

République Algérienne Démocratique et Populaire  
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



**Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics**

المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية

Code :.....

# Mémoire

Pour l'Obtention du Diplôme de MASTER

Spécialité : Infrastructures de base

## Thème

Présentation d'une méthode de détermination de la durée de vie résiduelle d'une chaussée routière.

*Encadré par :*

**Pr.DERRICHE Zohra**

*Présenté par :*

**BOUATIA Mohammed**

**Promotion 2015**

*Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics. Garidi. Kouba.*

## REMERCIEMENTS

*Je remercie le Dieu qui m'a orienté vers le chemin du savoir et les portes de la science. Je tiens à remercier vivement tous ceux qui m'ont aidé à l'élaboration de ce mémoire ; je pense particulièrement à :*

- Pr. DERRICHE, mon encadreur, qui m'a accompagné tout au long de ce travail, pour son écoute attentive et ses précieux conseils qui m'ont orienté et amélioré mon travail.*
- Aux membres de jury qui ont accepté de valider ce travail.*
- Ainsi qu'à tous les professeurs et les docteurs d'ENSTP que j'ai eu tout au long de notre cycle.*

*Enfin, je remercie toute personne qui m'a aidé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.*

# *MOHAMMED*



## Dédicace

*Je dédie ce travail à :*

*A ma très chère mère*

*Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.*

*Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Je t'aime maman*

*A mon très cher père MESSAOUD*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour toi. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.*

*A mes chers sœurs : Ahlam, Hassina.*

*A mon très cher frère : AMEUR.*

*A mes frères, collègue, camarades, les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous.*

*A tous les chers amis qui sont dans mon cœur.*

*A ma grande famille.*

*A tous mes professeurs du primaire à la dernière année universitaire. Et en fin à tous ceux qui occupent une place dans mon cœur.*

# Mohammed

### Résumé :

La conception des chaussées se fait, pour chaque lancement de la réalisation d'une route, par rapport à une durée de vie pour prendre en considération le chargement due au trafic pendant cette durée de vie.

La détermination de la durée de vie résiduelle est très importante dans la programmation des solutions d'entretien de l'infrastructure routière, cette durée est fonction de deux grands facteurs qui sont :

1. Le niveau de chargement : c'est une fonction de plusieurs variables à savoir le TJMA, le pourcentage de TPL, le taux d'accroissement ( $\mathbb{T}$ ), ainsi le coefficient d'agressivité (A). En Algérie la charge de référence est l'essieu 13 tonnes.
2. La capacité portante de la chaussée existante : c'est une fonction des caractéristiques mécaniques qui réside dans les couches constituantes de la chaussée à savoir les modules de rigidités ( $E_i$ ), et les coefficients de Poisson ( $\nu_i$ ).

La problématique de la durée de vie résiduelle est dans le deuxième facteur qui nécessite la détermination des modules élastiques ( $E_i$ ) résiduelle des différents matériaux constituants de la chaussée. Parmi les méthodes utilisées on trouve ce qu'il s'appelle les méthodes non destructives qui se basent sur le principe le très célèbre de la physique « action/réaction ». Dans la mécanique des chaussées le passage d'une charge roulante sur la surface d'une chaussée est l'action, implique une réaction par un champ de déplacement surfacique qui s'appelle le bassin de déflexion.

Plusieurs méthodes de détermination et d'enregistrement de la réponse d'une chaussée existe, parmi les on cite le déflectomètre Lacroix chez les français et actuellement le Falling Weight Deflectometer (FWD) d'origine Danois, cet appareil qui offre l'enregistrement de la réponse des chaussées en variant plusieurs facteurs à savoir :

1. Amplitude de chargement.
2. Fréquence de chargement.
3. Etendu de contrôle d'enregistrement du bassin de déflexion qui peut aller jusqu'au 1.8 mètres.

L'exploitation de principe d'action/réaction et l'apparition de l'idée de la durée de vie résiduelle oriente les chercheurs à travailler sur ce qu'il s'appelle le calcul inverse des modules de rigidité. Cette technique est basée sur le principe de confondre les résultats calculée avec celles qui sont mesurées en utilisant la technique de l'itération en variant les modules de rigidité.

Le présent mémoire vise à définir une méthode de détermination de la durée de vie résiduelle d'une chaussée routière en exploitant les résultats donnés par ELMOD6 qui caractérise la capacité portante de la chaussée. L'introduction de ces résultats dans ALIZE LCPC donne les résultats des déformations sous la charge de référence de conception. L'exploitation des données de trafic, et ces les résultats des déformations calculées donnent la durée de vie de la chaussée.

## Résumé

---

On aborde dans ce mémoire les aspects des renforcements des chaussées routières axés sur le principe de l'auscultation non destructive des chaussées. On utilise ici le principe d'auscultation par le Falling Weight Deflectometer. Une présentation de la démarche suivie est citée dans ce mémoire, et on illustre tout le processus par l'étude d'un exemple.

Un démarrage avec les données de la déflexion données par le HWD du CTTP puis l'exploitation des résultats par ELMOD6 pour extraire les modules des couches. A la fin, on se base sur le module de rétro calcul ALIZE LCPC pour parvenir à la durée de vie résiduelle de la chaussée.

**Table des matières :**

Introduction générale :	1
<b>I. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	
I.1 Mécanique de chaussée et l'auscultation non destructive :	4
I.2 FWD et l'auscultation non destructive :	4
I.3 FWD et la durée de vie résiduelle :	6
<b>II. FONCTIONNEMENT DE LA CHAUSSEE ROUTIERE</b>	
II.1 Définition d'une chaussée :	8
II.2 Familles des structures de chaussées :	8
II.2.1 Chaussées souples :	8
II.2.2 Chaussées bitumineuses épaisses :	8
II.2.3 Chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques :	9
II.2.4 Chaussée à structure mixte :	9
II.2.5 Chaussée en béton de ciment :	9
II.3 Contraintes et déformations dans les chaussées :	10
II.3.1 Vitesse et fréquence de chargement :	10
II.3.2 Déformations sous charge roulante :	10
II.4 Mode de fonctionnement des chaussées sous le trafic :	11
II.4.1 Chaussées souples :	11
II.4.2 Chaussées bitumineuses épaisses :	11
II.4.3 Chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques :	12
II.4.4 Chaussée à structure mixte :	12
II.4.5 Chaussée en béton de ciment :	12
<b>III. PRESENTATION DU DEFLECTOMETRE A MASSE TOMBANTE FWD</b>	
III.1 La déflexion :	14
III.2 Historique du FWD (Falling Weight Deflectometer) :	14
III.3 Déflectomètre à masse tombante :	17
III.4 Constituants d'un FWD :	18
III.4.1 Plaque de chargement :	18
III.4.2 Transmission de la charge :	19
III.4.3 Les Capteurs :	19
III.4.4 Les Géophones :	19
III.4.5 Disposition des capteurs :	20
III.5 Normalisation des déflexions :	21
III.6 Charge d'essai :	21
III.7 Mesure des températures :	22
III.8 Vérification des mesures de déflexions sur sites :	22
III.9 Sectionnement du projet :	23
III.10 Exploitation des résultats :	24
III.11 Sommaire des paramètres existants :	24
III.12 Modélisation de la structure de chaussée :	24
III.13 Précision des épaisseurs des couches :	25
III.14 Condition d'arrêt :	25
III.15 Repérage des points de test :	26
III.16 FWD et types de chaussée :	26

<b>IV. INTERPRETATION DES RESULTATS DE FWD</b>	
IV.1.	Principe de la Backcalculation des modules rigidité : ..... 28
IV.2.	Equations de Boussinesq : ..... 28
IV.3.	Méthode des épaisseurs équivalentes d'Odemark : ..... 28
IV.4.	Module de surface $E_0$ : ..... 30
IV.5.	Algorithme de la Backcalculation : ..... 30
IV.6.	Traitement d'un exemple : ..... 32
IV.6.1	Définition du projet : ..... 32
IV.6.2	Situation climatique : ..... 32
IV.6.3	Géométrie de la chaussée : ..... 32
IV.6.4	Donnée de la structure de chaussée existante : ..... 33
IV.6.5	Donnée de trafic : ..... 34
IV.6.6	Calcul des déformations admissibles pour la durée de vie du futur renforcement : ..... 34
IV.7.	Résultats du FWD : ..... 35
IV.7.1	Déflexions : ..... 35
IV.7.1.1	Les déflexions mesurées par le FWD : ..... 35
IV.7.1.2	Différences accumulées des déflexions mesurées par le FWD : ..... 36
IV.7.2	Module de surface $E_0$ et $E(r)$ : ..... 37
IV.7.2.1	Calcul manuel de module de surface : ..... 37
IV.7.2.2	Calcul de module de surface par ELMOD6 : ..... 38
IV.7.2.3	Différences accumulées des modules de surface : ..... 39
IV.7.3	Modules des couches de la structure : ..... 40
<b>V. DÉTERMINATION DES MODULES DE RIGIDITÉ PAR CALCUL INVERSE ELMOD6</b>	
V.1	Définition et principe du programme ELMOD6 ..... 43
V.2	Loi de fatigue des matériaux : ..... 44
V.3	Épaisseurs des couches : ..... 45
V.4	Calcul des modules de rigidité : ..... 45
V.4.1	Auscultation de la sous-section de la chaussée : ..... 45
<b>VI. DÉTERMINATION DE LA DURÉE DE VIE RÉSIDUELLE DE LA CHAUSSEE CHOISIE ALIZE.LCPC</b>	
VI.1	La durée de vie de futur renforcement : ..... 49
VI.2	Calcul de la durée de vie résiduelle : ..... 49
VI.3	Formules de calcul du TCEi : ..... 49
VI.4	Résultats de calcul du N : ..... 51
VI.4.1	Définition et principe ALIZE : ..... 51
VI.4.2	Principe de calcul et introduction de données : ..... 51
VI.4.3	Calcul des déformations par ALIZE III : ..... 52
VI.4.4	Calcul manuel de N : ..... 52
VI.4.5	Calcul de N par le logiciel ALIZÉ : ..... 52
VI.4.5.1	Sollicitation verticale : ..... 52
VI.4.5.2	Sollicitation horizontale : ..... 54
Conclusion générale :	..... 56
Annexe :	..... 58
Les résultats du FWD des déflexions sens aller :	..... 58
Les résultats du FWD des déflexions sens retour :	..... 60

**Liste des figures :**

Figure II-1: schématisation d'une chaussée souple.....	8
Figure II-2: schématisation d'une chaussée bitumineuse épaisse .....	9
Figure II-3: Schématisation d'une chaussée à assise traitées aux liants hydrauliques.....	9
Figure II-4: schématisation d'une chaussée à structure mixte.....	9
Figure II-5: schématisation d'une structure en béton de ciment surmonte une couche de matériaux non traité.....	10
Figure II-6: déformation longitudinale en bas d'une couche bitumineuse lors d'un passage d'un poids lourds (DIFFINÉ, 1998).....	11
Figure III-1: schéma d'un bassin de déflexion (LACHANCE, 1999).....	14
Figure III-2: Utilisation des FWD (COST 336, 1999).....	15
Figure III-3: Old FWD of the TU-Delft (1978) avec S-Shape Springs and 3 géophones (COST 336, 1999).....	15
Figure III-4: Phønix FWD avec S-Shape Springs (COST336, 1999).....	16
Figure III-5: Phonix FWD-trailer avec Dynatest électroniques (COST336, 1999).....	16
Figure III-6: photo du HWD du CTPP avec le véhicule tracteur (photo : MABROUKI, 2014).....	17
Figure III-7: schéma de modélisation du fonctionnement du FWD (Werckler, 2010)...	18
Figure III-8: Plaque de chargement segmentée en deux compartiments.....	18
Figure III-9: Capteurs de déplacement type (géophone) [5].....	19
Figure III-10: Capteurs de déplacement type (sismomètre) [5].....	19
Figure III-11: configuration des positions des géophones.....	20
Figure III-12: Les composants d'un déflectomètre à masse tombante.....	21
Figure III-13: Présentation graphique des mesure des températures sur le long des points de test.....	22
Figure III-14: vérification des mesures des déflexions in situ.....	23
Figure III-15: Exemple de sectionnement donné par ELMOD6.....	23
Figure III-16: modélisation pour l'auscultation d'une structure de catalogue algérien RP1-TPL4 GB/GNT.....	25
Figure III-17: repérage des points de test (M.L.NGUYAN, 2011) .....	26
Figure III-18: FWD et types de structure (Wurckler, 2010).....	26
Figure IV-1: principe des hauteurs équivalentes d'Odemark.....	30
Figure IV-2: analyse du bassin de déflexion (KEBAILI, 2010).....	30
Figure IV-3 : algorithme de la Backcalculation.....	31
Figure IV-4: Situation géographique du projet de la RN01 Médéa.....	32
Figure IV-5 : Profils des déflexions des neufs géophones sur le long du sens aller.....	35
Figure IV-6 : Profils des déflexions des neufs géophones sur le long du sens retour ....	36
Figure IV-7: différence accumulée de la déflexion du sens aller.....	36
Figure IV-8 : différence accumulée de la déflexion du sens retour.....	37
Figure IV-9 : présentation du point de test 12 du sens aller .....	37
Figure IV-10 : Modules de surface (station 12 sens aller) donnée par ELMOD6.....	38
Figure IV-11: modules de surfaces du sens aller.....	38
Figure IV-12: modules de surface du sens retour.....	39
Figure IV-13: différence accumulée des modules de surface sens aller.....	39
Figure IV-14: différence accumulée des modules de surface du sens retour .....	40



Figure IV-15 : les modules de la structure sens aller.....	40
Figure IV-16 : les modules de la structure sens retour. ....	41
Figure IV-1: principe des méthodes de calcul Boussinesq et Odemark (M.L.Nguyan). 44	
Figure V-2: présentation graphique (ELMOD6) des épaisseurs des couches données par GPR.....	45
Figure V-3 : les déflexions de la sous-section .....	46
Figure V-4: déflexion accumulée de la sous-section .....	46
Figure V-5: module des couches de la section .....	47
Figure V-6: Module de rigidité des couches de la section en différence accumulée.....	47
Figure VI-1: Etapes de calcul du TCEi.....	50
Figure VI-2: modélisation de la structure dans ALIZE LCPC. ....	51
Figure VI-3: Résultat de calcul des déformations par ALIZE LCPC.....	52
Figure VI-4 : données de calcul de la durée de vie résiduelle vis-à-vis la sollicitation verticale. ....	53
Figure VI-5 : calcul de la durée de vie résiduelle par ALIZÉ rétro-calcul.....	53
Figure VI-6 : Données de calcul de la durée de vie résiduelle vis à vis la sollicitation horizontale.....	54
Figure VI-7 : Calcul de la durée de vie résiduelle par ALIZÉ rétro-calcul .....	55

**Liste des tableaux :**

Tableau III-1: différent dispositions de 6 capteurs en fonction de d0. ....	20
Tableau III-2: sommaire des paramètres existant (Grenier, 2007). ....	24
Tableau IV-1: caractérisation du projet .....	33
Tableau IV-2 : épaisseurs des couches obtenues par le GPR du CTTT. ....	33
Tableau IV-3 : les données de trafic .....	34
Tableau IV-4 : résultat de calcul de trafic.....	34
Tableau IV-5: Calcul des déformations admissibles .....	35
Tableau IV-6: Calcul manuel des modules de surface (Sens aller /station 12 drops 2) .	37
Tableau V-1: Performances des matériaux bitumineux (catalogue de dimensionnement algérien).....	45
Tableau V-2 : valeurs moyennes de la déflexion sous chaque géophone le long de la sous-section.....	46
Tableau V-3: valeurs moyenne des modules de rigidité de la section choisie. ....	47
Tableau VI-1: calcul manuel de la durée de vie résiduelle.....	52
Tableau VI-2 : résultats de calcul de la durée de vie résiduelle.....	55

### **Introduction générale :**

La politique de développement durable et l'économie poussent l'entretien des routes vers l'exploitation des matériaux déjà utilisés le plus possible pour la protection des ressources d'un côté et l'économie des deniers de l'Etat de l'autre côté. Dans ce but la valorisation des chaussées existantes est primordiale, pour connaître la capacité portante résiduelle afin de guider la décision d'entretenir les structures de chaussées en prenant en considération la capacité de l'ancienne chaussée appelée à participer dans le nouveau projet.

Le thème de ce mémoire est **la présentation d'une méthode de détermination de la durée de vie résiduelle d'une chaussée routière**. Elle propose comme objectif un approfondissement de la formation de l'étudiant dans le domaine de la mécanique des chaussées abordée dans le TFE. La réalisation de ce travail est appuyée sur un stage pratique effectué au niveau de l'organisme national de Contrôle Technique des Travaux Publics (CTTP).

Pour illustrer le travail, on a traité l'exemple d'une section d'environ 3.9 km sur la route nationale RN01 situé au niveau de la wilaya de Médéa pour lequel on a réalisé ce qui suit :

1. L'acquisition des résultats par le HWD du CTTP.
2. Le traitement et l'introduction des données.
  - Lois de fatigue des matériaux bitumineux.
  - Epaisseurs des couches obtenues par le GPR du CTTP.
  - Nature des interfaces entre les couches par les carottages réalisées in situ.
3. La présentation des résultats obtenus par ELMOD6 du CTTP le long des deux sens, sous forme des courbes :
  - Déflexions.
  - Modules de surface.
  - Modules élastiques des différentes couches E1, E2, E3.

