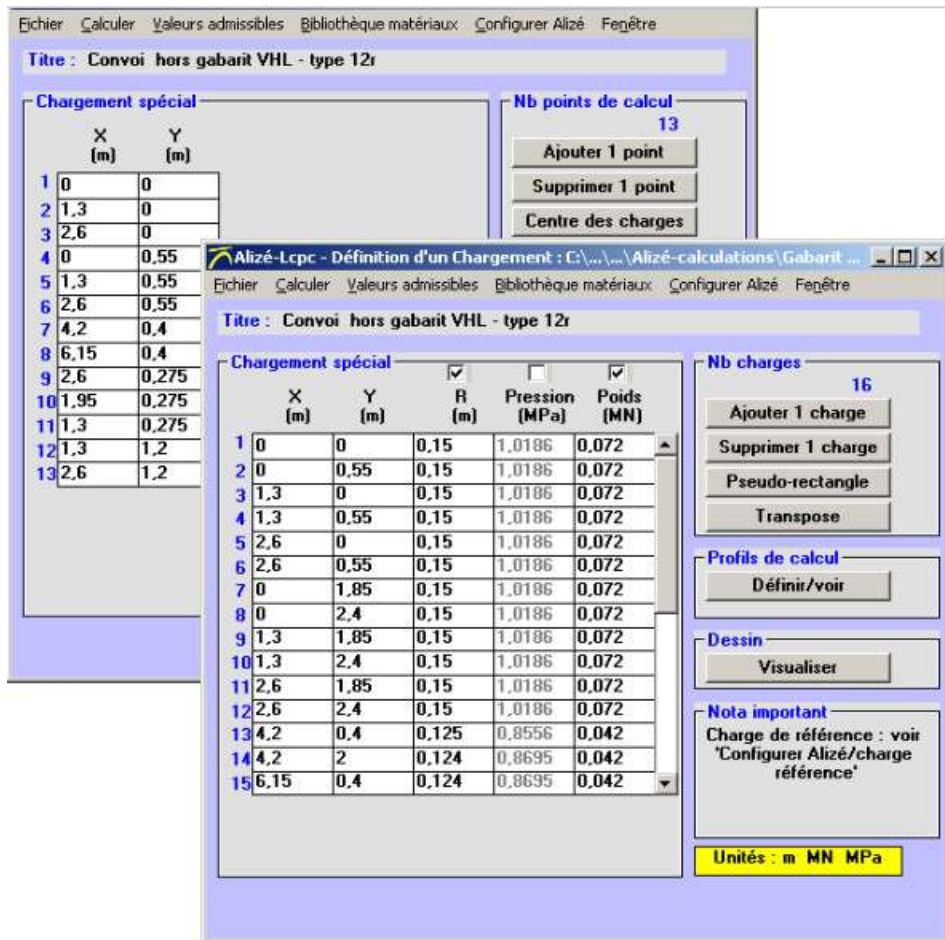


Figure IV. 7: Définition d'une charge spéciale, exemple d'un convoi 16 roues, définition des charges et des profils verticaux de calculs

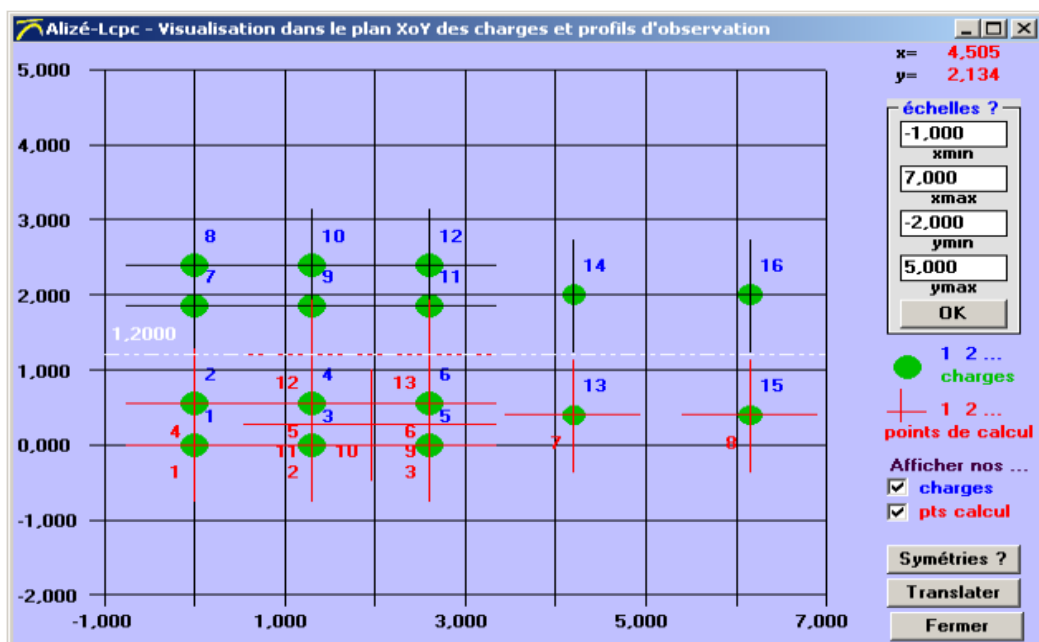


Figure IV. 8: Visualisation d'une charge spéciale, exemple d'un convoi 16 roues.

**IV.7. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons parlé sur La méthode des éléments finis et sur le logiciel de calcul Alize-LCPC.

# **CHAPITRE V**

## **Description du cas d'étude**



### **V.1. Introduction**

dans ce chapitre nous parlons des détails du projet sur le quel nous travaillons, la région de projet et son Caractéristiques géotechniques et la géométrie de projet et toutes les solutions de renforcement qui utilisés.

### **V.2. Description du cas d'étude**

#### **V.2.1. Présentation de région d'illizi**

La wilaya d'illizi s'étend sur une superficie de 284 618 Km<sup>2</sup>, avec une population de 57100 habitants. Elle est située à l'extrême Sud-Est du pays et elle est limitrophe avec trois pays sur 1 233 km de frontière avec la Tunisie, la Libye et le Niger.

Le climat de la wilaya est saharien désertique et très sec, caractérisé par de grandes chaleurs, une sécheresse de l'air et des précipitations très réduites.

Les températures moyennes en été sont de 41 C° maxima et 26 C° minima, en hiver les températures varient entre 25 C° maxima et 8 C° minima.

#### **V.2.2. Présentation de cas d'étude**

Le cas d'étude qu'on va traiter dans ce mémoire, c'est un cas de renforcement avec géo-grille d'un corps de chaussée souple de la route nationale (RN-53) menant vers la commune frontalière de Debdeb existante dans la wilaya d'illizi de PK03+500 ver PK18+500 sur un long de 15Km.



Figure V. 1: La route nationale (RN-53).

### V.3. Caractéristiques géométriques

Le corps de chaussé qui exister déjà avant le renforcement

|       |      |
|-------|------|
| BB    | 6cm  |
| GB    | 14cm |
| GNT   | 20cm |
| SL    | 10cm |
| SL    | 10cm |
| SOL.S | inf  |

BB : Béton bitumineux,

GB : grave bitume,

GNT : grave concassée,

SL : Sable limoneux,

SOL : le sol support.

**V.4. Caractéristiques mécaniques des différents matériaux et CBR du sol support**

**Tableau V. 1: Modules d'élasticité et coefficients de poisson des différentes couches**

|                     | Matériaux     | Modules<br>(Mpa) | Coef.de poisson |
|---------------------|---------------|------------------|-----------------|
| Couche de roulement | BB            | 1800             | 0,35            |
| Couche de base      | GB (neuve)    | 2500             | 0,35            |
|                     | GB (ancienne) | 2100             | 0,35            |
| Couche de fondation | GNT           | 500              | 0,25            |
| Couche de forme     | SL            | 350              | 0,35            |
| Sol support         | SOL.S         | 80               | 0,35            |

Le CBR du sol support : 10

**V.5. Solutions de renforcement**

Le renforcement de la chaussée se fera avec deux méthodes :

1er méthode : renouvellement de la couche BB et GB

2eme méthode : intercalage d'une couche de geo-grille de 2mm d'épaisseur

La modélisation de la structure de chaussée est faite en tenant compte des modules d'élasticité des différents matériaux adaptés à la température du site (30°C).

**V.6. Les caractéristiques de géogrid**

Epaisseur : 2 mm

Module d'élasticité : 900 Mpa

Coefficient de poisson : 0,3

# **CHAPITRE VI**

## **Résultats et discussion**

### VI.1. Introduction

Dans cette étude deux méthodes de renforcement ont été choisies, afin d'étudier l'influence de la géo-grille et leur position sur le renforcement d'une chaussée souple :

- 1er méthode : renouvellement de la couche BB et GB sans utilisations de la géo-grille
- 2ème méthode : intercalage d'une couche de geo-grille de 2mm d'épaisseur

### VI.2. Résultats numériques

#### VI.2.1. Cas de renforcement sans geogrille (Piste 09/27)

Titre :

Structure de base

|       | épais.<br>(m) | module<br>(MPa) | Nu   | matériau<br>type |
|-------|---------------|-----------------|------|------------------|
| collé | 0,06          | 1800            | 0,35 | autre            |
| collé | 0,14          | 2500            | 0,35 | autre            |
| collé | 0,20          | 500             | 0,25 | autre            |
| collé | 0,10          | 350             | 0,35 | autre            |
| collé | 0,10          | 350             | 0,35 | autre            |
| collé | infini        | 80              | 0,35 | autre            |

Modifier la structure

nb de couches : 6

Ajouter 1 couche

Supprimer 1 couche

Série de calculs

nb de calculs : 1

Voir/gérer les variantes

Supprimer les variantes

Niveaux de calcul

Modifier les niveaux

Aide

Nature des interfaces

Epaisseurs mini-maxi

Calcul direct (charge réf.)

Quitter Alizé

Figure VI. 1: Définition la structure de chaussée.

| D:\AMALOU alizé1 1.3\amalou cor.dat |                 |                        |                |                |                 |                |                 |
|-------------------------------------|-----------------|------------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| épais.<br>(m)                       | module<br>(MPa) | coefficient<br>Poisson | Zcalcul<br>(m) | EpsT<br>(µdef) | SigmaT<br>(MPa) | EpsZ<br>(µdef) | SigmaZ<br>(MPa) |
| 0,060                               | 1800,0          | 0,350                  | 0,000          | 29,5           | 0,117           | -8,8           | 0,066           |
|                                     |                 |                        | 0,060          | 12,7           | 0,068           | 7,6            | 0,062           |
| 0,140                               | 2500,0          | 0,350                  | 0,060          | 12,7           | 0,082           | 1,7            | 0,062           |
|                                     |                 |                        | 0,200          | -20,3          | -0,061          | 29,8           | 0,032           |
| 0,200                               | 500,0           | 0,250                  | 0,200          | -20,3          | -0,003          | 66,9           | 0,032           |
|                                     |                 |                        | 0,400          | -22,0          | -0,011          | 35,1           | 0,012           |
| 0,100                               | 350,0           | 0,350                  | 0,400          | -22,0          | -0,005          | 45,5           | 0,012           |
|                                     |                 |                        | 0,500          | -21,7          | -0,008          | 36,9           | 0,008           |
| 0,100                               | 350,0           | 0,350                  | 0,500          | -21,7          | -0,008          | 36,9           | 0,008           |
|                                     |                 |                        | 0,600          | -26,7          | -0,012          | 38,0           | 0,005           |
| infini                              | 80,0            | 0,350                  | 0,600          | -26,7          | 0,000           | 69,4           | 0,005           |

Figure VI. 2: Les résultats des contraintes et déformations.

Les résultats de déformations

$$EpsZ = 69,4 \mu def$$

VI.2.2. Cas de renforcement avec geogrille (Piste 09/27)

a) Une couche de géogrille en haut de la couche GB :

The screenshot shows the 'Structure de base' window with a table of layer properties and several control panels on the right.

|       | épais.<br>(m) | module<br>(MPa) | Nu   | matériau<br>type |
|-------|---------------|-----------------|------|------------------|
| collé | 0,06          | 1800            | 0,35 | autre            |
| collé | 0,002         | 900             | 0,3  | autre            |
| collé | 0,14          | 2500            | 0,35 | autre            |
| collé | 0,20          | 500             | 0,25 | autre            |
| collé | 0,10          | 350             | 0,35 | autre            |
| collé | 0,10          | 350             | 0,35 | autre            |
| collé | infini        | 80              | 0,35 | autre            |

Control panels on the right:

- Modifier la structure:** nb de couches : 7. Buttons: Ajouter 1 couche, Supprimer 1 couche.
- Série de calculs:** nb de calculs : 1. Buttons: Voir/gérer les variantes, Supprimer les variantes.
- Niveaux de calcul:** Button: Modifier les niveaux.
- Aide:** Buttons: Nature des interfaces, Epaisseurs mini-maxi, Calcul direct (charge réf.), Quitter Alizé.