La détermination de la durée de vie résiduelle est continue sur la section de les premières 400 m du sens retour en allant des modules de rigidités ( $E_i$ ) tirées de ELMOD6 et passant par les deux étapes suivantes :

1. L'introduction des données de trafics.
2. Le calcul des déformations sous la charge de référence par ALIZE LCPC.

La dernière étape de ce mémoire consiste à introduire les résultats de calcul des déformations tirées d'ALIZE LCPC dans les formules de retro calcul de la durée de vie résiduelle selon deux étapes :

1. Calcul du  $TCE_i$ .
2. Détermination du nombre d'année N.

Les formules de calcul de  $TCE_i$  et de N sont préparées en utilisant toutes les instructions citées dans les trois fascicules du catalogue algérien de dimensionnement des chaussées neuves. Une vérification des résultats de calcul de nombre d'années est faite par le module de rétro-calcul ALIZE LCPC retro calcul montre la fiabilité de la formule.

La détermination de la durée de vie de la chaussée N nécessite une comparaison entre les durées de vie associée à chaque matériau pour décider la durée de vie critique qui est la durée

## Introduction générale

---

la plus petite. A la fin le présent mémoire est un outil guide de détermination de la durée de vie résiduelle des chaussées pour les projets d'entretien des routes.

Le mémoire, est structuré selon en cinq (05) chapitres. Le premier chapitre est consacré au fonctionnement des chaussées sous le trafic. Le deuxième chapitre contient une présentation du FWD avec ces divers composants. Le troisième et le quatrième font l'objet de la détermination de la capacité portante de la chaussée existante par le biais d'ELMOD6. Et finalement le cinquième chapitre, qui contient le fruit de ce travail, pour la détermination de la durée de vie résiduelle de la chaussée auscultée.

# **I. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE**



## **I.1 Mécanique de chaussée et l'auscultation non destructive :**

Le domaine de mécanique des chaussées est un domaine des travaux publics, et parmi les sous domaine qui appartiennent à la mécanique des chaussées est l'auscultation non destructive qui est un processus qui se base sur le principe le plus célèbre de la physique « action/réaction » dans lequel l'intégration de ce principe se fait on considérant le passage d'un véhicule comme action et la réponse de la chaussée représenté par un bassin de déflexion comme la réaction.

Comme on a dit l'analyse de la réponse de la chaussée a auscultée par un bassin de déflexion enregistré peut donner la capacité portante de la chaussée auscultée. Plusieurs appareils d'enregistrement de la déflexion sont dans le marché des travaux publics parmi lesquelles on cite le déflectomètre Lacroix, la poutre de Benkelman. Il a été mis au point par M. J. Lacroix, en 1956, Ingénieur des Ponts et Chaussées en intégrant la poutre Benkelman à un camion pour mesurer la déflexion sous essieux lourds des chaussées. Le but de cette innovation était de mesurer la déflexion plus rapidement et avec plus de points qu'avec la poutre Benkelman. La direction des Ponts et Chaussées perçoit rapidement l'intérêt du déflectographe Lacroix pour les mesures de déflexions de la chaussée à grande échelle et à grand rendement, et collabore à la construction d'un second appareil prototype en 1961. Le déflectographe Lacroix subit dans les 30 années suivantes plusieurs modifications plus ou moins importantes.

## **I.2 FWD et l'auscultation non destructive :**

Un appareil très récent rentre dans la concurrence avec les autres appareils qui est la Falling Weight Deflectomètre FWD. Les FWDs existent en deux versions selon la charge appliquée donc selon les contraintes appliquées, les deux versions sont les suivantes :

1. Heavy Falling Weight Deflectometer HWD : qui est le plus lourds des deux versions. Il nous a permis de simuler la charge appliquée par une roue d'un avion en Algérie il existe deux déflectomètre (HWD de CTPP de Alger et HWD de LTP Sud de Ghardaïa).
2. Falling Weight Deflectometer FWD : qui est la version légère de la première version. Elle est utilisée dans l'auscultation des chaussées routières.

En 1965, M. BRETONNIERE publie dans le Bulletin de Liaison des Laboratoires Routiers un article intitulé «Etude d'un déflectomètre à boulet» qui décrit pour la première fois le principe de mesure d'un déflectomètre {masse tombante (Falling Weight Deflectometer). Cette appareil est ensuite repris et optimisé {l'Université Technique de Danemark. En France le développement du FWD a été arrêté au profit du déflectographe Lacroix. Les premiers appareils étaient produits à la fin des années 60. Aujourd'hui ils sont équipés de 9 à 15 géophones mesurant le bassin de déflexions, un capteur de force relevant la charge sous la plaque et des poids qui permettent, en changeant la hauteur de chute, d'atteindre une charge variant de 7 à 120 kN (FWD) ou de 30 à 240 kN (Heavy Weight Deflectometer). Aujourd'hui plus de 500 déflectomètre FWD/HWD sont en service (WURCKLER).

Pour le domaine d'auscultation non destructive des chaussées routière monsieur GRENIER a dit que l'évaluation de la condition structurale des routes est primordiale pour la gestion des chaussées et la prédiction de leur performance. Des méthodes non destructives d'essais dynamiques sont généralement préconisées pour évaluer la capacité structurale des chaussées en raison de leur efficacité. Parmi ces méthodes, le déflectomètre à masse tombante

(FWD) est actuellement l'appareil le plus utilisé. La problématique d'évaluation de la condition structurale des routes avec le FWD réside dans l'exactitude de l'analyse des mesures de déflexion et la prédiction du comportement structural des chaussées soumises aux charges dynamiques du trafic que l'appareil est supposé de reproduire. L'analyse de ces essais est habituellement réalisée par des méthodes statiques où le mode de chargement statique est non représentatif des conditions de chargement dynamique du FWD. Ainsi, différentes méthodes dynamiques ont été développées pour l'analyse des essais FWD.

Deux approches pour le calcul des modules de rigidités existent, un est la statique comme dans le cas des déflectomètre Lacroix, le deuxième est la dynamique effectuée par l'essai non destructif FWD.

GRENIER a dit qu'il a été montré que les modules obtenus selon la méthode statique diffèrent des modules tirés de la méthode dynamique. Les différences les plus importantes, jusqu'à 300 % d'écart, surviennent au niveau du module du sol. Les modules de la méthode dynamique se rapprochent davantage aux valeurs mesurées in situ par des essais cross-hole ou en laboratoire. La valeur des modules de même que le mode de chargement considéré, statique ou dynamique, ont une influence sur la distribution des contraintes et des déformations verticales ainsi que sur la contribution des couches aux déflexions. Les résultats expérimentaux obtenus avec le FWD indiquent que la méthode statique sous-estime de 20 à 40 % leur valeur des déformations verticales maximales en compression dans le sol au niveau de la ligne d'infrastructure, comparativement aux valeurs prédites par la méthode dynamique.

Le calcul des modules de rigidité d'une structure ausculté par la méthode non destructive est fait en utilisant le principe des itérations sur les modules de rigidité de chaque couche jusqu'à l'obtention d'un calage représentatif entre l'un des deux critères suivants :

1. Rayon de courbure.
2. Bassin de déflexion.

Le sol support est très important dans la constitution de la plateforme, le dimensionnement des chaussées, ainsi que le grand rôle qui il peut jouer le long de la durée de vie de la structure de chaussée. La connaissance des propriétés géotechniques des sols est un élément essentiel pour l'analyse et l'interprétation des essais FWD (GRENIER).

Le comportement des matériaux est un facteur très important dans la modélisation des structures lors du processus de rétro calcul des modules de rigidités des couches constituantes des structures de chaussée. GRENIER a dit que l'un des intérêts majeurs de la méthode dynamique pour l'analyse des essais FWD sur les chaussées flexibles réside dans sa capacité à prendre en compte le comportement viscoélastique de l'enrobé bitumineux. L'interprétation des essais FWD avec cette méthode a d'ailleurs permis de déterminer la courbe maîtresse de l'enrobé bitumineux à partir des essais FWD réalisés sur la planche d'essai. Ce qui démontre l'existence d'un lien étroit entre les mesures in situ du FWD et les résultats des essais de flexion à chargements répétés effectués en laboratoire.

Après la fin de leurs études sur le calcul inverse des modules de rigidités GRENIER a dit que « En somme, les modules obtenus selon l'approche dynamique permettent de mieux représenter les historiques de déflexions du FWD. De plus, la comparaison des historiques de déflexions calculés et mesurés indiquent, en raison de leur similitude compte tenu que les écarts relatifs absolus sont généralement inférieurs à 10%, que l'utilisation d'un module élastique linéaire équivalent est suffisante pour l'interprétation des essais FWD avec la méthode

dynamique, pourvu que les effets non linéaires ne soient pas importants. Une telle analyse peut donc être effectuée avec un modèle multicouche axisymétrique en considérant une loi de comportement élastique linéaire ».

De plus analyses des bassins des déflexions est basée sur le principe de la contribution de chaque couche dans la capacité portante de la structure à ausculter. GRENIER à montrer la dépendance de cette contribution de chaque couche dans la capacité portante globale et il a dit dans la conclusion de leur mémoire de Ph.D que « Un autre élément important pour l'interprétation des essais FWD est la contribution des différentes couches de la chaussée au bassin de déflexion. Cette contribution dépend évidemment de la rigidité de chaque couche de la chaussée et de la profondeur à laquelle elle se situe, mais aussi du mode de sollicitation et de la distance radiale où la déflexion est mesurée. Ainsi, il a été montré qu'en raison de la nature dynamique de l'essai FWD, seules les couches situées entre 0 et 3.5 m de profondeur contribuent significativement aux déflexions maximales mesurées.

Parmi les chercheurs qui ont travaillé sur le calcul non destructif des modules on trouve BROUTIN. Qu'il a dit que « l'expérience menée sur la chaussée instrumentée a montré une corrélation plutôt satisfaisante entre les déformations calculées et mesurées par les jauges ».

### **I.3 FWD et la durée de vie résiduelle :**

WURCKLER a dit que les mesures de déflexion fournies par le FWD servent de base à une évaluation de la capacité portante de la structure auscultée. Parmi les problèmes qui servent cet essai d'auscultation non destructif à résoudre est qu'elle puisse nous donner la durée de vie résiduelle d'une chaussée routière. Cette durée recherchée qui fait intégrer l'aspect du développement durable dans le domaine de la mécanique des chaussées est très utile pour la valorisation des matériaux de la chaussée existante, de plus l'économie des deniers de l'état.

# **II. FONCTIONNEMENT DE LA CHAUSSEE ROUTIERE**

## II.1 Définition d'une chaussée :

La chaussée est une succession de plusieurs couches, C'est une structure multicouche qui sert à atténuer les contraintes en allant de la surface vers le sol support. Il existe plusieurs types de structures de chaussée dont le choix dépend de plusieurs critères comme le trafic, les caractéristiques des matériaux constituant les couches, les conditions climatiques, la portance du sol support. Ces critères sont déterminants pour pouvoir connaître les sollicitations prépondérantes et décider la meilleure structure.

## II.2 Familles des structures de chaussées :

Les structures de chaussées se classent en général par leur mode de fonctionnement en cinq familles (conception et dimensionnement des structure de chaussées SETRA).

- Souples,
- Bitumineuses épaisses,
- Assises traitée aux liants hydrauliques,
- Structures mixtes,
- En béton de ciment.

### II.2.1 Chaussées souples :

Les chaussées souples sont des chaussées constituées par une couche de surface en matériaux bitumineux qui recouvre une couche d'assises en matériaux non traités (la couche de surface est en général de hauteur inférieure à 12cm). (Fig.II.1)

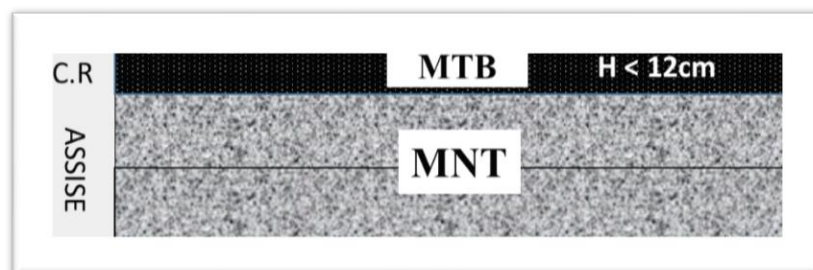


Figure II-1: schématisation d'une chaussée souple.

### II.2.2 Chaussées bitumineuses épaisses :

Elles sont des chaussées dont l'assise (couche de base et fondation) est constituée totalement en matériaux bitumineux, et dont l'épaisseur totale des matériaux bitumineux dépasse 12cm qui est la limite supérieure dans les chaussées souples. (Fig.II.2)



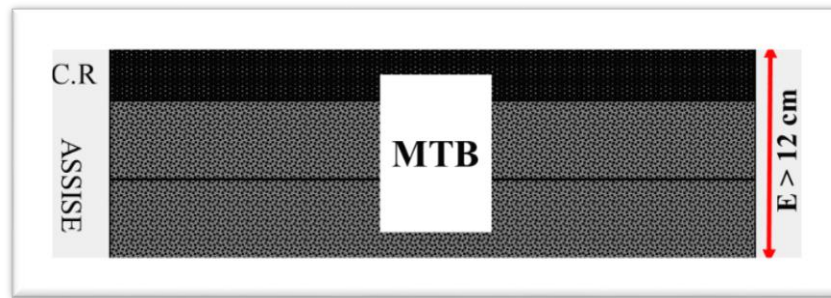


Figure II-2: schématisation d'une chaussée bitumineuse épaisse

### II.2.3 Chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques :

Ce sont des chaussées dont l'assise est constituée par un matériau traité aux liants hydrauliques qui est surmontée par une couche de surface en matériaux bitumineux. Elles sont classées sous la famille semi-rigide dont l'épaisseur totale est de l'ordre de 20 à 50cm. (Fig. II.3)

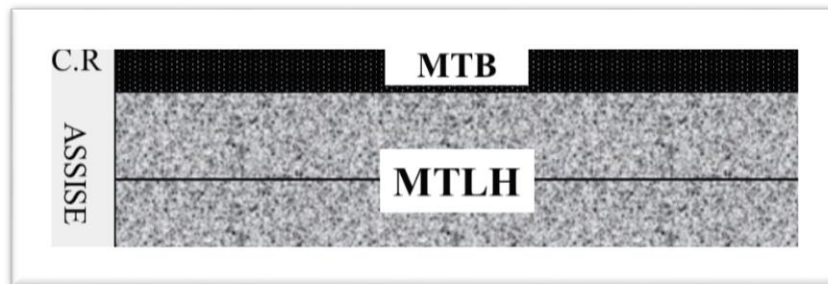


Figure II-3: Schématisation d'une chaussée à assise traitées aux liants hydrauliques.

### II.2.4 Chaussée à structure mixte :

Ce type de structures se divise en deux types de matériaux ; bitumineuse pour les deux premières couches surface, base, et matériaux traités aux liants hydrauliques pour la couche de fondation. Le rapport entre les épaisseurs des deux types de matériaux est proche de 1. (Fig. II.4).

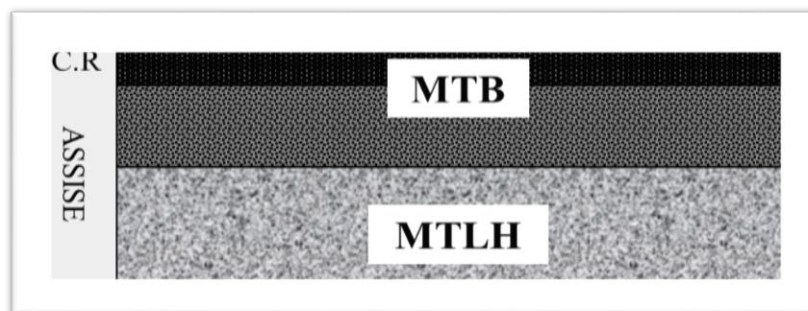


Figure II-4: schématisation d'une chaussée à structure mixte.

### II.2.5 Chaussée en béton de ciment :

Les chaussées en béton de ciment sont des structures constituées par une couche de béton de ciment recouverte par une couche mince de roulement avec un matériau bitumineux.

La couche de béton repose soit sur le sol support directement ou bien sur une couche de fondation en matériaux non traités (Fig.II.5).

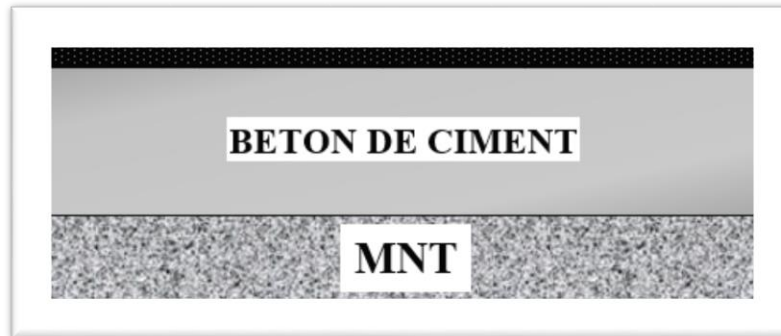


Figure II-5: schématisation d'une structure en béton de ciment surmonte une couche de matériaux non traité.

### II.3 Contraintes et déformations dans les chaussées :

#### II.3.1 Vitesse et fréquence de chargement :

Du à leurs caractéristiques les enrobés bitumineux ont un comportement liées directement à la fréquence de sollicitation. Il a été démontré que la vitesse d'un véhicule est directement liée à cette fréquence de sollicitation par la formule suivante (DIFFINE, 2012)

$$f = 0.45 \times V$$

f: fréquence(Hz).

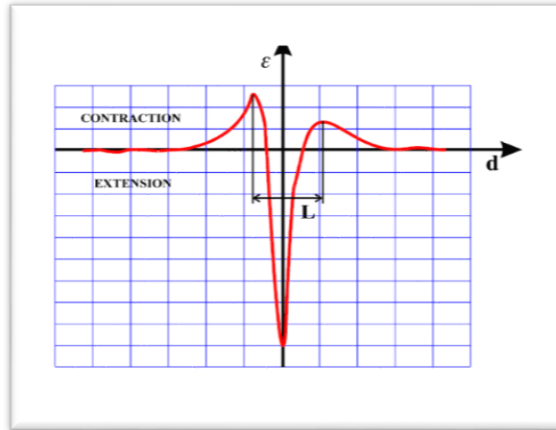
V: vitesse du véhicule (km/h).