Figure VI. 3: Définition la structure de chaussée pour le cas A.

| D:\AMALOU alizé1 1.3\amalou cor.dat |                 |                        |                |                |                 |                |                 |
|-------------------------------------|-----------------|------------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| épais.<br>(m)                       | module<br>(MPa) | coefficient<br>Poisson | Zcalcul<br>(m) | EpsT<br>(μdef) | SigmaT<br>(MPa) | EpsZ<br>(μdef) | SigmaZ<br>(MPa) |
| 0,060                               | 1800,0<br>collé | 0,350                  | 0,000          | 29,3           | 0,117           | -8,6           | 0,066           |
|                                     |                 |                        | 0,060          | 12,6           | 0,068           | 7,7            | 0,062           |
| 0,002                               | 900,0<br>collé  | 0,300                  | 0,060          | 12,6           | 0,043           | 40,0           | 0,062           |
|                                     |                 |                        | 0,062          | 12,4           | 0,042           | 40,0           | 0,061           |
| 0,140                               | 2500,0<br>collé | 0,350                  | 0,062          | 12,4           | 0,081           | 1,9            | 0,061           |
|                                     |                 |                        | 0,202          | -20,2          | -0,061          | 29,7           | 0,032           |
| 0,200                               | 500,0<br>collé  | 0,250                  | 0,202          | -20,2          | -0,003          | 66,5           | 0,032           |
|                                     |                 |                        | 0,402          | -21,9          | -0,011          | 34,8           | 0,012           |
| 0,100                               | 350,0<br>collé  | 0,350                  | 0,402          | -21,9          | -0,005          | 45,2           | 0,012           |
|                                     |                 |                        | 0,502          | -21,6          | -0,008          | 36,7           | 0,008           |
| 0,100                               | 350,0<br>collé  | 0,350                  | 0,502          | -21,6          | -0,008          | 36,7           | 0,008           |
|                                     |                 |                        | 0,602          | -26,5          | -0,011          | 37,8           | 0,005           |
| infini                              | 80,0            | 0,350                  | 0,602          | -26,5          | 0,000           | 69,0           | 0,005           |

Figure VI. 4: Les résultats des contraintes et déformations pour le cas A.

Les résultats de déformations

$$EpsZ = 69,0 \mu def$$

b) Une couche de géogridde au milieu de la couche BB :

Titre :

**Structure de base**

|       | épais.<br>(m) | module<br>(MPa) | Nu   | matériau<br>type |
|-------|---------------|-----------------|------|------------------|
| collé | 0,03          | 1800            | 0,35 | autre            |
| collé | 0,002         | 900             | 0,3  | autre            |
| collé | 0,03          | 1800            | 0,35 | autre            |
| collé | 0,14          | 2500            | 0,35 | autre            |
| collé | 0,20          | 500             | 0,25 | autre            |
| collé | 0,10          | 350             | 0,35 | autre            |
| collé | 0,10          | 350             | 0,35 | autre            |
| collé | infini        | 80              | 0,35 | autre            |

**Modifier la structure**

nb de couches : 8

Ajouter 1 couche

Supprimer 1 couche

**Série de calculs**

nb de calculs : 1

Voir/gérer les variantes

Supprimer les variantes

**Niveaux de calcul**

Modifier les niveaux

**Aide**

Nature des interfaces

Epaisseurs mini-maxi

Calcul direct (charge réf.)

Quitter Alizé

Figure VI. 5: Définition la structure de chaussée pour le cas b.

| D:\AMALOU alizé1 1.3\amalou cor.dat |                 |                        |                |                |                 |                |                 |
|-------------------------------------|-----------------|------------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| épais.<br>(m)                       | module<br>(MPa) | coefficient<br>Poisson | Zcalcul<br>(m) | EpsT<br>(µdef) | SigmaT<br>(MPa) | EpsZ<br>(µdef) | SigmaZ<br>(MPa) |
| 0,030                               | 1800,0          | 0,350                  | 0,000          | 29,4           | 0,117           | -8,8           | 0,066           |
|                                     | collé           |                        | 0,030          | 20,4           | 0,091           | 0,5            | 0,065           |
| 0,002                               | 900,0           | 0,300                  | 0,030          | 20,4           | 0,054           | 36,2           | 0,065           |
|                                     | collé           |                        | 0,032          | 20,0           | 0,053           | 36,4           | 0,065           |
| 0,030                               | 1800,0          | 0,350                  | 0,032          | 20,0           | 0,090           | 0,9            | 0,065           |
|                                     | collé           |                        | 0,062          | 12,4           | 0,067           | 7,9            | 0,061           |
| 0,140                               | 2500,0          | 0,350                  | 0,062          | 12,4           | 0,081           | 2,0            | 0,061           |
|                                     | collé           |                        | 0,202          | -20,2          | -0,061          | 29,7           | 0,032           |
| 0,200                               | 500,0           | 0,250                  | 0,202          | -20,2          | -0,003          | 66,5           | 0,032           |
|                                     | collé           |                        | 0,402          | -21,9          | -0,011          | 34,8           | 0,012           |
| 0,100                               | 350,0           | 0,350                  | 0,402          | -21,9          | -0,005          | 45,2           | 0,012           |
|                                     | collé           |                        | 0,502          | -21,6          | -0,008          | 36,7           | 0,008           |
| 0,100                               | 350,0           | 0,350                  | 0,502          | -21,6          | -0,008          | 36,7           | 0,008           |
|                                     | collé           |                        | 0,602          | -26,6          | -0,012          | 37,8           | 0,005           |
| infini                              | 80,0            | 0,350                  | 0,602          | -26,6          | 0,000           | 69,0           | 0,005           |

Figure VI. 6: Les résultats des contraintes et déformations pour le cas b.

Les résultats de déformations

EpsZ = 69,0 µdef

c) Une couche de géogridde en 1/3 de la couche BB :

The screenshot shows the 'Structure de base' window with the following table:

|       | épais.<br>(m) | module<br>(MPa) | Nu   | matériau<br>type |
|-------|---------------|-----------------|------|------------------|
| collé | 0,04          | 1800            | 0,35 | autre            |
| collé | 0,002         | 900             | 0,3  | autre            |
| collé | 0,02          | 1800            | 0,35 | autre            |
| collé | 0,14          | 2500            | 0,35 | autre            |
| collé | 0,2           | 500             | 0,25 | autre            |
| collé | 0,1           | 350             | 0,35 | autre            |
| collé | 0,1           | 350             | 0,35 | autre            |
| collé | infini        | 80              | 0,35 | autre            |

On the right side of the interface, there are several control panels:

- Modifier la structure:** nb de couches : 8. Buttons: Ajouter 1 couche, Supprimer 1 couche.
- Série de calculs:** nb de calculs : 1. Buttons: Voir/gérer les variantes, Supprimer les variantes.
- Niveaux de calcul:** Button: Modifier les niveaux.
- Aide:** Buttons: Nature des interfaces, Epaisseurs mini-maxi, Calcul direct (charge réf.), Quitter Alizé.