#### II.3.2 Déformations sous charge roulante :

L'application d'une charge sur une chaussée provoque des contraintes de compression et de traction dans les couches d'enrobé, le bas de la couche subit une traction alors que le haut est comprimé (NGUYEN 2009).

Lorsque la charge est en mouvement, comme dans le cas d'une roue, et se dirige vers un point de mesure situé en bas de couche, Cette dernière subit une déformation horizontale de type contraction/extension/contraction comme montré dans la figure I.6. Dans le sens longitudinal dû à l'approche, au passage et à l'éloignement de la roue. Les déformations transversales sont quant à elles uniquement des extensions pour l'ensemble du passage de la roue (DIFFINE, 2012).

Une légère dissymétrie s'observe également dans le profil de déformation transversal, où le retour à l'état de repos après le pic d'extension est plus lent. L'amplitude maximale de la déformation se produit lorsque la charge est à la verticale du dispositif de mesure et elles sont égales dans les deux directions longitudinales et transversales (Perret, 2003).



**Figure II-6: déformation longitudinale en bas d'une couche bitumineuse lors d'un passage d'un poids lourds (DIFFINÉ, 1998)**

#### **II.4 Mode de fonctionnement des chaussées sous le trafic :**

Les structures de chaussée sont conçues pour répondre aux objectifs définis mais elles vont se dégrader sous l'action de différents facteurs qui peuvent être classés en trois catégories :

1. extérieurs à la chaussée ;
2. liés à la structure elle-même, à ses défauts de conception et de réalisation ;
3. liés aux matériaux constitutifs.

Le trafic est le premier des facteurs extérieurs provoquant la ruine des chaussées. Il agit d'une part en sollicitant :

- les couches traitées en traction par flexion et d'autre part,
- les couches non liées (sol support et GNT), par le phénomène de poinçonnement qui provoque des déformations permanentes.

##### **II.4.1 Chaussées souples :**

Ce type de chaussées est très sensibles à l'état hydrique des matériaux d'assises ce qui influe directement sur la rigidité des matériaux, Pour la couche de surface la couche bitumineuse sert à atténuer les contraintes en allant vers l'assise. Elle subit des contraintes de traction par flexion. Le problème qui se pose ici est l'insuffisance d'épaisseur de la couche bitumineuse qui influe directement sur la diffusion latérale des efforts qui résulte en contraintes verticales assez grandes donc des déformations plastiques permanentes.

##### **II.4.2 Chaussées bitumineuses épaisses :**

Les matériaux bitumineux se caractérisent par une grande rigidité et une grande résistance à la traction ce qui permet de diffuser, en les atténuant fortement, les contraintes verticales transmises au sol support. Les efforts induits par les charges roulantes prennent la forme d'une traction par flexion dans les couches bitumineuses. Et la déformation transversale admissible due aux efforts de tractions reste à vérifier au niveau de la base de la dernière couche bitumineuse quand les couches sont collées et au niveau de chaque couche indépendamment quand elles sont décollées.

### II.4.3 Chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques :

Sous l'effet du trafic l'assise de ces chaussées qui se caractérise par une grande rigidité travaille en flexion. Le bas de la couche est sollicité par les grandes contraintes de traction lorsque les deux couches d'assise sont collées sinon chacune d'elles travaille indépendamment par la même sollicitation (traction par flexion en bas), l'avantage de ces structures est que les déformations verticales sont assez faibles.

### II.4.4 Chaussée à structure mixte :

Chaque couche à un rôle différent ; la couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques sert à diffuser et atténuer les efforts transmis au sol support et c'est cette couche qui subit des efforts de traction par flexion en premier temps de vie de la route. Elle offre aussi un support de faible déformabilité pour assurer l'uni qui est le rôle de la couche de surface pour un meilleur niveau de service. Par suite l'action du trafic crée des mouvements relatifs au niveau des interfaces ce qui pousse la vérification des déformations latérales en bas de la couche bitumineuse (Grave Bitume).

### II.4.5 Chaussée en béton de ciment :

Les contraintes engendrées par le trafic sont reprises en flexion par les couches de béton. Les déformations verticales sont moins faibles que celles de chaussées traitées aux liants hydrauliques à cause de la bonne distribution ainsi que l'homogénéité de distribution.

En général, les couches bitumineuses qui sont constitués avec des matériaux liés sont soumises à des sollicitations dues à la traction par flexion (déformation de tension) ce qui gouverne les fissurations de fatigue, Et les couches non liées doivent être vérifiées en terme de déformations verticales qui sont la cause principale de l'orniérage.

**III. PRESENTATION  
DU  
DEFLECTOMETRE A  
MASSE TOMBANTE  
FWD**



### III.1 La déflexion :

C'est le déplacement de la surface de la chaussée provoquée par le passage d'une roue de véhicule. La déflexion est maximale directement sous la charge. Elle diminue en s'éloignant de part et d'autre de la charge. La déflexion décrit un bassin de déflexion.

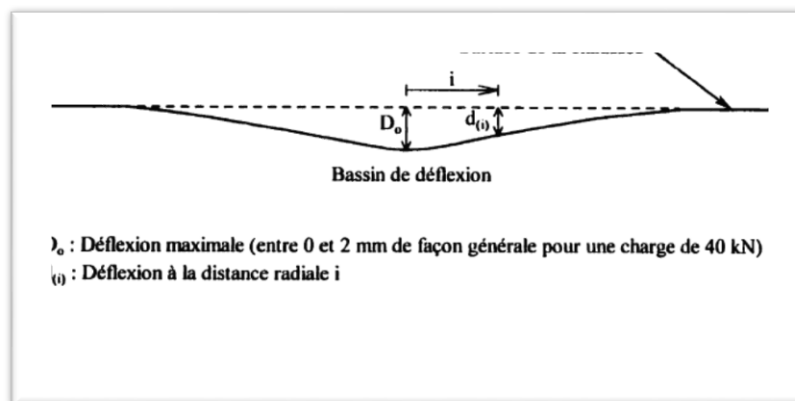


Figure III-1: schéma d'un bassin de déflexion (LACHANCE, 1999).

### III.2 Historique du FWD (Falling Weight Deflectometer) :

Dans les projets de maintenance la connaissance de la capacité portante résiduelle de la chaussée existante est très importante. La capacité portante d'une chaussée peut être évaluée in situ et avec des méthodes indirectes. Pour ce but plusieurs mesures de déflexion ont été utilisées. Puis le passage par des modèles de calcul qui utilisent des différents critères le calcul inverse de la capacité portante d'une chaussée routière sera possible.

La capacité portante dépend du niveau de chargement et de la vitesse de chargement. Les chercheurs tentent de mesurer la capacité portante d'une chaussée, à travers l'exploitation des mesures de déflexion, sous un chargement en mouvement. La mesure de ces déflexions sous un chargement, qui roule à une grande vitesse, est possible.

La poutre de Benkelman est développée dans les années cinquante. Elle mesure des déflexions sous un chargement roulant avec une vitesse lente. Les chercheurs commencent à essayer de trouver des solutions pour mesurer les déflexions sous un court chargement impulsif, pour simuler le trafic à grande vitesse.

L'idée de développer un Falling Weight Deflectometer est apparue en France grâce à un chercheur qui s'appelle DURRIEU (COST336). Mais après un certain temps les Français abandonnent le développement du Falling Weight Deflectometer et continuent le développement de la poutre de Benkelman et le déflectomètre Lacroix.

En 1964, les Danois se basent sur des expériences des Français, ils produisent le premier Falling Weight Deflectometer. Plusieurs modifications ont été effectuées sur le premier FWD, et qui se basent sur des informations obtenues de la France, De nouveaux équipements sont construits à l'université technique du Danemark (GRENIER, 2007).

Dynatest est créé en 1976 sous forme de coopération entre Danish Road Institute et l'université technique du Danemark. Pendant la même période des études similaires sont lancées par KUAB de Suède (BROUTIN, 2007).

Les Hollandais de leur côté lancent plusieurs campagnes d'études pour construire le FWD. En conséquence il existe une variété des FWDs avec leurs méthodes d'interprétation des résultats des déflexions mesurées. Et pour aller vers une harmonisation des équipements et des mesures du FWD ainsi que les méthodes d'interprétation des mesures des déflexions. Les Allemands font installer en 1988 un comité d'étude « Falling Weight Deflectometer Testing » pour résoudre le problème de cette diversité (COST336).

En 1987 Foundation Mechanics, Inc. Commence à produire JILS FWDs aux USA.

Au Japon aussi Komatsu construit un FWD.

A travers le monde, il existe plusieurs producteurs du Falling Weight Deflectometer (FWD), La figure I-1 montre la distribution d'utilisation des FWDs selon les producteurs dans le monde en 1999.

On donne dans les figures I.2 à I.3 des photos d'anciens FWD.

Figure III-2: Utilisation des FWD  
(COST 336, 1999)

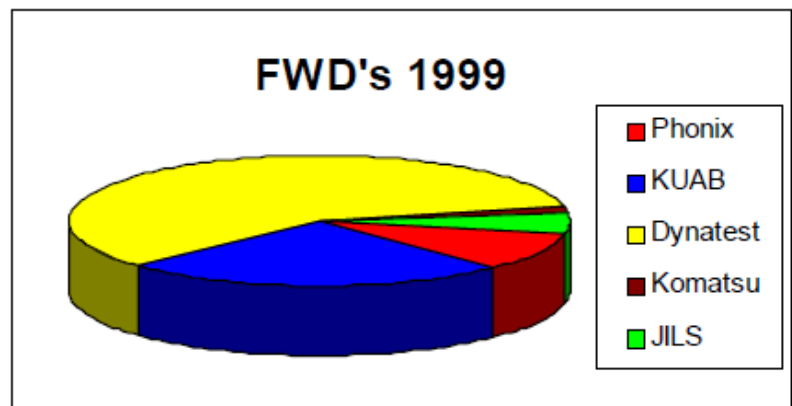


Figure III-3: Old FWD of the TU-Delft (1978) avec S-Shape Springs and 3 géophones (COST 336, 1999).

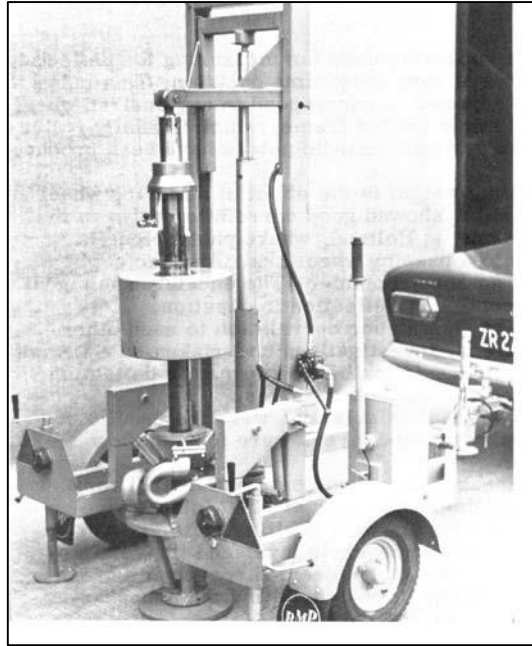


Figure III-4: Phønix FWD avec S-Shape Springs (COST336, 1999)



Figure III-5: Phonix FWD-trailer avec Dynatest électroniques (COST336, 1999).

### III.3 Déflectomètre à masse tombante :

De nos jours le déflectomètre à masse tombante est un appareil qui opère in-situ pour l'auscultation non destructive des chaussées. Il est conçu pour reproduire la charge engendrée par un demi-essieu d'un camion qui circule à 70 km/h (Wurckler, 2010) et à mesurer, lors du passage de cette contrainte, la réponse de la chaussée considérée qui se résume par un bassin de déflexion généré sur la surface. La charge appliquée est reproduite par un disque en contact avec la surface du revêtement.



Figure III-6: photo du HWD du CTPP avec le véhicule tracteur (photo : MABROUKI, 2014).

Il existe plusieurs autres essais qui exploitent aussi la déflexion opérant chacun par son mode de chargement : statique, oscillatoire et transitoire parmi ces essais on cite :

- Statique : essai à la plaque, essai à la poutre de Benkelman.
- Oscillatoire : Dynaflect, essai de plaque dynamique.
- Transitoire : FWD qui mesure les déflexions lors du mouvement de l'essieu.

La FWD (Falling Weight Deflectometer) est conçu pour mesurer le bassin de déflexion provoquée par la chute libre d'une masse tombante, en simulant les caractéristiques du passage d'un poids lourd, sur une plaque de 30 cm de diamètre. Il se compose d'une remorque qui porte le système de chute et la masse tombante ainsi que les capteurs de types géophones. En plus le système informatique pour la mesure, l'enregistrement, l'analyse et le traitement des déflexions détectées sous les capteurs. Ces outils sont dans le véhicule tracteur.

Cet appareil permet d'appliquer des forces qui varient de 7 à 120 kN (Grenier, 2007). A travers une possibilité de variation des hauteurs de 2 à 40 cm. La structure de chaussée testée et la classe de trafic font guider les ingénieurs à décider la hauteur de chute donc la force à appliquer sur la chaussée (Wurckler, 2010).

(H, F)= fonction (Types de Structure, Classe de Trafic)



Figure III-7: schéma de modélisation du fonctionnement du FWD (Werckler, 2010)

### III.4 Constituants d'un FWD :

L'appareil FWD est constitué par deux éléments principaux :

- La Plaques de chargement.
- Les Capteurs.

#### III.4.1 Plaque de chargement :

Le chargement impulsionnel est effectué à l'aide d'une plaque de chargement (loading plate) de 300mm de diamètre qui surmonte un tapis de caoutchouc d'au moins 5mm d'épaisseur pour assurer le bon contact avec la surface de la chaussée et la bonne distribution de la contrainte voulue.



Figure III-8: Plaque de chargement segmentée en deux compartiments.

On doit commencer par un petit chargement pour assurer le contact plaque de chargement-surface de chaussée. On applique ensuite le chargement d'impulsion trois fois en vérifiant que la différence entre deux déflexions successives ne soit pas supérieure à 2 microns, Pour pouvoir juger le vrai comportement de la chaussée.



#### III.4.2 Transmission de la charge :

La transmission de la charge de la masse vers la plaque se fait à travers un ressort dont la raideur permet de contrôler la durée d'application de la charge de telle sorte qu'elle soit égale à la durée de passage d'un poids lourd avec une vitesse qui varie de 50 à 70 km/h. La durée est estimée à 28 ms (Wurckler, 2010) soit environ une fréquence de 34 Hz. ( $f = 1/T$ )

#### III.4.3 Les Capteurs :

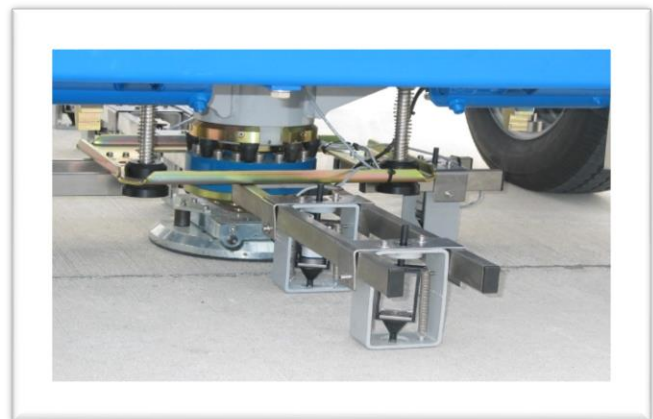
Les capteurs sont des détecteurs de déplacements, de types géophones, couvrant une distance d'environ 2m sont placés longitudinalement avec la route, Un capteur est placé au centre de la plaque dans un petit vide pour mesurer la déflexion maximale. Les déflexions commencent à diminuer en allant vers le capteur le plus loin.

#### III.4.4 Les Géophones :

Les géophones et les sismomètres sont des instruments de captage de déplacement très sensible et précis, on les utilise dans le cas où les mesures des déplacements demandent beaucoup de précisions comme dans les domaines de la géophysique ou les déplacements sont dus au chargement dynamique similaire à ceux d'un séisme. La nécessité de l'utilisation de ces types de capteurs est due à l'ordre de grandeur des déplacements enregistrés lors d'un essai de F/HWD dont l'unité est micromètre ( $10^{-6}$ ).



**Figure III-10: Capteurs de déplacement type (sismomètre) [5].**



**Figure III-9: Capteurs de déplacement type (géophone) [5].**

N.B : Les capteurs utilisés dans le HWD du CTTTP sont de types géophone

### III.4.5 Disposition des capteurs :

En général chaque essai doit être effectué avec au moins 6 capteurs. La disposition des capteurs est liée directement à l'allure du bassin de déflexions (Ce qui est lié directement aux différentes épaisseurs des couches). L'allure du bassin est parabolique autour de la charge donc les capteurs doivent être denses. Elle commence à être linéaire en s'éloignant du centre du chargement vers une valeur nulle de déflexions. La position doit être choisie à partir la gamme suivante : 0, 200, 300, 450, 600, 900, 1200, 1500, 1800, 2100, 2400. Les distances sont en mm.

La figure III.4 montre l'interface du logiciel qui permet de positionner les géophones.

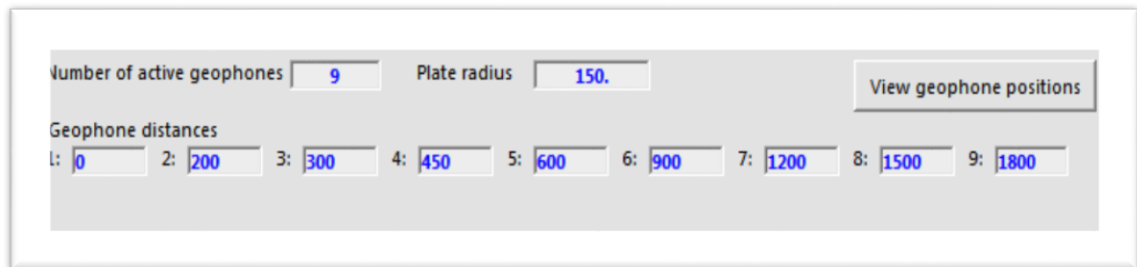


Figure III-11: configuration des positions des géophones.