Figure VI. 7: Définition la structure de chaussée pour le cas c.



| D:\AMALOU alizé1 1.3\amalou cor.dat |                 |                        |                |                |                 |                |                 |
|-------------------------------------|-----------------|------------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| épais.<br>(m)                       | module<br>(MPa) | coefficient<br>Poisson | Zcalcul<br>(m) | EpsT<br>(µdef) | SigmaT<br>(MPa) | EpsZ<br>(µdef) | SigmaZ<br>(MPa) |
| 0,040                               | 1800,0          | 0,350                  | 0,000          | 29,4           | 0,117           | -8,7           | 0,066           |
|                                     | collé           |                        | 0,040          | 17,7           | 0,083           | 3,1            | 0,064           |
| 0,002                               | 900,0           | 0,300                  | 0,040          | 17,7           | 0,050           | 37,7           | 0,064           |
|                                     | collé           |                        | 0,042          | 17,3           | 0,050           | 37,9           | 0,064           |
| 0,020                               | 1800,0          | 0,350                  | 0,042          | 17,3           | 0,082           | 3,5            | 0,064           |
|                                     | collé           |                        | 0,062          | 12,4           | 0,067           | 7,9            | 0,061           |
| 0,140                               | 2500,0          | 0,350                  | 0,062          | 12,4           | 0,081           | 2,0            | 0,061           |
|                                     | collé           |                        | 0,202          | -20,2          | -0,061          | 29,7           | 0,032           |
| 0,200                               | 500,0           | 0,250                  | 0,202          | -20,2          | -0,003          | 66,4           | 0,032           |
|                                     | collé           |                        | 0,402          | -21,9          | -0,011          | 34,8           | 0,012           |
| 0,100                               | 350,0           | 0,350                  | 0,402          | -21,9          | -0,005          | 45,2           | 0,012           |
|                                     | collé           |                        | 0,502          | -21,6          | -0,008          | 36,7           | 0,008           |
| 0,100                               | 350,0           | 0,350                  | 0,502          | -21,6          | -0,008          | 36,7           | 0,008           |
|                                     | collé           |                        | 0,602          | -26,5          | -0,012          | 37,8           | 0,005           |
| infini                              | 80,0            | 0,350                  | 0,602          | -26,5          | 0,000           | 69,0           | 0,005           |

Figure VI. 8: Les résultats des contraintes et déformations pour le cas c.

Les résultats de déformations

$$EpsZ = 69,0 \mu def$$

d) Une couche de géogridde en 2/3 de la couche BB :

The screenshot shows the 'Structure de base' window with a table of layer properties and several control panels on the right.

|       | épais.<br>(m) | module<br>(MPa) | Nu   | matériau<br>type |
|-------|---------------|-----------------|------|------------------|
| collé | 0,02          | 1800            | 0,35 | autre            |
| collé | 0,002         | 900             | 0,3  | autre            |
| collé | 0,04          | 1800            | 0,35 | autre            |
| collé | 0,14          | 2500            | 0,35 | autre            |
| collé | 0,2           | 500             | 0,25 | autre            |
| collé | 0,1           | 350             | 0,35 | autre            |
| collé | 0,1           | 350             | 0,35 | autre            |
| collé | infini        | 80              | 0,35 | autre            |

Control panels on the right:

- Modifier la structure:** nb de couches : 8. Buttons: Ajouter 1 couche, Supprimer 1 couche.
- Série de calculs:** nb de calculs : 1. Buttons: Voir/gérer les variantes, Supprimer les variantes.
- Niveaux de calcul:** Button: Modifier les niveaux.
- Aide:** Buttons: Nature des interfaces, Epaisseurs mini-maxi, Calcul direct (charge réf.), Quitter Alizé.

Figure VI. 9: Définition la structure de chaussée pour le cas d.

| D:\AMALOU alizé1 1.3\amalou cor.dat |                 |                        |                |                |                 |                |                 |
|-------------------------------------|-----------------|------------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| épais.<br>(m)                       | module<br>(MPa) | coefficient<br>Poisson | Zcalcul<br>(m) | EpsT<br>(µdef) | SigmaT<br>(MPa) | EpsZ<br>(µdef) | SigmaZ<br>(MPa) |
| 0,020                               | 1800,0<br>collé | 0,350                  | 0,000          | 29,5           | 0,117           | -8,8           | 0,066           |
|                                     |                 |                        | 0,020          | 23,3           | 0,100           | -2,3           | 0,066           |
| 0,002                               | 900,0<br>collé  | 0,300                  | 0,020          | 23,3           | 0,058           | 34,3           | 0,066           |
|                                     |                 |                        | 0,022          | 22,8           | 0,057           | 34,6           | 0,066           |
| 0,040                               | 1800,0<br>collé | 0,350                  | 0,022          | 22,8           | 0,098           | -1,8           | 0,066           |
|                                     |                 |                        | 0,062          | 12,4           | 0,067           | 7,9            | 0,061           |
| 0,140                               | 2500,0<br>collé | 0,350                  | 0,062          | 12,4           | 0,081           | 2,0            | 0,061           |
|                                     |                 |                        | 0,202          | -20,2          | -0,061          | 29,7           | 0,032           |
| 0,200                               | 500,0<br>collé  | 0,250                  | 0,202          | -20,2          | -0,003          | 66,5           | 0,032           |
|                                     |                 |                        | 0,402          | -21,9          | -0,011          | 34,8           | 0,012           |
| 0,100                               | 350,0<br>collé  | 0,350                  | 0,402          | -21,9          | -0,005          | 45,2           | 0,012           |
|                                     |                 |                        | 0,502          | -21,6          | -0,008          | 36,7           | 0,008           |
| 0,100                               | 350,0<br>collé  | 0,350                  | 0,502          | -21,6          | -0,008          | 36,7           | 0,008           |
|                                     |                 |                        | 0,602          | -26,6          | -0,012          | 37,8           | 0,005           |
| infini                              | 80,0            | 0,350                  | 0,602          | -26,6          | 0,000           | 69,0           | 0,005           |

Figure VI. 10: Les résultats des contraintes et déformations pour le cas d.

Les résultats de déformations

$EpsZ = 69,0 \mu def$

- e) deux couches de geogridle la 1<sup>er</sup> en haut de la couche GB et la 2<sup>em</sup> en 1/3 de la couche BB

The screenshot shows the 'Structure de base' window with the following table:

|       | épais.<br>(m) | module<br>(MPa) | Nu   | matériau<br>type |
|-------|---------------|-----------------|------|------------------|
| collé | 0,04          | 1800            | 0,35 | autre            |
| collé | 0,002         | 900             | 0,3  | autre            |
| collé | 0,02          | 1800            | 0,35 | autre            |
| collé | 0,002         | 900             | 0,3  | autre            |
| collé | 0,14          | 2500            | 0,35 | autre            |
| collé | 0,2           | 500             | 0,25 | autre            |
| collé | 0,1           | 350             | 0,35 | autre            |
| collé | 0,1           | 350             | 0,35 | autre            |
| collé | infini        | 80              | 0,35 | autre            |

On the right side of the interface, there are control panels for:

- Modifier la structure**: nb de couches : 9. Buttons: 'Ajouter 1 couche', 'Supprimer 1 couche'.
- Série de calculs**: nb de calculs : 1. Buttons: 'Voir/gérer les variantes', 'Supprimer les variantes'.
- Niveaux de calcul**: Button: 'Modifier les niveaux'.
- Aide**: Buttons: 'Nature des interfaces', 'Epaisseurs mini-maxi', 'Calcul direct (charge réf.)', 'Quitter Alizé'.