Si le nombre des capteurs disponibles est de six(06) la disposition conseillée est fonction de la déflexion maximale  $d_0$  sous le centre de la plaque de chargement. Le tableau I.6 résume les différentes dispositions conseillées.

Tableau III-1: différent dispositions de 6 capteurs en fonction de  $d_0$ .

$d_0$ (mm)	Dispositions
<500	0-300-600-900-1500-2100
500< <1000b	0-300-600-900-1500-1800
1000>	0-300-600-900-1200-1500
Valeur inconnue de $d_0$	0-300-600-900-1500-1800

La disposition idéale est de mettre à chaque deux limite d'épaisseur équivalente d'une couche deux capteurs. Elle est proportionnelle, en termes d'espace entre les capteurs, avec la valeur de la déflexion maximale.

Exemple : si la couche de roulement à une épaisseur réelle de 6 cm, et l'épaisseur équivalent est de 20 cm il est idéal de mettre deux capteurs pour les bornes de cette couche dans les deux positions : 0 mm et 200 mm.

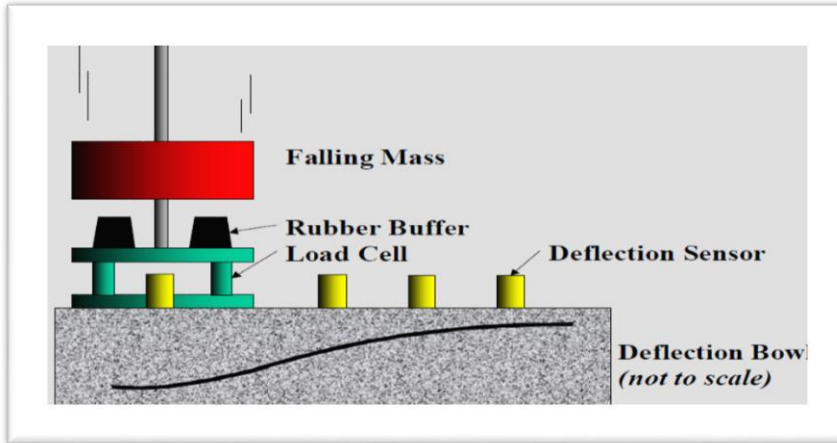


Figure III-12: Les composants d'un déflectomètre à masse tombante.

### III.5 Normalisation des déflexions :

Les valeurs des déflexions mesurées sous la plaque de chargement doivent être soumises à une correction due à la variation de la force de chargement. On introduit un facteur de normalisation qui est un rapport entre la force appliquée réellement et la force théorique de l'auscultation (BROUTIN, 2010).

$$d_n = \left(\frac{F_a}{F_n}\right) \times d_m$$

$d_n$  : Déflexion normalisée.

$F_a$  : Force appliquée.

$F_n$  : Force théorique de normalisation.

$d_m$  : Déflexion mesurée.

### III.6 Charge d'essai :

Les pressions engendrées lors des essais ont été de l'ordre de 920 kPa (plaques de 300mm de diamètre, segmentée en quatre (4) compartiments afin d'épouser la forme du revêtement). Ces pressions sont obtenues moyennant une masse de 500kg tombant d'une hauteur (h) en chute libre. Elles sont choisies afin de créer des charges de l'ordre de 65 kN.

A noter que le chargement est répété plusieurs fois. L'interprétation est faite sur la base des résultats de la dernière chute.

La hauteur de chute (h) qui permet d'engendrer cette charge (p) est calculée automatiquement par le logiciel de contrôle de l'essai en appliquant la formule suivante :

$$h(mm) = \left(\frac{p_{max}}{k}\right)^2$$

Où :

$k$  : Un facteur dépend de la masse tombante, de l'unité de la charge, diamètre de la plaque.



### III.7 Mesure des températures :

La température des couches bitumineuses est mesurée à chaque essai d'auscultation par le FWD pour, premièrement prendre en considération l'effet de la température sur les modules des couches donc automatiquement sur les valeurs des déflexion, et deuxièmement pour la normalisation des modules de rigidité vers une température de référence qui est en générale 20 °C. La figure III.13 montre un graphique de mesure des températures ( air – surface – bitume ).

Durant le déroulement des essais. On procède aux mesures de la température de :

- Température de l'enrobé a la profondeur moyenne de la couche.
- La température de la surface a la surface du revêtement.
- La température de l'air.

La réalisation des trous de mesures de la température de l'enrobé est primordiale, la mesure est effectué à l'aide d'une sonde.

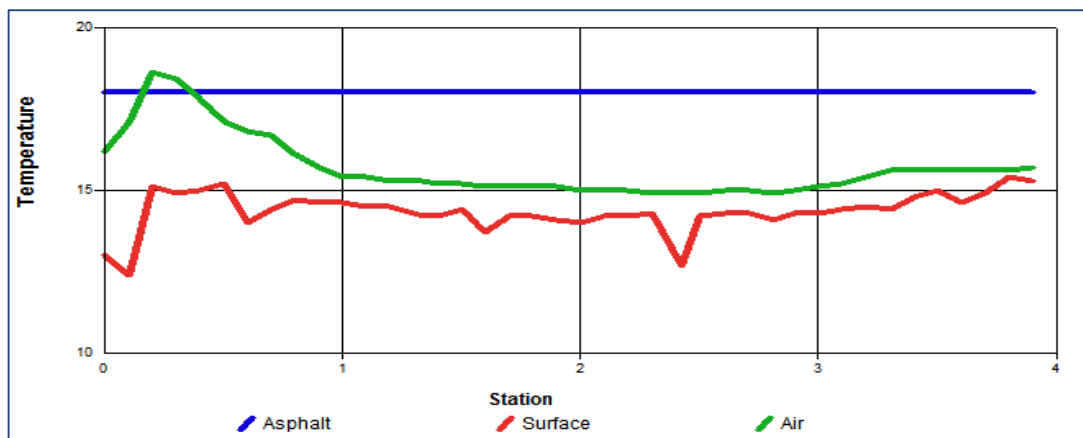


Figure III-13: Présentation graphique des mesure des températures sur le long des points de test.

### III.8 Vérification des mesures de déflexions sur sites :

Trois conditions sont à vérifier par l'opérateur lors de l'essai pour une bonne exploitation des résultats des déflexions de la demi-déformée enregistrée par les capteurs :

- La déflexion mesurée sous le 9<sup>ème</sup> géophone (D9) doit être supérieure à 20 micromètres pour éviter l'erreur de lecture qui commence à être significative en-dessous de cette valeur.
- Les déflexions doivent avoir la forme d'un bassin de déflexion décroissant en allant du premier géophone vers le derniers géophones de l'extérieur.
- La déflexion mesurée sous le premier géophone  $d_0$  doit être inférieure à 2000 micromètres.

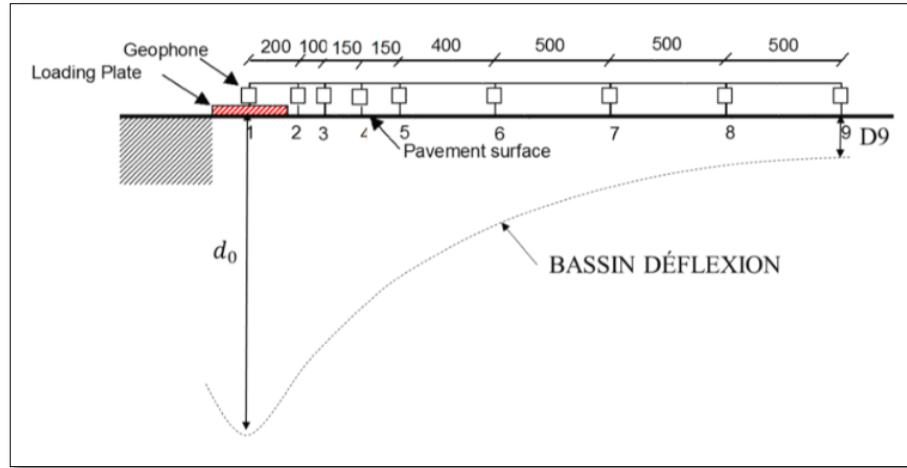


Figure III-14: vérification des mesures des déflexions in situ

### III.9 Sectionnement du projet :

Le sectionnement du projet est fait par la méthode « accumulated difference » citée dans l'annexe (J) de la méthode AASHTO. Pour chaque point, la différence accumulée est calculée par la formule suivante :

$$\sum_{i=1}^N (Y_i - \sigma_s)$$

Telle que :

$Y_i$  : Valeur de la déflexion.

$\sigma_s$  : Moyenne des valeurs de la déflexion de la section considérée.

Les limites des sections uniformes se produisent aux endroits où il y a un changement significatif de la pente de la différence accumulée. Qui est due à un changement de la valeur de déflexion comparativement avec les autres valeurs de déflexions qui conservent la même valeur de différence avec la moyenne des valeurs de la section considérée.

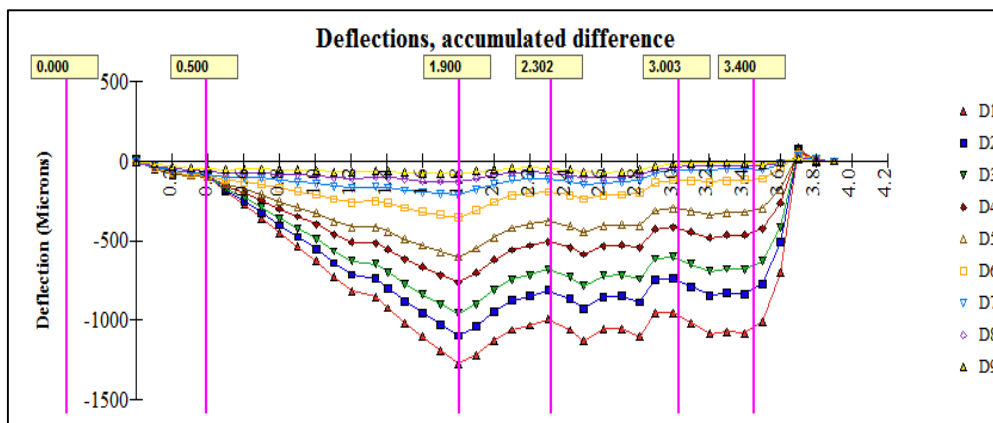


Figure III-15: Exemple de sectionnement donné par ELMOD6.

### III.10 Exploitation des résultats :

Les mesures des déflexions fournies par le FWD jouent un rôle pour l'évaluation de la capacité portante de la structure auscultée. Il existe pour cela des approches permettant une exploitation plus ou moins poussée et qui sont, par degré de sophistication :

1. Calcul de la déflexion déterminante d'un tronçon routier homogène.
2. Calcul du module élastique apparent des couches.
3. Estimation de la durée de vie résiduelle de la structure.
4. Détermination de l'épaisseur de renforcement.

### III.11 Sommaire des paramètres existants :

Plusieurs paramètres peuvent être tirés d'après le bassin de déflexion avec lesquels on tire des informations sur les modules de rigidité des différentes couches constituant de la structure de chaussée, les plus utilisés sont résumés dans le Tableau III-2:

Tableau III-2: sommaire des paramètres existant (Grenier, 2007).

Nom	Formule	Objectif
Déflexion maximale	$d_0$	Condition de la structure totale
Déflexion radiale	$d_r$	Condition de la couche à la profondeur équivalente $r$
Indice de courbure de surface SCI	$d_0 - d_{300}$	Rigidité des premiers 200 mm
Indice de dommage de la base BDI	$D_{300} - d_{600}$	Condition des couches de base.
Indice de courbure de la base BCI	$D_{600} - d_{900}$	rigidité de la couche de fondation
Facteur de courbure du bassin CBF	$(d_0 - d_r) / d_0$	Condition de la couche à la profondeur équivalente $r$
Rapport de déflexion DR	$d_0 / d_r$	Condition de la couche à la profondeur équivalente $r$
Module de rigidité de l'impulsion ISM	$Q_{max} / d_0$	Rigidité globale de la chaussée

Tels que :

$d_0$  : Déflexion sous la plaque de chargement.

$d_r$  : Déflexion à la distance  $r$  du centre de la plaque de chargement.

$d_{300}$  : Déflexion sous le 3<sup>ème</sup> géophone.

$d_{600}$  : Déflexion sous le 6<sup>ème</sup> géophone.

$d_{900}$  : Déflexion sous le 7<sup>ème</sup> géophone.

$Q_{max}$  : Charge maximale appliquée sur la chaussée.

### III.12 Modélisation de la structure de chaussée :

La précision de la Backcalculation des modules est liée à deux critères structurels qui sont :

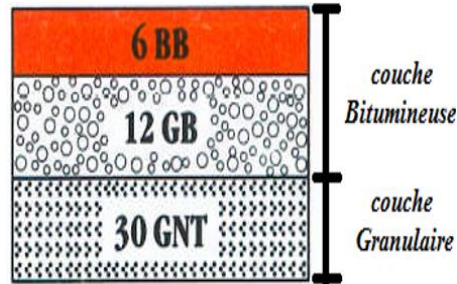
- le nombre des couches de la structure à ausculter,
- les épaisseurs des différentes couches,

La détermination des modules de rigidité des couches sera très difficile. Une simplification est toujours programmée en considérant toutes couches de mêmes types de matériaux comme une seule couche.

On considère la structure (RP1/TPL4/GB-GNT) du fascicule III du catalogue algérien des structures. Dans cette structure les deux couches bitumineuses (BB/GB) juxtaposés sont considérées comme une seule couche. On peut aussi ajouter les épaisseurs des couches bitumineuses de renforcement lors de la vie de la route.

La détermination du nombre des couches doit être soumise à un investissement sur le document historique de la route à ausculter au niveau des Direction des Travaux Public (DTP). Les vraies épaisseurs de la structure peuvent être obtenues par plusieurs méthodes in-situ, telles que le carottage et le Ground Pénétrating Radar (GPR).

**Figure III-16: modélisation pour l'auscultation d'une structure de catalogue algérien RP1-TPL4 GB/GNT.**



### III.13 Précision des épaisseurs des couches :

Les épaisseurs des couches doivent être déterminées avec précision pour l'interprétation des données de FWD. Les épaisseurs sont extraites des carottages effectuées in situ dont les valeurs suivantes sont de préférence :

- Les matériaux bitumineux (liés) : la précision est de l'ordre de 5% de l'épaisseur totale de la couche considérée.
- Les matériaux non liés : la précision est autour de 10% de la couche considérée.

### III.14 Condition d'arrêt :

La comparaison entre la déflexion mesurée et la déflexion calculée est effectuée pour chaque point de test par le logiciel de retro calcul ELMOD6 qui utilise l'une des deux formules de calcul d'erreur suivantes. Le degré de précision est un input de l'ingénieur et est en général inférieur à 4% :

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\delta_{c,i} - \delta_{m,i}|}{\delta_{m,i}} \times 100 \quad (\%)$$

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\delta_{c,i} - \delta_{m,i}}{\delta_{m,i}} \right]^2} \times 100 \quad (\%)$$

Où :

n: le nombre des géophones.

$\delta_{c,i}$ : la déflexion calculée sous le  $i^{\text{eme}}$  géophone.

$\delta_{m,i}$ : la déflexion mesurée sous le  $i^{\text{eme}}$  géophone.

### III.15 Repérage des points de test :

Pour des raisons d'organisation le repérage des points de test doit être fait en localisant les points de test par rapport au point kilométriques de la route.



Figure III-17: repérage des points de test (M.L.NGUYAN, 2011)

### III.16 FWD et types de chaussée :

La différence entre les chaussées souples et les chaussées rigides est basée sur la mesure et l'interprétation des données (Wurckler, 2010). Dans le cas des chaussées souples et semi-rigides la chaussée est considérée comme des couches homogènes dans la direction longitudinale de la route et les points de test sont choisis sans aucune restriction. Dans le cas des chaussées rigides les dimensions de la dalle et la localisation des joints entre les dalles doivent être prise en considération dans la sélection des points de test. De plus dans le cas des chaussées rigides le transfert des charges au niveau des joints doit être mesuré.

L'avantage de l'essai de mesure de la déflexion par le FWD est qu'il est applicable pour les deux grandes catégories de chaussées rigide et souple tout en prenant en considération les discontinuités de transfert des contraintes entre les dalles au niveau des joints entre les dalles.