Figure VI. 11: Définition la structure de chaussée pour le cas e.

| D:\AMALOU alizé1 1.3\amalou cor.dat |                 |                        |                |                |                 |                |                 |
|-------------------------------------|-----------------|------------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| épais.<br>(m)                       | module<br>(MPa) | coefficient<br>Poisson | Zcalcul<br>(m) | EpsT<br>(µdef) | SigmaT<br>(MPa) | EpsZ<br>(µdef) | SigmaZ<br>(MPa) |
| 0,040                               | 1800,0          | 0,350                  | 0,000          | 29,1           | 0,116           | -8,5           | 0,066           |
|                                     | collé           |                        | 0,040          | 17,6           | 0,083           | 3,2            | 0,064           |
| 0,002                               | 900,0           | 0,300                  | 0,040          | 17,6           | 0,050           | 37,8           | 0,064           |
|                                     | collé           |                        | 0,042          | 17,2           | 0,049           | 38,0           | 0,064           |
| 0,020                               | 1800,0          | 0,350                  | 0,042          | 17,2           | 0,082           | 3,6            | 0,064           |
|                                     | collé           |                        | 0,062          | 12,3           | 0,067           | 7,9            | 0,061           |
| 0,002                               | 900,0           | 0,300                  | 0,062          | 12,3           | 0,042           | 40,0           | 0,061           |
|                                     | collé           |                        | 0,064          | 12,1           | 0,042           | 40,0           | 0,061           |
| 0,140                               | 2500,0          | 0,350                  | 0,064          | 12,1           | 0,079           | 2,2            | 0,061           |
|                                     | collé           |                        | 0,204          | -20,2          | -0,061          | 29,6           | 0,032           |
| 0,200                               | 500,0           | 0,250                  | 0,204          | -20,2          | -0,003          | 66,0           | 0,032           |
|                                     | collé           |                        | 0,404          | -21,8          | -0,011          | 34,6           | 0,012           |
| 0,100                               | 350,0           | 0,350                  | 0,404          | -21,8          | -0,005          | 44,9           | 0,012           |
|                                     | collé           |                        | 0,504          | -21,5          | -0,008          | 36,5           | 0,008           |
| 0,100                               | 350,0           | 0,350                  | 0,504          | -21,5          | -0,008          | 36,5           | 0,008           |
|                                     | collé           |                        | 0,604          | -26,4          | -0,011          | 37,6           | 0,005           |
| infini                              | 80,0            | 0,350                  | 0,604          | -26,4          | 0,000           | 68,6           | 0,005           |

Figure VI. 12: Les résultats des contraintes et déformations pour le cas e.

Les résultats de déformations

$EpsZ = 68,6 \mu def$

- f) deux couches de geogridle la 1<sup>er</sup> en haut de la couche GB et la 2<sup>em</sup> en 2/3 de la couche BB

Titre :

Structure de base

|       | épais.<br>(m) | module<br>(MPa) | Nu   | matériau<br>type |
|-------|---------------|-----------------|------|------------------|
| collé | 0,02          | 1800            | 0,35 | autre            |
| collé | 0,002         | 900             | 0,3  | autre            |
| collé | 0,04          | 1800            | 0,35 | autre            |
| collé | 0,002         | 900             | 0,3  | autre            |
| collé | 0,14          | 2500            | 0,35 | autre            |
| collé | 0,2           | 500             | 0,25 | autre            |
| collé | 0,1           | 350             | 0,35 | autre            |
| collé | 0,1           | 350             | 0,35 | autre            |
| collé | infini        | 80              | 0,35 | autre            |

Modifier la structure

nb de couches : 9

Ajouter 1 couche

Supprimer 1 couche

Série de calculs

nb de calculs : 1

Voir/gérer les variantes

Supprimer les variantes

Niveaux de calcul

Modifier les niveaux

Aide

Nature des interfaces

Epaisseurs mini-maxi

Calcul direct (charge réf.)

Quitter Alizé

Figure VI. 13: Définition la structure de chaussée pour le cas f.

| D:\AMALOU alizé1 1.3\amalou cor.dat |                 |                        |                |                |                 |                |                 |
|-------------------------------------|-----------------|------------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| épais.<br>(m)                       | module<br>(MPa) | coefficient<br>Poisson | Zcalcul<br>(m) | EpsT<br>(µdef) | SigmaT<br>(MPa) | EpsZ<br>(µdef) | SigmaZ<br>(MPa) |
| 0,020                               | 1800,0          | 0,350                  | 0,000          | 29,3           | 0,117           | -8,6           | 0,066           |
|                                     | collé           |                        | 0,020          | 23,1           | 0,099           | -2,2           | 0,066           |
| 0,002                               | 900,0           | 0,300                  | 0,020          | 23,1           | 0,058           | 34,4           | 0,066           |
|                                     | collé           |                        | 0,022          | 22,7           | 0,057           | 34,7           | 0,066           |
| 0,040                               | 1800,0          | 0,350                  | 0,022          | 22,7           | 0,098           | -1,7           | 0,066           |
|                                     | collé           |                        | 0,062          | 12,3           | 0,067           | 8,0            | 0,061           |
| 0,002                               | 900,0           | 0,300                  | 0,062          | 12,3           | 0,042           | 40,1           | 0,061           |
|                                     | collé           |                        | 0,064          | 12,1           | 0,042           | 40,0           | 0,061           |
| 0,140                               | 2500,0          | 0,350                  | 0,064          | 12,1           | 0,079           | 2,2            | 0,061           |
|                                     | collé           |                        | 0,204          | -20,2          | -0,061          | 29,6           | 0,032           |
| 0,200                               | 500,0           | 0,250                  | 0,204          | -20,2          | -0,003          | 66,0           | 0,032           |
|                                     | collé           |                        | 0,404          | -21,8          | -0,011          | 34,6           | 0,012           |
| 0,100                               | 350,0           | 0,350                  | 0,404          | -21,8          | -0,005          | 44,9           | 0,012           |
|                                     | collé           |                        | 0,504          | -21,5          | -0,008          | 36,5           | 0,008           |
| 0,100                               | 350,0           | 0,350                  | 0,504          | -21,5          | -0,008          | 36,5           | 0,008           |
|                                     | collé           |                        | 0,604          | -26,4          | -0,011          | 37,6           | 0,005           |
| infini                              | 80,0            | 0,350                  | 0,604          | -26,4          | 0,000           | 68,7           | 0,005           |

Figure VI. 14: Les résultats des contraintes et déformations pour le cas f.

Les résultats de déformations

$$EpsZ = 68,7 \mu def$$

- g) trois couches de geogridle la 1<sup>er</sup> en haut de la couche GB et la 2<sup>em</sup> en 1/3 de la couche BB et la 3<sup>em</sup> en 2/3 de la couche de BB :

The screenshot shows a software interface for defining pavement structure. It features a table with the following columns: 'épais. (m)', 'module (MPa)', 'Nu', and 'matériau type'. The table lists 11 layers, all labeled 'collé' and 'autre'. To the right of the table, there are control buttons for 'Modifier la structure', 'Ajouter 1 couche', 'Supprimer 1 couche', 'Série de calculs', 'Niveaux de calcul', and 'Aide'.

Figure VI. 15: Définition la structure de chaussée pour le cas g.

| D:\AMALOU alizé1 1.3\amalou cor.dat |                 |                        |                |                |                 |                |                 |
|-------------------------------------|-----------------|------------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| épais.<br>(m)                       | module<br>(MPa) | coefficient<br>Poisson | Zcalcul<br>(m) | EpsT<br>(µdef) | SigmaT<br>(MPa) | EpsZ<br>(µdef) | SigmaZ<br>(MPa) |
| 0,020                               | 1800,0<br>collé | 0,350                  | 0,000          | 29,1           | 0,116           | -8,5           | 0,066           |
|                                     |                 |                        | 0,020          | 23,1           | 0,099           | -2,1           | 0,066           |
| 0,002                               | 900,0<br>collé  | 0,300                  | 0,020          | 23,1           | 0,058           | 34,5           | 0,066           |
|                                     |                 |                        | 0,022          | 22,6           | 0,057           | 34,8           | 0,066           |
| 0,020                               | 1800,0<br>collé | 0,350                  | 0,022          | 22,6           | 0,098           | -1,6           | 0,066           |
|                                     |                 |                        | 0,042          | 17,2           | 0,082           | 3,6            | 0,064           |
| 0,002                               | 900,0<br>collé  | 0,300                  | 0,042          | 17,2           | 0,049           | 38,0           | 0,064           |
|                                     |                 |                        | 0,044          | 16,8           | 0,049           | 38,2           | 0,064           |
| 0,020                               | 1800,0<br>collé | 0,350                  | 0,044          | 16,8           | 0,081           | 3,9            | 0,064           |
|                                     |                 |                        | 0,064          | 12,0           | 0,066           | 8,2            | 0,061           |
| 0,002                               | 900,0<br>collé  | 0,300                  | 0,064          | 12,0           | 0,042           | 40,1           | 0,061           |
|                                     |                 |                        | 0,066          | 11,8           | 0,041           | 40,1           | 0,061           |
| 0,140                               | 2500,0<br>collé | 0,350                  | 0,066          | 11,8           | 0,078           | 2,5            | 0,061           |
|                                     |                 |                        | 0,206          | -20,1          | -0,060          | 29,4           | 0,031           |
| 0,200                               | 500,0<br>collé  | 0,250                  | 0,206          | -20,1          | -0,003          | 65,6           | 0,031           |
|                                     |                 |                        | 0,406          | -21,7          | -0,010          | 34,4           | 0,012           |
| 0,100                               | 350,0<br>collé  | 0,350                  | 0,406          | -21,7          | -0,005          | 44,7           | 0,012           |
|                                     |                 |                        | 0,506          | -21,4          | -0,007          | 36,3           | 0,007           |
| 0,100                               | 350,0<br>collé  | 0,350                  | 0,506          | -21,4          | -0,007          | 36,3           | 0,007           |
|                                     |                 |                        | 0,606          | -26,3          | -0,011          | 37,4           | 0,005           |
| infini                              | 80,0            | 0,350                  | 0,606          | -26,3          | 0,000           | 68,3           | 0,005           |

Figure VI. 16: Les résultats des contraintes et déformations pour le cas g.

Les résultats de déformations

$$EpsZ = 68,3 \mu def$$

h) Une couche de géogrille en bas de la couche GB :

| Titre :           |                 |      |                  |       |
|-------------------|-----------------|------|------------------|-------|
| Structure de base |                 |      |                  |       |
| épais.<br>(m)     | module<br>(MPa) | Nu   | matériau<br>type |       |
| collé             | 0,06            | 1800 | 0,35             | autre |
| collé             | 0,14            | 2500 | 0,35             | autre |
| collé             | 0,002           | 900  | 0,3              | autre |
| collé             | 0,2             | 500  | 0,25             | autre |
| collé             | 0,1             | 350  | 0,35             | autre |
| collé             | 0,1             | 350  | 0,35             | autre |
| collé             | infini          | 80   | 0,35             | autre |

Modifier la structure  
nb de couches : 7  
Ajouter 1 couche  
Supprimer 1 couche

Série de calculs  
nb de calculs : 1  
Voir/gérer les variantes  
Supprimer les variantes

Niveaux de calcul  
Modifier les niveaux

Aide  
Nature des interfaces  
Epaisseurs mini-maxi  
Calcul direct (charge réf.)  
Quitter Alizé

Figure VI. 17: Définition la structure de chaussée pour le cas h.

| D:\AMALOU alizé1 1.3\amalou cor.dat |                 |                        |                |                |                 |                |                 |
|-------------------------------------|-----------------|------------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| épais.<br>(m)                       | module<br>(MPa) | coefficient<br>Poisson | Zcalcul<br>(m) | EpsT<br>(µdef) | SigmaT<br>(MPa) | EpsZ<br>(µdef) | SigmaZ<br>(MPa) |
| 0,060                               | 1800,0<br>collé | 0,350                  | 0,000          | 29,4           | 0,117           | -8,7           | 0,066           |
|                                     |                 |                        | 0,060          | 12,6           | 0,068           | 7,7            | 0,062           |
| 0,140                               | 2500,0<br>collé | 0,350                  | 0,060          | 12,6           | 0,082           | 1,7            | 0,062           |
|                                     |                 |                        | 0,200          | -20,1          | -0,060          | 29,6           | 0,032           |
| 0,002                               | 900,0<br>collé  | 0,300                  | 0,200          | -20,1          | -0,012          | 43,7           | 0,032           |
|                                     |                 |                        | 0,202          | -20,4          | -0,013          | 43,7           | 0,032           |
| 0,200                               | 500,0<br>collé  | 0,250                  | 0,202          | -20,4          | -0,003          | 66,6           | 0,032           |
|                                     |                 |                        | 0,402          | -21,9          | -0,011          | 34,8           | 0,012           |
| 0,100                               | 350,0<br>collé  | 0,350                  | 0,402          | -21,9          | -0,005          | 45,2           | 0,012           |
|                                     |                 |                        | 0,502          | -21,6          | -0,008          | 36,7           | 0,008           |
| 0,100                               | 350,0<br>collé  | 0,350                  | 0,502          | -21,6          | -0,008          | 36,7           | 0,008           |
|                                     |                 |                        | 0,602          | -26,5          | -0,011          | 37,8           | 0,005           |
| infini                              | 80,0            | 0,350                  | 0,602          | -26,5          | 0,000           | 68,9           | 0,005           |

Figure VI. 18: Les résultats des contraintes et déformations pour le cas h.