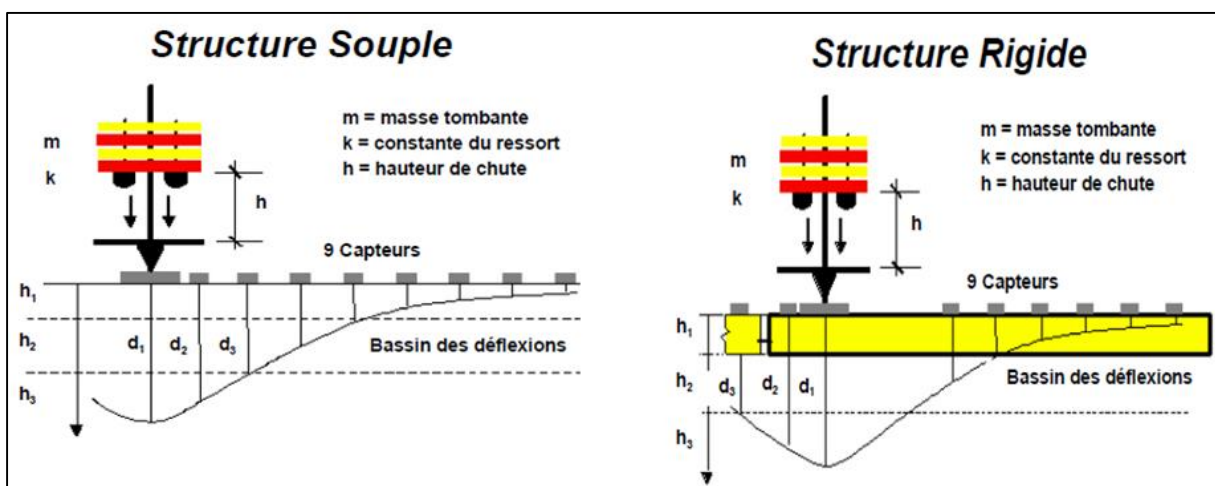


Figure III-18: FWD et types de structure (Wurckler, 2010)

# **IV. INTERPRETATION DES RESULTATS DE FWD**

### IV.1.Principe de la Backcalculation des modules rigidité :

Il existe plusieurs logiciels de calcul inverse pour l'estimation des modules de rigidités des couches d'une structure de chaussée. Pour chaque logiciel il y a un programme basé sur un principe. ELMOD (Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design) est un logiciel de calcul inverse basé sur une méthode approximative qui se base sur le principe de confondre les résultats d'un des deux paramètres suivants :

- le rayon de courbure du bassin de déflexion.
- Calage du bassin de déflexion.

Utilisant les équations de Boussinesq pour un espace semi infini et la méthode des épaisseurs équivalentes d'Odemark du passage d'un système multicouche vers un espace semi-infini ELMOD6 fait son calcul.

### IV.2.Equations de Boussinesq :

Boussinesq a développé un groupe d'équations pour le calcul des différentes sollicitations sous un chargement ponctuel. Puis l'intégration selon « z » nous donne la simulation sous le chargement uniforme, qui est le passage d'un essieu de poids lourd, dans un espace de caractéristiques suivantes :

- Homogène.
- Isotrope.
- Elastique linéaire.
- Et semi infini.

Les équations de Boussinesq sont les suivantes :

$$\sigma_z = \sigma_0 \left[ 1 - \frac{1}{[1 + (z/a)^2]^{3/2}} \right]$$

$$\varepsilon_z = (1 + \nu) \times \frac{\sigma_0}{E} \times \left[ [1 + (z/a)^2]^{3/2} - (1 - 2\nu) \times \left[ \frac{(z/a)}{[1 - (z/a)^2]^{1/2} - 1} \right] \right]$$

$$d_z = (1 + \nu) \times \sigma_0 \times \frac{a}{E} \times \left[ \left[ \frac{1}{[1 + (z/a)^2]^{1/2}} \right] - (1 - 2\nu) \times [1 - (z/a)^2]^{1/2} - (z/a) \right]$$

$$R = E \times \frac{a}{[(1 - \nu^2) \times \sigma_0 \times \left[ 1 + \left[ \frac{3}{2(1 - \nu)} \right] \times (z/a)^2 \right]]} \times [1 + (z/a)^2]^{5/2}$$

Tels que

- $\sigma_z$  Contrainte verticale.
- $\varepsilon_z$  Déformation verticale.
- $d_z$  Déplacement vertical.
- R Rayon de la courbure.

### IV.3.Méthode des épaisseurs équivalentes d'Odemark :

Les équations de Boussinesq sont valables ou applicable pour seulement des espaces semi-infinis. Par contre les structures de chaussées sont généralement composées de plusieurs couches de différentes caractéristiques  $h_i$ ,  $E_i$  et  $\nu_i$  donc ils ne sont pas des couches homogènes. Odemark fait développer une méthode approximative pour transformer une pile de couche avec diverses caractéristiques vers un système équivalent dont les épaisseurs seront changées. Mais la réponse contre les sollicitations va être la même par un module de Young unique pour le

nouveau system semi-infini. Cette méthode est connue sous le nom de **Méthod of Equivalent Thickness (MET)**. C'est-à-dire Méthode des hauteurs équivalentes.

Le principe de cette transformation est de garder la valeur du  $I \times E / (1 - \nu^2)$  constante en variant les inerties et les modules ainsi que les coefficients de Poisson tels que :

$I$  = moment d'inertie.

$E$  = module de la couche considéré.

$\nu$  = Poisson ratio.

Approximativement, l'inertie est fonction du cube des épaisseurs des couches  $h_i$  en supposant que les deux couches ont la même base  $b$ .

Selon Odemark, l'épaisseur équivalente d'une couche de module  $E_1$  et un coefficient de Poisson égale à  $\nu_1$  et une épaisseur  $h_1$  vers une autre couche de module  $E_2$  et une épaisseur de  $h_2$ .

$$\frac{b \times h_e^3}{12} \times E_2(1 - \nu_2^2) = \frac{b \times h_1^3}{12} \times E_1(1 - \nu_1^2)$$

Soit :

$$h_e = \left( h_1 \times \sqrt[3]{\frac{E_1(1 - \nu_1^2)}{E_2(1 - \nu_2^2)}} \right)$$

Une introduction d'un coefficient « f » pour la bonne considération de la théorie d'élasticité. Il dépend de plusieurs paramètres tels que :

- Rapport entre les modules de Young  $E_i$ .
- Rapport entre les coefficients de Poisson  $\nu_i$ .
- Nombre de couches de la structure  $n$ .

Après l'intercalation du coefficient « f » et la supposition d'égalité de tous les  $\nu_i$  avec 0.35 l'expression de l'épaisseur équivalente (fascicule 2 : BB/GB), qui contient les coefficients de Poisson, tombe vers le rapport seulement entre les modules de Young  $E_i$  et  $E_{i+1}$  multipliée par « f » donc la formule sera comme suit :

$$h_e = f \times \left( h_1 \times \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}} \right)$$

Dans le cas d'une série de couches l'épaisseur équivalente est calculée par la formule :

$$h_e = f \times \left[ \left[ h_1 \times \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}} + h_2 \right] \times \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_3}} + h_3 \right] \dots \times \sqrt[3]{\frac{E_{n-1}}{E_n}} + h_n$$

Le facteur f est un facteur qui est lié au coefficient de Poisson et au nombre des couches. Il varie entre 0,8 et 1. La structure sera un espace semi infini comme montré dans la figure IV.1 :



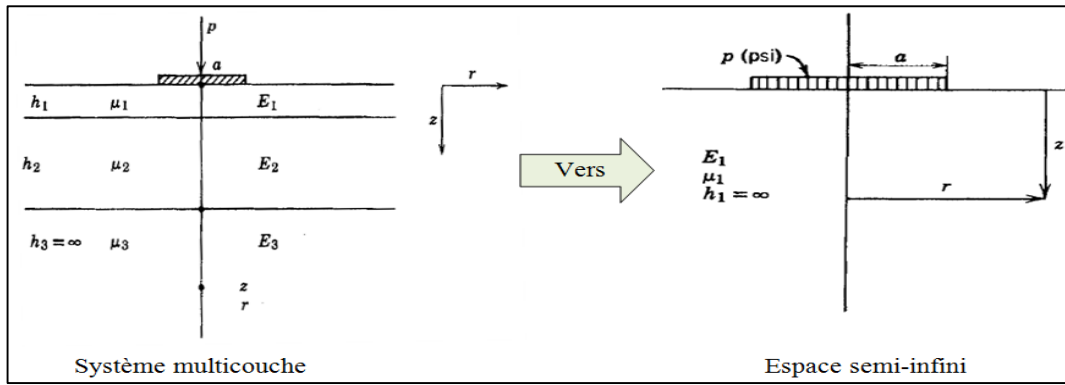


Figure IV-1: principe des hauteurs équivalentes d'Odemark

#### IV.4. Module de surface $E_0$ :

Le module de surface est le module qui présente la réponse de la totalité de la chaussée et il se calcule à partir de la déflexion maximale  $d_0$  sous la plaque de chargement ( $r = 0m$ ). Il sert à donner aux ingénieurs une impression pour les valeurs des modules. Il est calculé à l'aide de la formule :

$$E_0 = \frac{2 \times (1 - \nu^2) \times \sigma_0 \times a}{d_r}$$

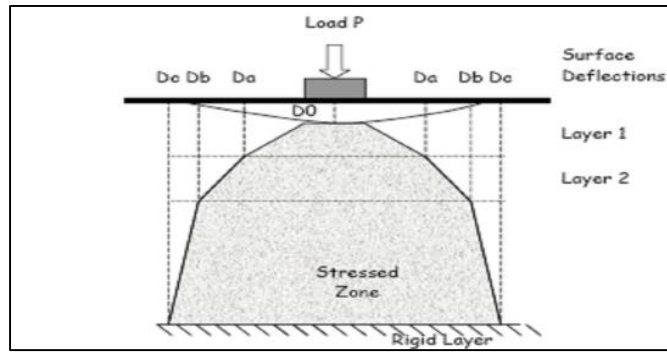


Figure IV-2: analyse du bassin de déflexion (KEBAILI, 2010)

Le module de surface au niveau d'une profondeur équivalente qui correspond à une distance  $r > 2a$  est calculé par la formule :

$$E_0(r) = \frac{(1 - \nu^2) \times \sigma_0 \times a^2}{r \times d_r}$$

#### IV.5. Algorithme de la Backcalculation :

Le calcul inverse est un problème inverse de l'ingénieur, dans lequel l'ingénieur démarre de les caractéristique dimensionnelle des couches (épaisseur, coefficient de Poisson) et la réponse de la totalité de la structure présentée par les données non destructives (le bassin de déflexion), et il arrive, finalement, à déterminer les modules des couches constituant de la structure pour parvenir à une étape qui est le renforcement on connaissant ce qui reste de résistance de la chaussée.

Parmi les chercheurs on trouve Alkasawneh (2007) qui définit les étapes du calcul inverse comme suit :

1. Définition des caractéristiques des différentes couches de la structure (épaisseurs, coefficient de Poisson).
2. Introduire des valeurs initiales des modules de rigidité.

3. Calcul de la déflexion de la structure au niveau de chaque position des géophones du FWD, le long de l'itinéraire à ausculter.
4. Comparer les déflexions calculées avec celles qui sont mesurées. La condition d'arrêt est la minimisation de la différence entre ces deux déflexions mesurée et calculée.
5. Répétition des étapes si nécessaire.

La figure IV.3 montre l'algorithme de la Backcalculation :

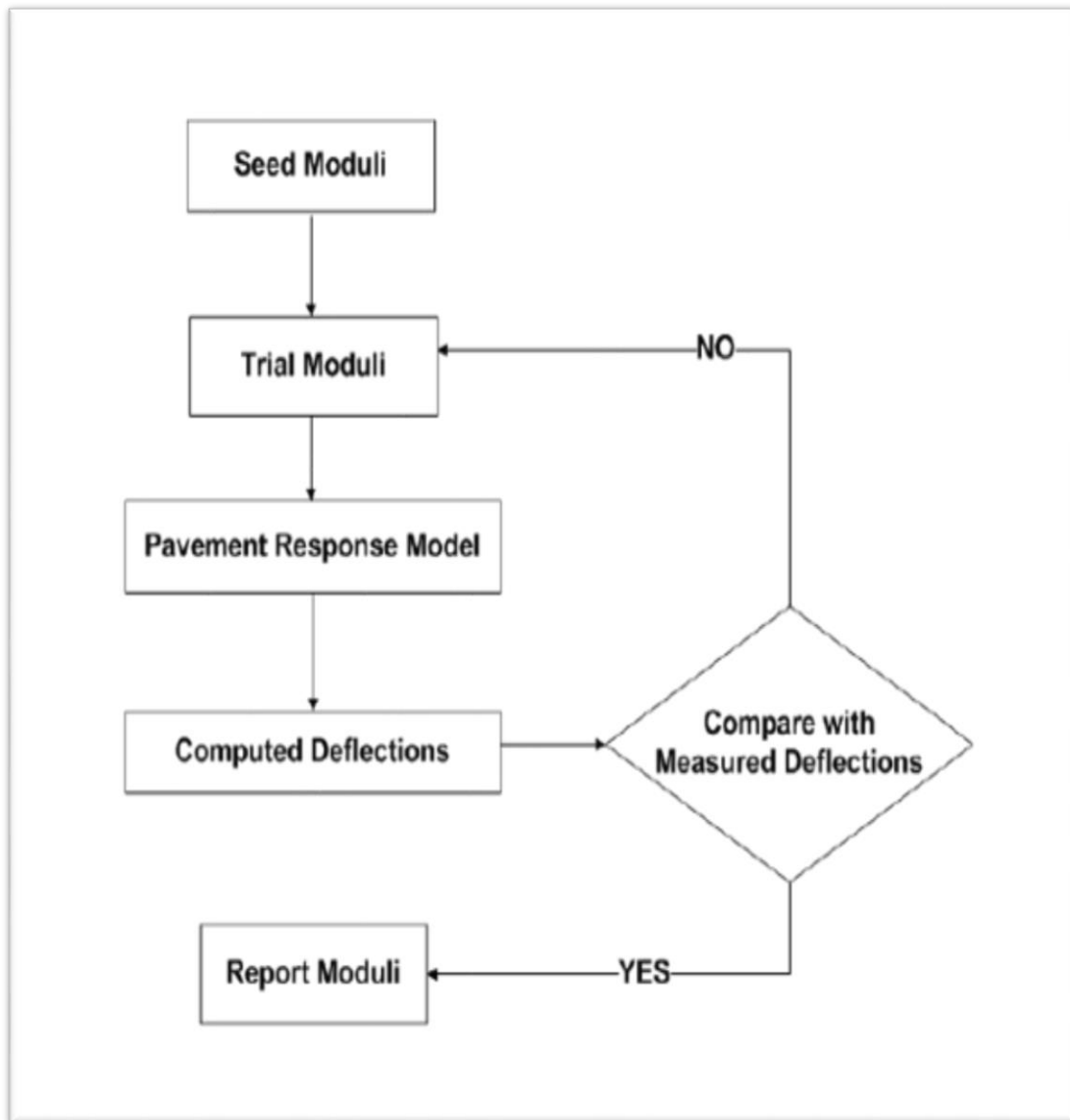


Figure IV-3 : algorithme de la Backcalculation.

## IV.6. Traitement d'un exemple :

### IV.6.1 Définition du projet :

La route nationale N° 01, objet de cette étude constitue l'un des axes routiers stratégiques du réseau national.

Le tronçon objet de cette étude de dimensionnement se situe entièrement dans la wilaya de Médéa. Il débute au PK 105+600 et se termine au PK 109+300, avec un linéaire total de 3700 ml.



Figure IV-4: Situation géographique du projet de la RN01 Médéa

### IV.6.2 Situation climatique :

Selon la carte climatique de l'Algérie du Guide des renforcements 1992, notre tronçon objet de la présente étude de diagnostic se situe dans la zone humide, caractérisée par une pluviométrie moyenne annuelle supérieure à 350 mm.

### IV.6.3 Géométrie de la chaussée :

La route se situe dans une zone urbaine, le tronçon est caractérisé par :

- Déclivité moyenne.
- Sinuosité faible.

La chaussée présente un profil en travers celui d'une route unidirectionnelle à 2x2 voies, la largeur moyenne revêtue de la chaussée entour de 7.84 m chaque sens.

Le tableau IV.1 résume les caractéristiques du projet.

**Tableau IV-1: caractérisation du projet**

Wilaya :	Médéa
Projet :	Auscultation par le HWD
Client :	DTP Médéa
Itinéraire :	RN01
Section :	Ksar Boukhari _ Beroughia.
Point kilométriques ALLER	Pk 105+600 au Pk 109+300
Point kilométriques RETOUR	Pk 109+300 au 105+600

IV.6.4 Donnée de la structure de chaussée existante :

La chaussée de la section considérée pour le futur renforcement est une chaussée souple dont les épaisseurs des différentes couches obtenues par le GPR du CTTTP pour les deux sens sont résumées dans les deux tableaux suivants :

**Tableau IV-2 : épaisseurs des couches obtenues par le GPR du CTTTP.**

Aller			retour		
Point test (km)	Bitume	GNT	Point test (km)	Bitume	GNT
0.1	237.84	600	0	228.39	600
0.2	240.13	600	0.1	228.39	600
0.303	293.75	600	0.208	224.1	600
0.4	351.92	600	0.312	220.89	600
0.5	421.18	600	0.4	219.81	600
0.601	314.79	600	0.505	229.46	600
0.7	354.06	600	0.607	217.67	600
0.8	353.68	600	0.702	230.54	600
0.902	377.81	600	0.816	229.46	600
1.003	370.22	600	0.901	220.89	600
1.102	340.18	600	1	224.1	600
1.202	357.53	600	1.1	221.96	600
1.336	303.37	600	1.201	220.89	600
1.404	288.55	600	1.3	217.67	600
1.5	309.27	600	1.422	217.67	600
1.601	313.64	600	1.517	217.67	600
1.702	289.21	600	1.603	213.38	600
1.802	276.54	600	1.7	225.18	600
1.9	303.15	600	1.806	215.53	600
2.001	393.9	600	1.919	217.67	600
2.102	264.76	600	2.001	217.67	600
2.2	369.75	600	2.111	221.96	600
2.302	324.45	600	2.201	218.74	600
2.424	283.42	600	2.3	216.6	600
2.502	309.91	600	2.404	214.45	600
2.611	326.25	600	2.502	215.53	600
2.715	341.02	600	2.6	214.45	600
2.812	354.27	600	2.702	214.45	600
2.9	287.83	600	2.805	217.67	600
3.003	314.5	600	2.914	217.67	600

3.103	374.64	600	3.009	215.53	600
3.205	235.7	600	3.104	216.6	600
3.302	216.14	600	3.208	216.6	600
3.4	210.25	600	3.304	217.67	600
3.501	194.06	600	3.404	219.81	600
3.6	266.97	600	3.5	217.67	600
3.7	231.47	600	/	/	/
3.802	229.95	600	/	/	/
3.9	224.7	600	/	/	/

#### IV.6.5 Donnée de trafic :

L'étude de trafic est basée sur les trafics journaliers moyens annuels (TJMA) déterminé par la campagne de comptage qui a été faite par le CTTP en Février 2014.