Les résultats de déformations

$$EpsZ = 68,9 \mu def$$

i) couche de géogridde au milieu et en bas de la couche GB :

The screenshot shows the 'Structure de base' window with a table of layer properties and several control panels on the right.

|       | épais.<br>(m) | module<br>(MPa) | Nu   | matériau<br>type |
|-------|---------------|-----------------|------|------------------|
| collé | 0,06          | 1800            | 0,35 | autre            |
| collé | 0,14          | 2500            | 0,35 | autre            |
| collé | 0,1           | 500             | 0,25 | autre            |
| collé | 0,002         | 900             | 0,3  | autre            |
| collé | 0,1           | 500             | 0,25 | autre            |
| collé | 0,1           | 350             | 0,35 | autre            |
| collé | 0,1           | 350             | 0,35 | autre            |
| collé | infini        | 80              | 0,35 | autre            |

Control panels on the right:

- Modifier la structure:** nb de couches : 8. Buttons: Ajouter 1 couche, Supprimer 1 couche.
- Série de calculs:** nb de calculs : 1. Buttons: Voir/gérer les variantes, Supprimer les variantes.
- Niveaux de calcul:** Button: Modifier les niveaux.
- Aide:** Buttons: Nature des interfaces, Epaisseurs mini-maxi, Calcul direct (charge réf.), Quitter Alizé.

Figure VI. 19: Définition la structure de chaussée pour le cas i.

| D:\AMALOU alizé1 1.3\amalou cor.dat |                 |                        |                |                |                 |                |                 |
|-------------------------------------|-----------------|------------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| épais.<br>(m)                       | module<br>(MPa) | coefficient<br>Poisson | Zcalcul<br>(m) | EpsT<br>(µdef) | SigmaT<br>(MPa) | EpsZ<br>(µdef) | SigmaZ<br>(MPa) |
| 0,060                               | 1800,0<br>collé | 0,350                  | 0,000          | 29,4           | 0,117           | -8,7           | 0,066           |
|                                     |                 |                        | 0,060          | 12,6           | 0,068           | 7,7            | 0,062           |
| 0,140                               | 2500,0<br>collé | 0,350                  | 0,060          | 12,6           | 0,082           | 1,7            | 0,062           |
|                                     |                 |                        | 0,200          | -20,2          | -0,060          | 29,7           | 0,032           |
| 0,100                               | 500,0<br>collé  | 0,250                  | 0,200          | -20,2          | -0,003          | 67,0           | 0,032           |
|                                     |                 |                        | 0,300          | -19,2          | -0,006          | 46,3           | 0,020           |
| 0,002                               | 900,0<br>collé  | 0,300                  | 0,300          | -19,2          | -0,016          | 33,0           | 0,020           |
|                                     |                 |                        | 0,302          | -19,4          | -0,016          | 33,0           | 0,020           |
| 0,100                               | 500,0<br>collé  | 0,250                  | 0,302          | -19,4          | -0,006          | 46,1           | 0,020           |
|                                     |                 |                        | 0,402          | -21,9          | -0,011          | 34,8           | 0,012           |
| 0,100                               | 350,0<br>collé  | 0,350                  | 0,402          | -21,9          | -0,005          | 45,2           | 0,012           |
|                                     |                 |                        | 0,502          | -21,6          | -0,008          | 36,7           | 0,008           |
| 0,100                               | 350,0<br>collé  | 0,350                  | 0,502          | -21,6          | -0,008          | 36,7           | 0,008           |
|                                     |                 |                        | 0,602          | -26,5          | -0,012          | 37,8           | 0,005           |
| infini                              | 80,0            | 0,350                  | 0,602          | -26,5          | 0,000           | 69,0           | 0,005           |

Figure VI. 20: Les résultats des contraintes et déformations pour le cas i.

Les résultats de déformations

$$EpsZ = 69,0 \mu def$$

VI.3. Analyse des résultats

On a réunis les résultats dans le tableau suivant :

Tableau VI. 1 : Comparatif des déformations

| CAS                                 | EpsZ(µm)    | Réduction d'EpsZ<br>(%) |
|-------------------------------------|-------------|-------------------------|
| Renforcement sans Géogrille         | 69,4        | 0                       |
| Renforcement avec Géogrille cas (a) | 69          | 0,58                    |
| Renforcement avec Géogrille cas (b) | 69          | 0,58                    |
| Renforcement avec Géogrille cas (c) | 69          | 0,58                    |
| Renforcement avec Géogrille cas (d) | 69          | 0,58                    |
| Renforcement avec Géogrille cas (e) | 68.6        | 1.15                    |
| Renforcement avec Géogrille cas (f) | 68.7        | 1.01                    |
| Renforcement avec Géogrille cas (g) | <b>68.3</b> | <b>1,59</b>             |
| Renforcement avec Géogrille cas (h) | <b>68,9</b> | <b>0,72</b>             |
| Renforcement avec Géogrille cas (i) | <b>69</b>   | <b>0,58</b>             |