Le trafic notamment le trafic poids lourd est l'un des paramètres prépondérant du dimensionnement des chaussées.

Les données de trafic sont résumées dans le tableau :

**Tableau IV-3 : les données de trafic**

Année de comptage :	2014
Année de mise en service :	2015
RP	1
Durée de vie (ans) :	10
TJMA (véh/j/sens) :	5890
Pourcentage PL :	14%
Coefficient d'agressivité :	1.56
Température équivalente (°C) :	20
Taux d'accroissement annuel (T)	5%

Les résultats de calcul de trafics obtenus se résument dans le tableau suivant.

**Tableau IV-4 : résultat de calcul de trafic**

TJMA (véh/j/sens) :	5890
Pourcentage PL :	14
TPL2014	824
Classe de trafic TPL	5
Risque (%)	5
Trafic PL TC (PL/Sens)	$3.78 \cdot 10^6$
Trafic cumulé équivalent TCE (13t)	$5.9 \cdot 10^6$

#### IV.6.6 Calcul des déformations admissibles pour la durée de vie du futur renforcement :

Les déformations sont de deux types de vertical sur le sol support  $\epsilon_{z, adm}$  et horizontal sous les couche bitumineuses  $\epsilon_{t, adm}$  :

Calcul de la déformation verticale admissible  $\epsilon_{z, adm}$  :

$$\epsilon_{z, adm} = 22 \cdot 10^{-3} TCEi^{-0.235}$$

Calcul de la déformation horizontale admissible  $\epsilon_{t,adm}$ :

$$\epsilon_{t,adm} = \epsilon_6(10^\circ C, 25Hz)kne kr kc k\theta$$

Tableau IV-5: Calcul des déformations admissibles

TCE (13t)			$5.9 \cdot 10^6$
$\epsilon_{z,adm}$			$564 \times 10^{-6}$
$\epsilon_{t,adm}$	$\epsilon_6$	100 $\mu$	$95.68 \times 10^{-6}$
	Kne	0,77	
	K $\theta$	1,34	
	Kc	1,3	
	Kr	0,714	

### IV.7. Résultats du FWD :

Les résultats obtenus par le FWD concernant le tronçon routier qui fait partie de la RN01 au niveau sont présentés dans l'annexe sous forme des tableaux. Dont les points de test sont faits en 40 points (station) sur un linéaire de 3.9 km pour le sens aller et en 36 points (station) pour le sens retour sur un linéaire de 3.5 km. L'ELMOD6 permet à l'ingénieur ausculteur d'avoir plusieurs formes graphiques de présentation.

#### IV.7.1 Déflexions :

##### IV.7.1.1 Les déflexions mesurées par le FWD :

ELMOD6 offre la représentation des déflexions enregistrées par le FWD sous forme des graphes dont l'axe des abscisses est consacré pour la localisation des points de test sur l'itinéraire, et l'axe des ordonnées est consacré pour les valeurs des déflexions et les contraintes appliquées.

Les valeurs des déflexions sont inversement proportionnelles avec la portance de la chaussée. Donc si les déflexions sont grandes alors les modules sont automatiquement faibles.

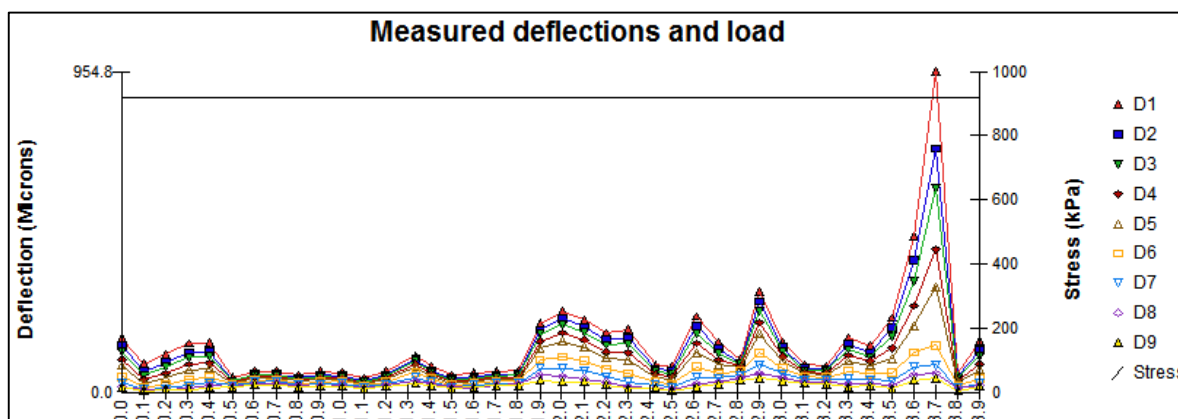


Figure IV-5 : Profils des déflexions des neufs géophones sur le long du sens aller.

Les déflexions le long du sens aller sont en général petites avec la présence des pics qui peuvent être des zones des dégradations (à la fin de la section).

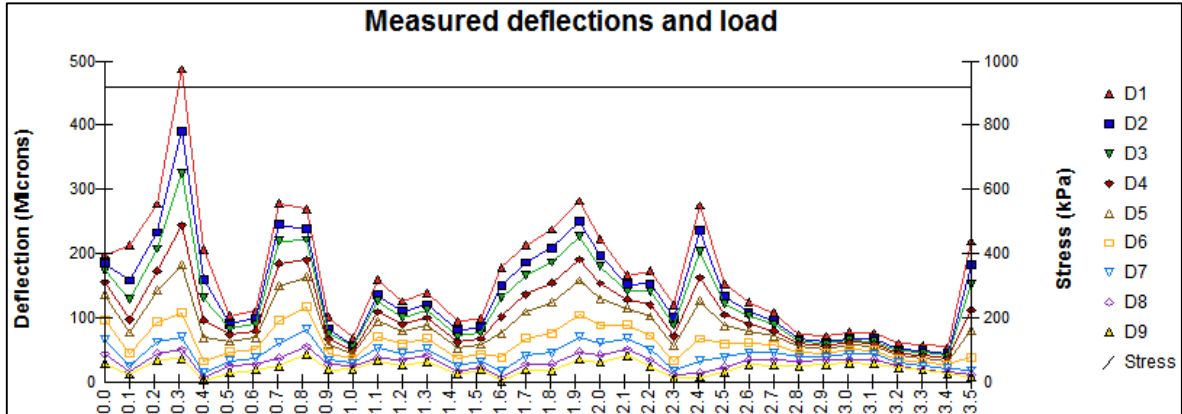


Figure IV-6 : Profils des déflexions des neufs géophones sur le long du sens retour

Les déflexions le long du sens retour sont relativement grandes ce qui reflète la faiblesse de la structure de chaussée avec la présence des pics qui peuvent être des zones des dégradations (le long de la section). Puis il commence à diminuer à la fin de la section (du point 2.8 au 3.4)

#### IV.7.1.2 Différences accumulées des déflexions mesurées par le FWD :

L'application de la méthode des différences accumulées de la norme AASHTO citées dans le chapitre IV sur les valeurs des déflexions enregistrées sous chaque géophones au niveau de chaque point de test permet le sectionnement en zone homogène en termes de déflexion.

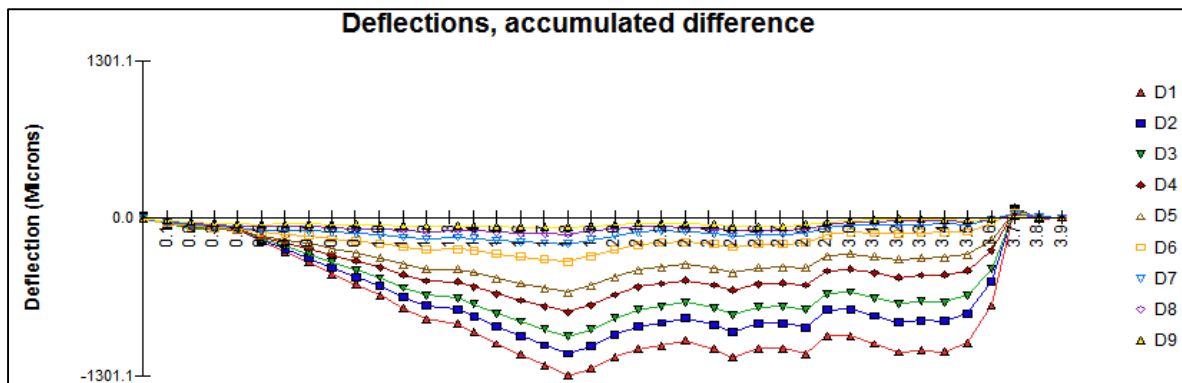


Figure IV-7: différence accumulée de la déflexion du sens aller.

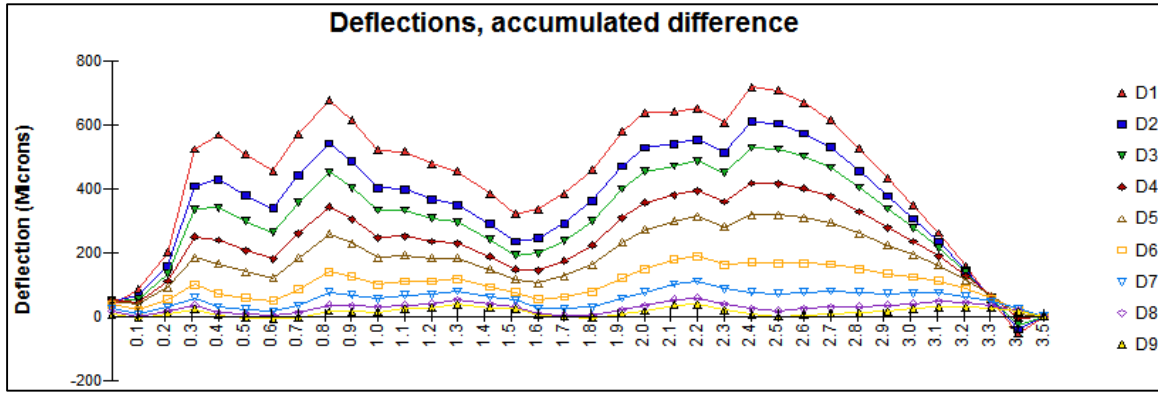


Figure IV-8 : différence accumulée de la déflexion du sens retour.

IV.7.2 Module de surface  $E_0$  et  $E(r)$  :

IV.7.2.1 Calcul manuel de module de surface :

Les résultats d'un calcul manuel effectué sur les déflexion de la 12<sup>ème</sup> point de test du sens aller sous la contrainte  $\sigma_0$  du deuxièmes drop qui est égal à 920 kPa qui corresponde à une force de 65 kN sont résumés dans le tableau IV.1 :

Tableau IV-6: Calcul manuel des modules de surface (Sens aller /station 12 drops 2)

Station	r (mm)	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1900
12	Déflexions ( $\mu\text{m}$ )	42,3	34,3	31,3	28,3	26,0	21,5	17,5	13,5	11,4
	$E_0$ (MPa)	5731,8	2650,7	1936,5	1427,9	1165,6	939,7	865,9	898,0	839,5

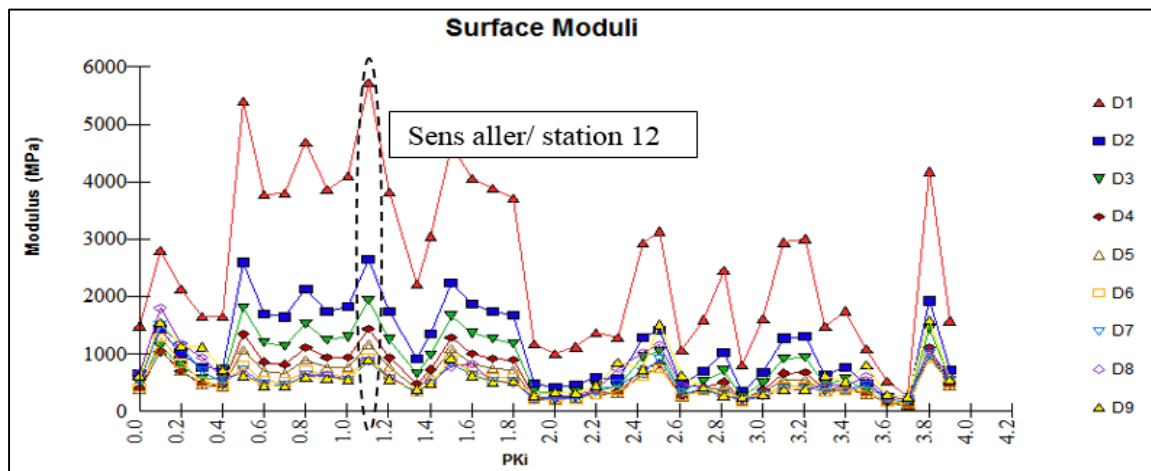


Figure IV-9 : présentation du point de test 12 du sens aller



Une présentation graphique des modules de surface en fonction de l'épaisseur équivalente est permise par le ELMOD6  $E_0=fct(e_{\text{équivalent}})$  de chaque point de test peut donner aux ingénieurs une idée sur le développement des modules de rigidité dans la structure de chaussée en allant vers la plateforme.

Dans l'exercice l'épaisseur équivalente possible est égale à 1800 mm qui correspond à la distance qui séparent le centre du géophone le plus loin.

D'après la figure en remarque que les modules commencent à environ 5700 MPa à la surface de la chaussée passant par une variation linéaire due à l'interpolation linéaire entre les déflexions enregistrées entre chaque deux géophones vers une constance au niveau de 850 MPa dans l'intervalle d'épaisseurs équivalent [1200 ;1800] mm ce qui implique la présence d'une série de surface juxtaposés de même module de surfaces couche de même modules, donc une impression d'une couche homogène.

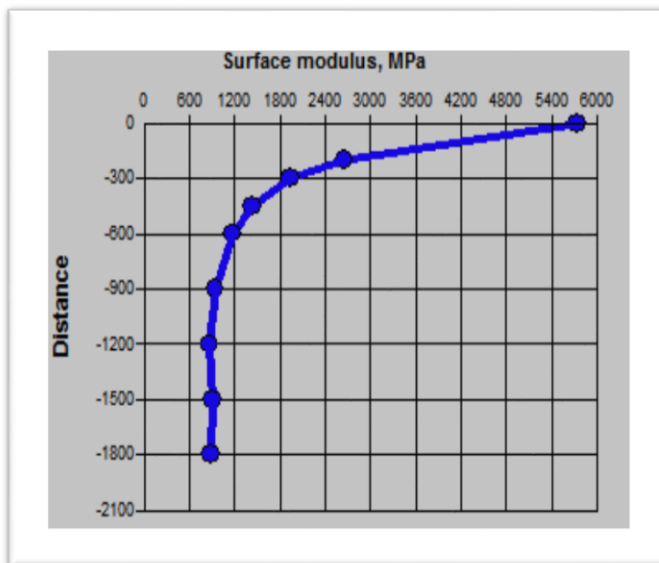


Figure IV-10 : Modules de surface (station 12 sens aller) donnée par ELMOD6

#### IV.7.2.2 Calcul de module de surface par ELMOD6 :

ELMOD6 donne sous forme de graphique la représentation des modules de surface calculée par les formules  $E_0$  et  $E(r)$  de modules de surface le long des deux sections (aller et retour). Chaque courbe présente le module de surface calculée en utilisant la déflexion enregistré sous le géophone considéré.

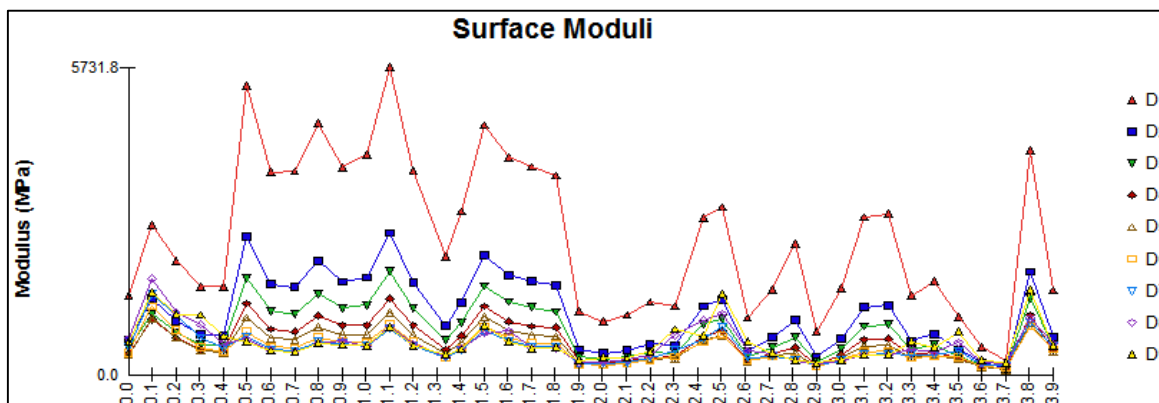


Figure IV-11: modules de surfaces du sens aller.