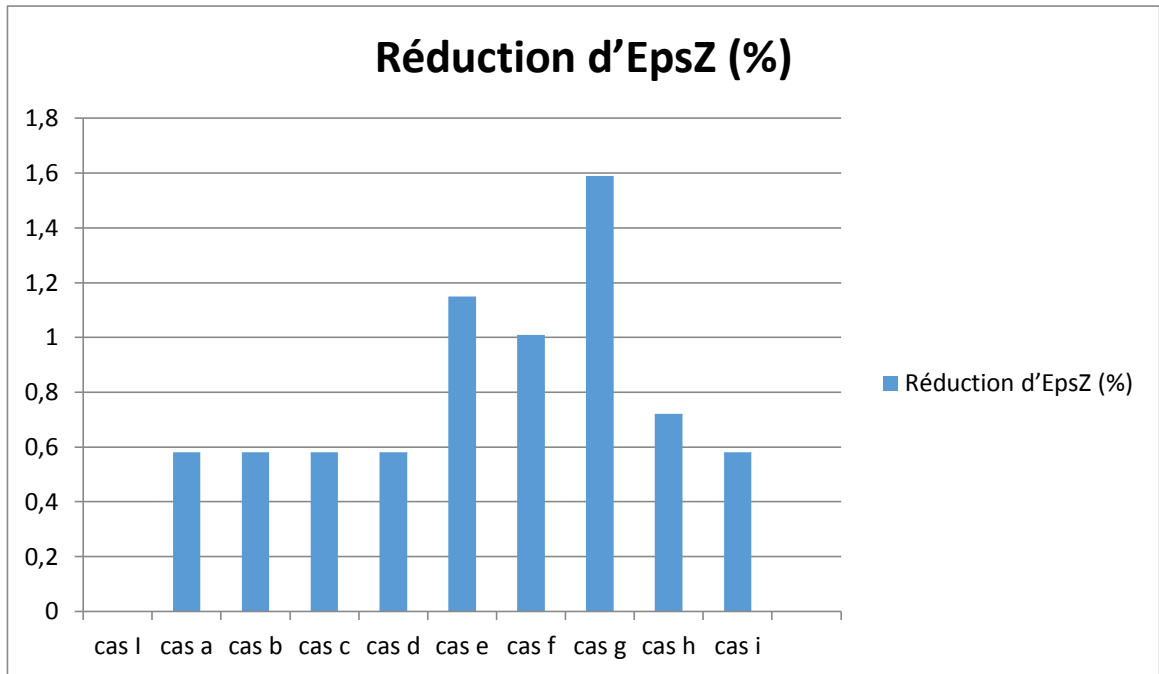


Figure VI. 21: Histogramme explique la réduction d'Eps z.

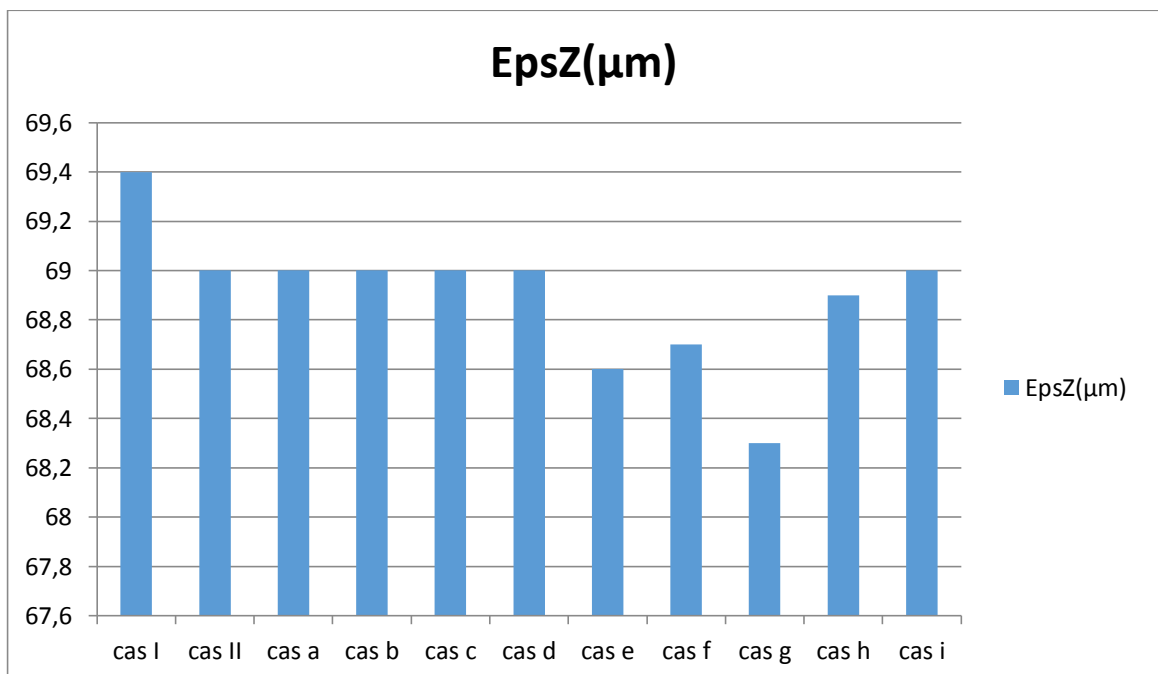


Figure VI. 22: Histogramme des déformations verticales.

#### VI.4. Conclusion

Nous concluons à partir des résultats obtenus dans l'analyse numérique, lorsque le corps de chaussée est renforcé avec trois nappes de géogrille comme indiqué dans le cas g de l'analyse numérique, les résultats des déformations verticales sont les plus faibles ce qui est le résultat optimal.



## **Conclusion générale**

Cette étude nous a permis de conclure que :

- Les dégradations des chaussées sont inévitables vue les conditions climatiques et le trafic intense subit ;
- Les géo-synthétiques comme les geogrids sont des produits utilisés pour le renforcement et/ou la réparation des chaussées souple, grâce à ses avantages tels que :
  - La réduction de la propagation des remontées des fissures ;
  - réduire l'épaisseur du revêtement bitumineux;
  - réduire l'épaisseur de la chaussée;
  - Réduire les contraintes et déformations.
- L'application des produits géo-synthétique comme la géo-grille dans les chaussées souples joue un rôle très important dans le renforcement et la maintenance de la chaussée.

## **Références bibliographiques**

- [1] Bessahraoui.S, Bentria.s (2016) « les fissures des chaussées souples (types, causes et méthodes de réparations) », Mémoire de fin d'étude Master, Université de Kasdi Merbah, Ourgla.
- [2] [STAC, 2007] STAC. Etat De La Surface Des Chaussées Aéronautiques. Catalogue Des Dégradations-STAC, Avril 2007.
- [3] Delphine.L, (2002) « modélisations de la remontée de fissure en fatigue dans les structures routières par endommagement et macro-fissurations », Thèse doctorat, Université de limoges, Egletons.
- [4] Peyronne.T, (octobre, 1991), cours de routes dimensionnement des chaussée, 2ème édition presses de l'école nationale des ponts et chaussées.
- [5] Mebarki.G, (Avril, 2016), cours du module mécanique des milieux granulaires (méthode CBR), l'Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [6] Catalogue algérien de Dimensionnement des Chaussées neuves, CTTTP Novembre 2001, fascicule 1 et 2 et 3.
- [7] Mirech.A, (2013) « Utilisation des géo-synthétique en géotechnique routière », Mémoire de Master, Guelma.
- [8] Djennah.R, (2016) « Géosynthétique pour la construction de route et chaussée, Amélioration de la couche de forme », Mémoire de master en géotechnique, Département de génie civil, Université 08mai 1945, Guelma. 29p.
- [9] Djennah.R., (2016) « Géosynthétique pour la construction de route et chaussée, Amélioration de la couche de forme ». Mémoire de master en géotechnique. Département de génie civil. Université 08mai 1945 Guelma, 30p.
- [10] Talhaoui.Z, (2019) « contributions à l'étude du comportement mécanique des corps des chaussées renforcées par les géosynthétiques », Thèse de doctorat en science, Département de génie civil, Université aboubekr bekaid, Telemcen.
- [11] Le manuel d'utilisation de logiciel alizé-lcpc version1.3, Janvier 2011