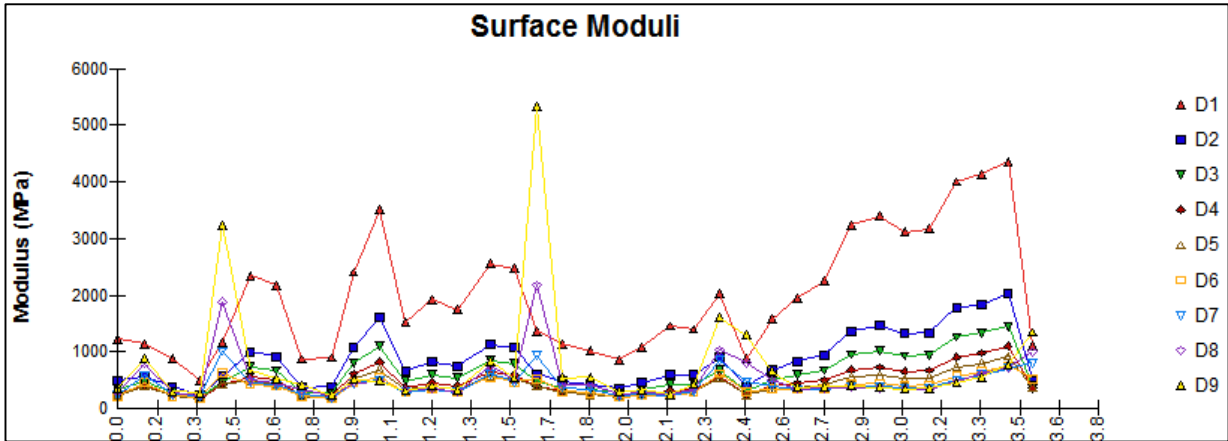


Figure IV-12: modules de surface du sens retour.

IV.7.2.3 Différences accumulées des modules de surface :

L'application de la méthode des différences accumulées sur les modules de surface fait ressortir les deux figures IV.14 et IV.15 ce qui permet un autre sectionnement selon les modules de surface.

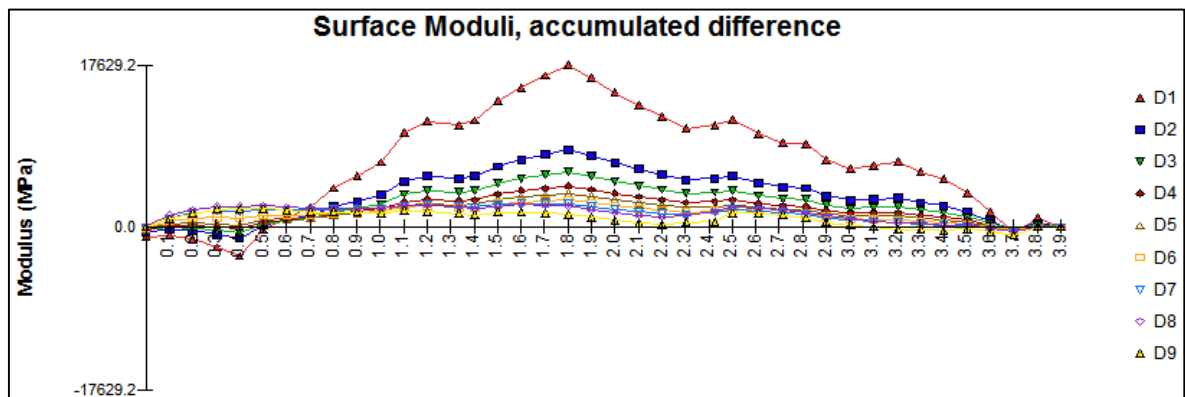


Figure IV-13: différence accumulée des modules de surface sens aller

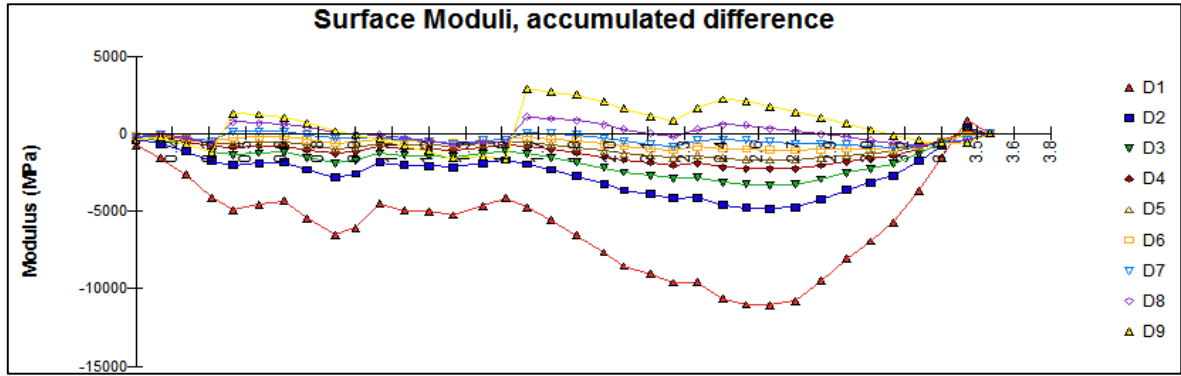


Figure IV-14: différence accumulée des modules de surface du sens retour

#### IV.7.3 Modules des couches de la structure :

Dans l'étape de calcul des modules de rigidité l'ingénieur décide le critère de la comparaison des résultats par l'un des deux méthodes citées dans la partie « principe de la Backcalculation » au début de ce chapitre. Dans le calcul de ce projet on a décidé de calculer les modules de rigidités de la structure on utilisant le critère de comparaison entre le bassin de déflexion mesurées et ce qui est calculés.

Les figures IV.18 et IV.19 montrent les résultats de calcul des modules pour les deux sens aller et retour respectivement :

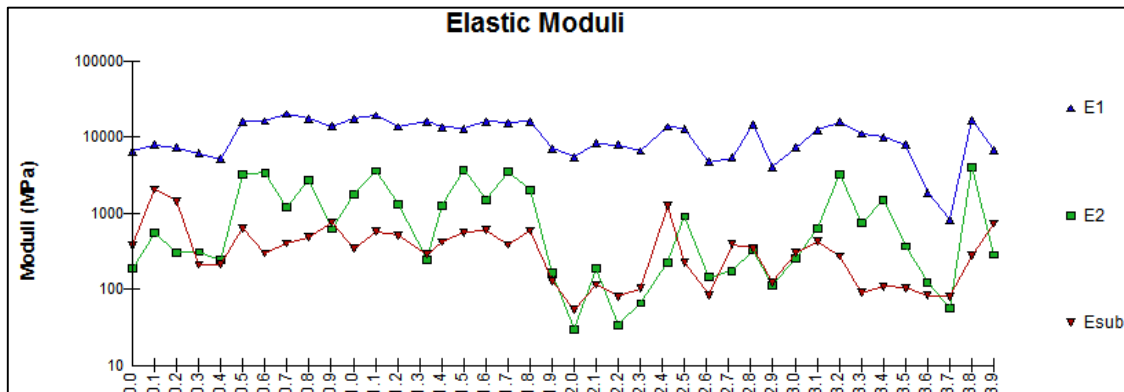


Figure IV-15 : les modules de la structure sens aller.

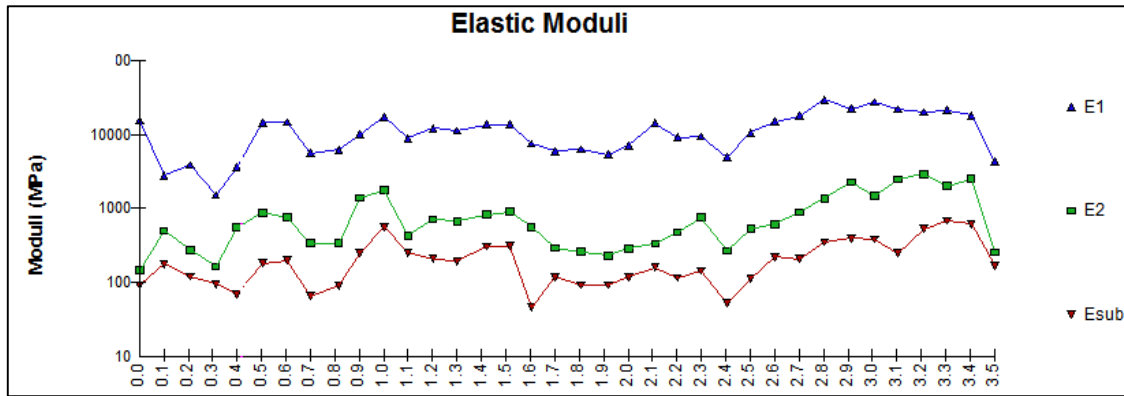


Figure IV-16 : les modules de la structure sens retour.

Pour aller vers le calcul de la durée de vie résiduelle on choisit une sous-section pour continuer le traitement calcul des modules et durée de vie dans les chapitres suivants, puis le programme de renforcement.

**V. DÉTERMINATION  
DES MODULES DE  
RIGIDITÉ PAR  
CALCUL INVERSE  
ELMOD6**

## V.1 Définition et principe du programme ELMOD6

Le programme ELMOD 6 (**E**valuation of **L**ayer **M**oduli and **O**verlay **D**esign) permet le traitement des données par la méthode de calcul inverse (*Backcalculation*) et fournit tous les résultats conduisant à l'évaluation de la durée de vie.

Il permet d'effectuer automatiquement, tout en utilisant les bassins de déflexions mesurées par le système HWD( Heavy Weight Deflectometer ),une analyse structurelle complète et un calcul du dimensionnement des couches de renforcement à partir des paramètres ayant été préalablement définis et qui sont relatifs :

- Au trafic, et environnement climatique (température),
- A la chaussée résiduelle (type, structure, et propriétés des matériaux existants),
- Aux charges appliquées et caractéristiques des matériaux destinés à la mise en œuvre.

Les étapes de calcul du logiciel peuvent être résumées comme suit :

1. Calcul des modules de différentes couches (y compris le sol support) en évaluant les bassins de déflexions mesurées par le système HWD (Heavy Weight Deflectometer),
2. Evaluation des dégâts causés par les charges, en fonction des modules des matériaux et des conditions climatiques pour ainsi déterminer la durée de vie résiduelle tout en se basant sur les relations liées aux dégâts,
3. Calcul de l'épaisseur nécessaire de recouvrement à partir des contraintes et des déformations engendrées au niveau des structures de chaussées par les charges. Tout en définissant un matériau précis et une période de dimensionnement donnée.

ELMOD 6 (**E**lévation **L**ayer **M**oduli **O**verlay & **D**esign) le logiciel de traitement des données va utiliser ce modèle pour le calcul des déflexions théoriques, dans le but de minimiser l'erreur entre les déflexions mesurées et de calculer au sens des moindres carrés. ELMOD6 modifie plusieurs paramètres essentiellement les modules d'élasticité.

Le logiciel ELMOD 6 est composé de plusieurs modules de calcul, certains d'entre eux permettent le calcul des modules d'élasticité de chaque couche. La présente version d'ELMOD en contient deux à savoir :

### 1- Rayon de courbure :

Cette technique est basée sur la méthode Odemark-Boussinesq de l'épaisseur équivalente ; elle utilise les enregistrements des géophones éloignés du centre de la charge pour la détermination des caractéristiques non linéaires du sol support «subgrade» et les enregistrements des géophones proches du centre de la charge pour la détermination du module de la couche superficielle. La rigidité des couches restantes est calculée en se basant sur la réponse de la chaussée à la charge appliquée.

## 2- Calage du bassin de déflexion :

Cette technique est aussi basée sur la méthode Odemark-Boussinesq de l'épaisseur équivalente, mais un processus d'itération additif est utilisé pour faire converger au sens des moindres carrés les déflexions calculées avec celles mesurées. Vue sa mise en œuvre facile, cette méthode a été adoptée pour l'ensemble des profils étudiés.

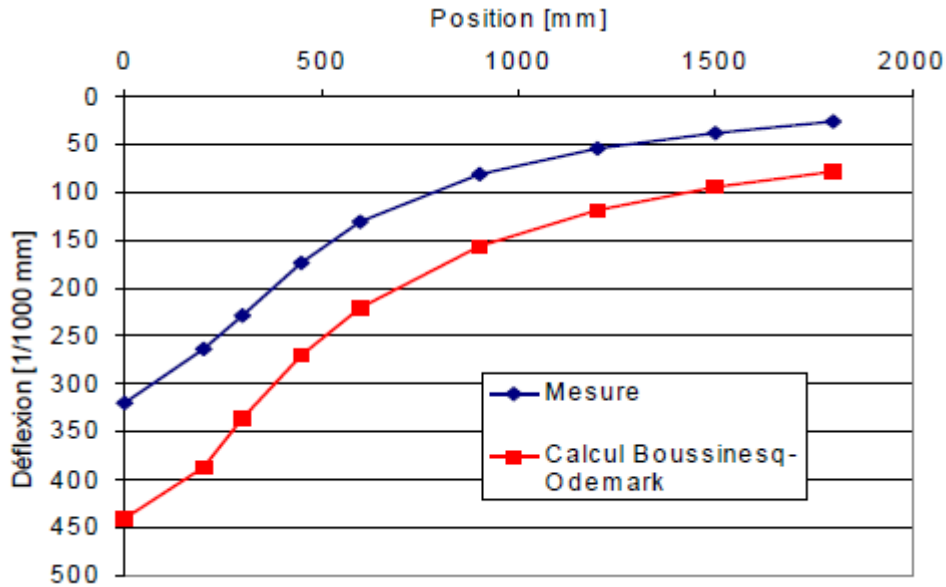


Figure V-1: principe des méthodes de calcul Boussinesq et Odemark (M.L.Nguyen)

## V.2 Loi de fatigue des matériaux :

Les matériaux bitumineux sont sujets au phénomène de fatigue due au chargement répétitif, la définition d'une loi de fatigue, pour les biens caractérisés, est nécessaire. ELMOD6 a besoin de définir trois paramètres A, B, et C pour dessiner la courbe de fatigue. Pour définir ces trois paramètres une simple analogie, entre la loi de fatigue du catalogue algérien et la formule d'ELMOD6.

La formule du logiciel ELMOD6 s'écrit comme suit :

$$\varepsilon_t^{(ELMOD6)} = A \times \left(\frac{N}{10^6}\right)^B \times \left(\frac{E}{E_0}\right)^C$$

La formule du catalogue algérien s'écrit comme suit :

$$\varepsilon_{t,adm}^{Catalogue} = \varepsilon_6(10^\circ C, 25Hz) \times k_{ne} \times k_\theta \times k_r \times k_c$$

$$\varepsilon_{t,adm}^{(catalogue)} = \varepsilon_6(10^\circ C, 25Hz) \times \left(\frac{TCEi}{10^6}\right)^b \times \sqrt{\frac{E(10^\circ C)}{E(\theta_{eq})}} \times 10^{-t\delta b} \times k_c$$

L'analogie fait monter les égalités suivantes :

$$A = \varepsilon_6(10^\circ C, 25Hz) \times 10^{-t\delta b} \times k_c$$

$$B = b$$

$$C = -0.5$$

Le tableau de variation des températures dans l'ELMOD6 est fait en considérant la température 25°C comme référence alors que les modules donnés par le catalogue sont mesurés sous la température 10°C, 20°C, 25°C et 30°C.

Le tableau V.1 résume les caractéristiques mécaniques des matériaux bitumineux :

Tableau V-1: Performances des matériaux bitumineux (catalogue de dimensionnement algérien).

Matériau (MTB)	E (30°C, 10Hz) (Mpa)	E(25°, 10Hz) (Mpa)	E(20°, 10Hz) (Mpa)	E(10°, 10Hz) (Mpa)	$\epsilon_6$ (10°, 25Hz) ( $10^{-6}$ )	-1/b	SN	Sh (cm)	$\nu$	kc Calage
BB	2500	3500	4000	-	-	-	-	-	0,35	-
GB	3500	5500	7000	12500	100	6,84	0,45	3	0,35	1,3
SB	1500	-	-	3000	245	7,63	0,68	2,5	0,45	1,3

### V.3 Epaisseurs des couches :

La détermination des épaisseurs des différentes couches est une étape très importante, Elle peut se faire par plusieurs méthodes telles que le carottage (de plus pour la détermination des modules des couches par l'écrasement) et le GPR (Ground Pénétration Radar).

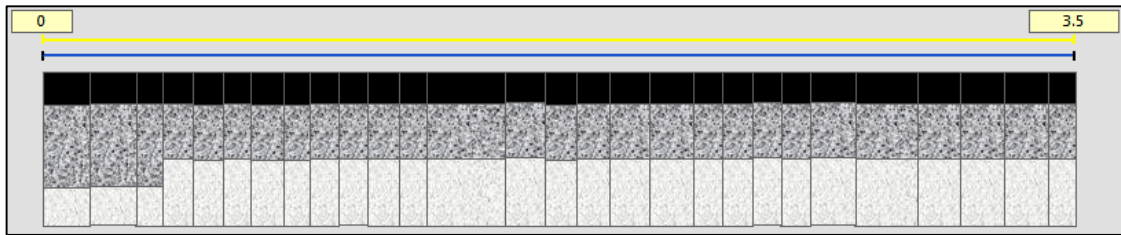


Figure V-2: présentation graphique (ELMOD6) des épaisseurs des couches données par GPR

### V.4 Calcul des modules de rigidité :

Une section est choisie pour compléter l'exemple. Le choix de la section est fait en exploitant les courbes de la méthode des différences accumulées données par ELMOD6.

La section choisie pour compléter l'exemple est la première 400 m du sens retour. Elle commence au point de test 0.000 km au point de test 0.405 km. La section contient cinq points de test comme montre le sectionnement par la différence accumulée dans la figure V.9.

#### V.4.1 Auscultation de la sous-section de la chaussée :

Auscouter une chaussée revient à évaluer son état structurel et fonctionnel et à établir son diagnostic afin d'y apporter des remèdes nécessaires pour son maintien dans un niveau de service appréciable donc apporter des solutions appropriées au choix de la technique à mettre en œuvre et ce à travers des paramètres d'état bien définis.

Résultat de déflexion de la sous-section considérée avec l'option de possibilité de sectionner sue ELMOD6 comme montré dans la figure V.3 :



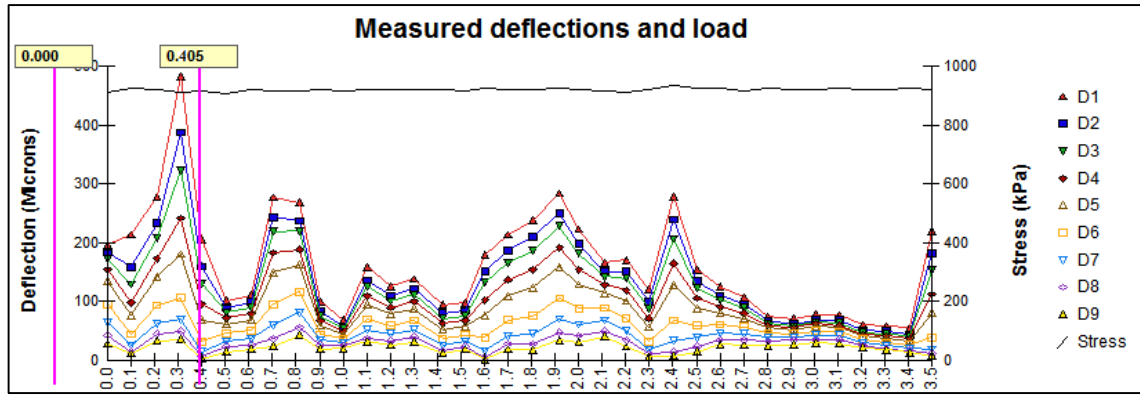


Figure V-3 : les déflexions de la sous-section

Le tableau V.2 résume les valeurs moyennes des déflexions sous chaque géophone. Dans les cinq (5) points de test de la section choisie en utilisant la formule de la moyenne arithmétique :

Tableau V-2 : valeurs moyennes de la déflexion sous chaque géophone le long de la sous-section

Géophone (mm)	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800
nombre de point	5	5	5	5	5	5	5	5	5
$D_{moy}$ ( $\mu m$ )	275	224	193	153	121	75	48	32	23

La figure V.4 montre les déflexions accumulées de la sous-section.

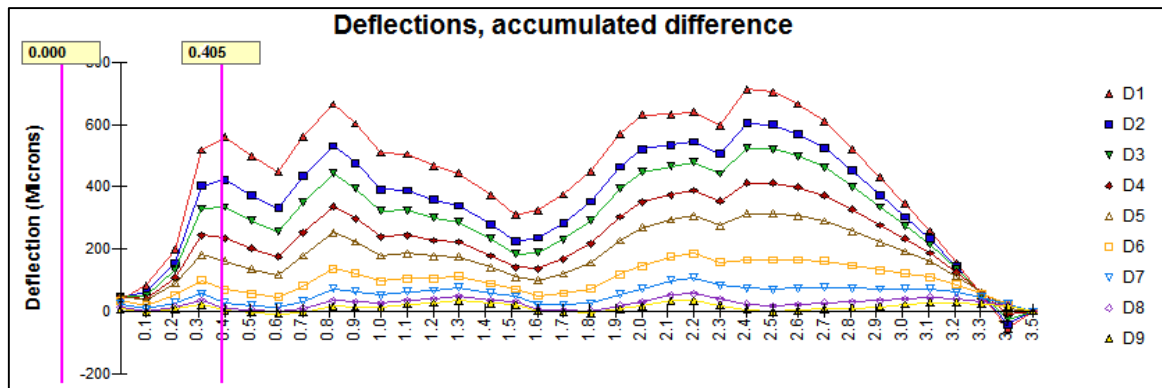


Figure V-4: déflexion accumulée de la sous-section

Le lancement de calcul des modules de rigidité par ELMOD6 en utilisant le critère d'égalité entre les déflexions calculé et celles mesurées (déflexion basin fit) au niveau de chaque point de mesure fait donne la figure V.5.

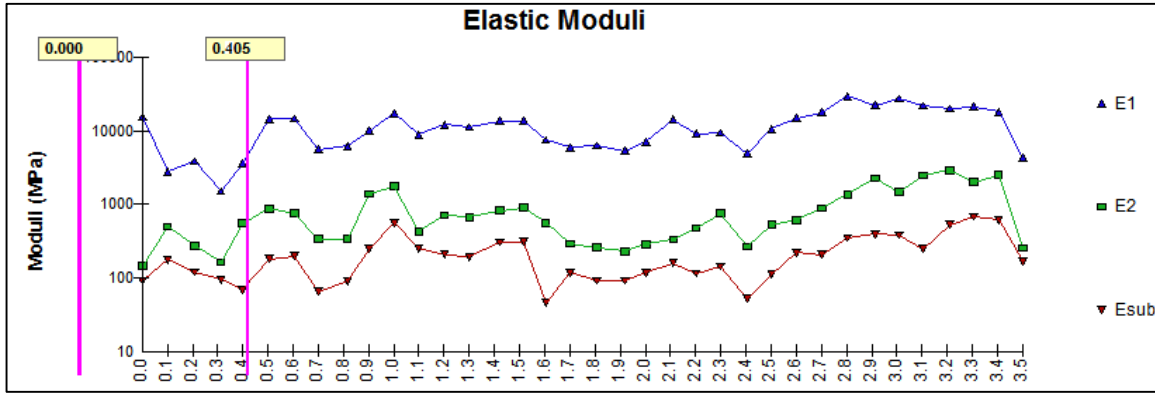


Figure V-5: module des couches de la section

La figure V.6 qui présente les modules des couches en différence accumulée renforce le choix de la section par les valeurs de déflexion.

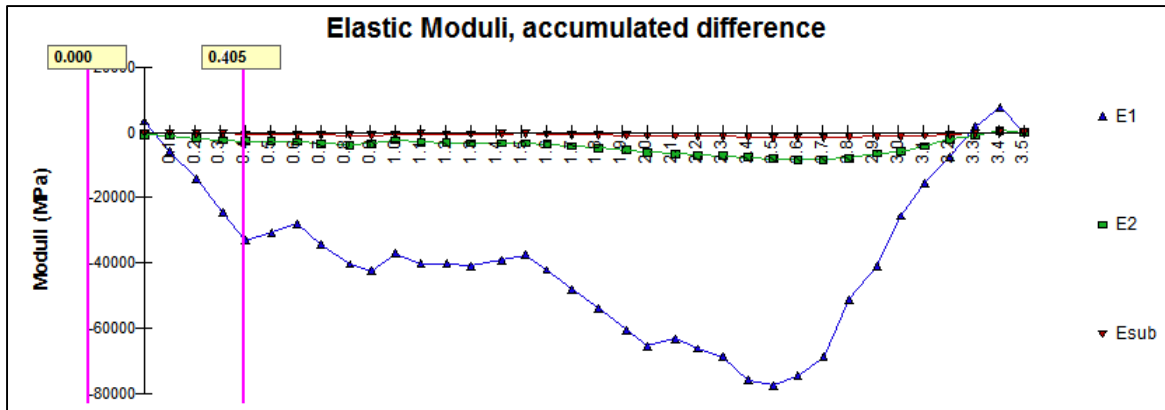


Figure V-6: Module de rigidité des couches de la section en différence accumulée.

Les valeurs moyennes des modules de rigidité sont résumées dans le tableau V.3.

Tableau V-3: valeurs moyenne des modules de rigidité de la section choisie.

couche	nombre de point	$E_{moy}(MPa)$	Ecart type	Epaisseur (mm)
E1	5	3924	2.34	220
E2	5	284	1.848	600
E3	5	105	1.423	Infini

D'après le tableau V.3 on peut dire que la structure de la sous-section choisie est constitué d'une couche de surface bitumineuse d'épaisseur 22 cm est de module de rigidité de 3924 MPa, une couche granulaire d'épaisseur 60 cm et de module de rigidité de 284 MPa, et d'une plateforme de 105 MPa.

**VI. DETERMINATION  
DE LA DUREE DE VIE  
RESIDUELLE DE LA  
CHAUSSEE CHOISIE  
ALIZE.LCPC**

### VI.1 La durée de vie de futur renforcement :

La durée de vie du projet de renforcement est proposée par le maître d'ouvrage. Cette durée sera vérifiée par le calcul de dimensionnement en connaissant la durée de vie résiduelle de la chaussée qui est fonction des caractéristiques mécaniques qui résident dans l'ancienne chaussée.

### VI.2 Calcul de la durée de vie résiduelle :

Après la détermination des modules des différentes couches en utilisant l'ELMOD6, le calcul des déformations, sous l'essieu 13 tonnes par ALIZE serait possible. La détermination de la durée de vie résiduelle doit être calculée par rapport aux deux types de déformations : verticale  $\epsilon_{z,adm}$  pour les couches granulaires, et les déformations horizontales  $\epsilon_{t,adm}$  pour les couches bitumineuses afin de déterminer la durée la plus petite qui est la durée critique de détermination de la durée de vie résiduelle,

Le calcul de la durée de vie résiduelle se fait en passant par une comparaison entre les sollicitations que la chaussée va les accueillir et les sollicitations que la chaussée est capable de les supporter le jour de l'essai.

La durée de vie résiduelle est déduite en allant du sens inverse lors du calcul des déformations admissibles et plus exactement au niveau de calcul de Trafic Cumulé Équivalent (nombre d'essieu 13 tonnes) TCEi qui est la somme des d'une suite géométrique de raison (1+i) dont le (i) est le taux d'accroissement de trafic. Le TCEi est alors fonction du temps automatiquement le nombre d'années que la chaussée peut supporter le chargement due au trafic.

On fait rentrer la structure résultante du calcul inverse dans ALIZÉ III pour le calcul des déformations verticales et horizontales sous la charge de référence qui est l'essieu de 13 tonnes.

Le calcul d'un TCEi, à partir des déformations résultantes de ALIZE, qui donne la vérification des déformations fait nous donner les années pour que la chaussée soit résistante

### VI.3 Formules de calcul du TCEi :

Deux formules de calcul du TCEi tirées des formules de calcul des déformations admissibles du catalogue de dimensionnement des chaussées neuves Algérien :

$$TCEi_{vertical} = \frac{\epsilon_{z,adm}}{\sqrt{22 \cdot 10^{-3}}}^{-0.235}$$

$$TCEi_{horizontal} = 10^6 \cdot \frac{\epsilon_{t,adm}}{\sqrt{\epsilon_6 \cdot k\theta \cdot kr \cdot kc}}^b$$

Le schéma résume les étapes d'un calcul du TCEi :

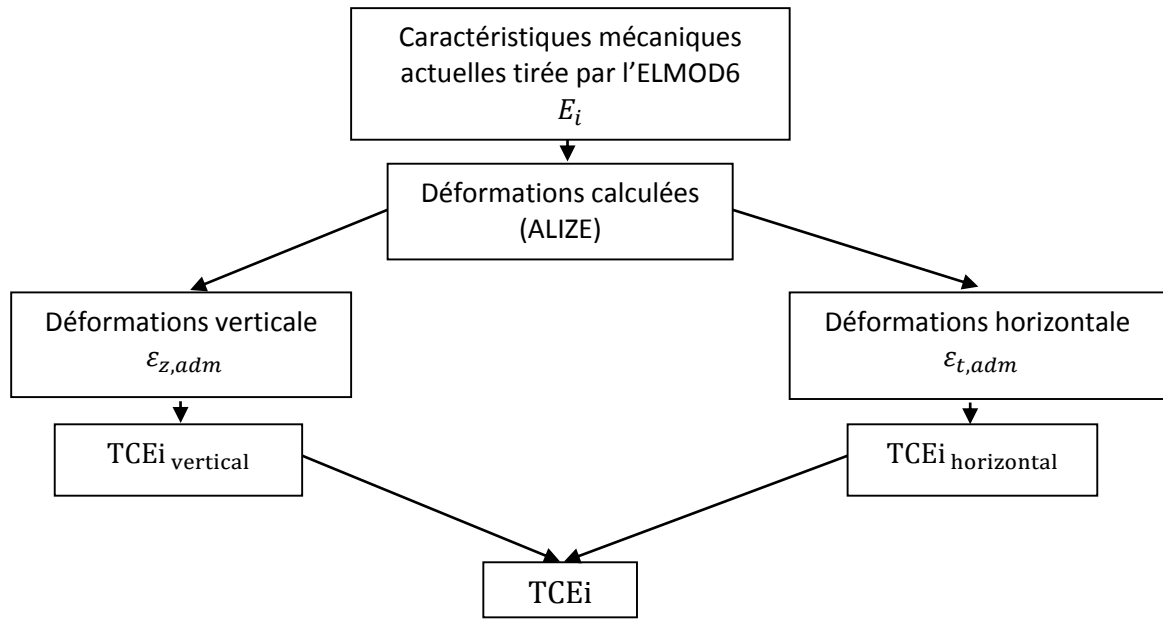


Figure VI-1: Etapes de calcul du TCEi

La formule des nombre d'années en fonction du TCEi est déduite de la formule de calcul du trafic cumulé équivalent TCEi du catalogue algérien:

Formule de calcul du TCEi est la suivante :

$$TCEi = TPLi \cdot 365 \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i} \cdot A$$

De la formule ci-dessus on extrait la formule du nombre d'années :

$$n = \frac{\log\left(\frac{i \cdot TCEi}{TPLi \cdot A \cdot 365} + 1\right)}{\log(1+i)}$$

Tel que :

n: nombre d'année.

i: taux d'accroissement de trafic.

A: coefficient d'agressivité.

TPLi: trafic poids lourd.

TCEi: trafic cumulé équivalent.

Les déformations admissibles :

$$\varepsilon_{t,adm} = 95.68 \times 10^{-6}$$

$$\varepsilon_{z,adm} = 564 \times 10^{-6}$$

## VI.4 Résultats de calcul du N :

Les inputs de calcul de nombre d'année N de la durée de vie résiduelle sont les déformations verticale et horizontale calculées par ALIZÉ sous la charge de référence qui est l'essieu 13 tonne.

### VI.4.1 Définition et principe ALIZE :

ALIZE III est un programme mis au point au laboratoire central des ponts et chaussées. Il permet de déterminer à partir d'un modèle multicouche, élastique et linéaire fondé sur l'hypothèse de Burmister, les contraintes et les déformations aux différentes interfaces de la structure ayant jusqu'à six (06) couches supposées infinies en plan.

La charge prise en compte dans la modélisation est une charge unitaire correspondant à un demi-essieu de 13 tonnes présenté par une empreinte circulaire de rayon (r) avec une symétrie de révolution. Le problème est traité en coordonnées cylindriques

### VI.4.2 Principe de calcul et introduction de données :

Il consiste à modéliser une structure, de manière à calculer les contraintes, ainsi que les déformations provoquées par une charge type. Les « input » du programme ALIZE, sont pour chaque couche :

1. Les épaisseurs de chaque couche,
2. Les caractéristiques mécaniques des matériaux (module de rigidité des matériaux et les coefficients de poisson),
3. L'interface entre les couches (collée ou décollée).

Pour évaluer les caractéristiques mécaniques des différentes couches, le catalogue de dimensionnement des chaussées neuves nous permet de déterminer les modules de chaque couche de la chaussée.

Titre : Auscultation RN01 SR 0+00 : 0+400

Structure de base

	épais. (m)	module (MPa)	Nu	matériau type
collé	0,22	3924	0,35	autre
collé	0,60	284	0,35	autre
	infini	105	0,35	autre

Modifier la structure

nb de couches : 3

Ajouter 1 couche

Supprimer 1 couche

Série de calculs

nb de calculs : 1

Voir/gérer les variantes

Supprimer les variantes

Figure VI-2: modélisation de la structure dans ALIZE LCPC.

VI.4.3 Calcul des déformations par ALIZE III :

Les résultats de calcul des déformations sont présentés dans la figure VI.3 :

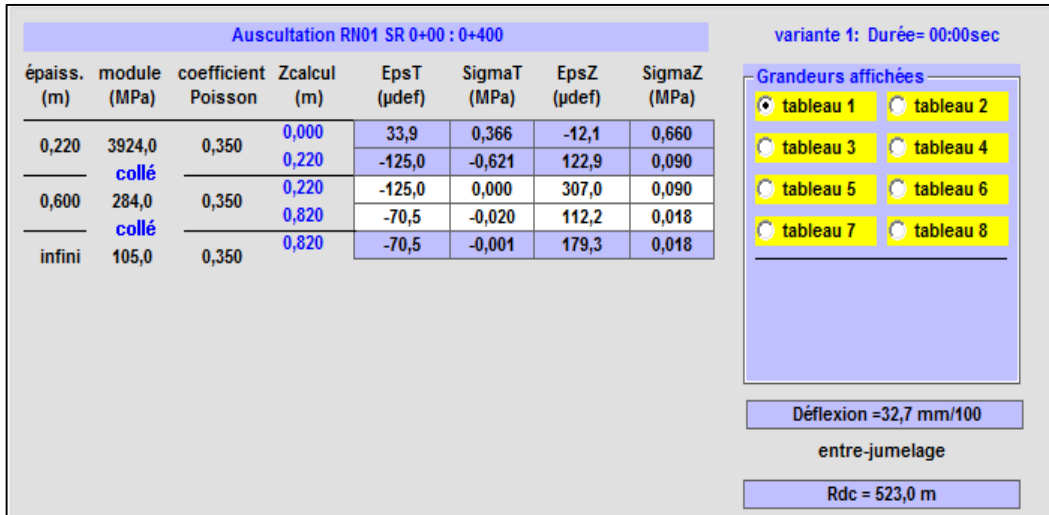


Figure VI-3: Résultat de calcul des déformations par ALIZE LCPC

VI.4.4 Calcul manuel de N :

Le calcul des nombre d’année de vie résiduelle pour le deux sollicitations horizontale et verticale est résumé dans le tableau :

Tableau VI-1: calcul manuel de la durée de vie résiduelle

Sollicitation	$\epsilon$ (µm)	TCE	TPL	A	I(%)	N (ans)	Durée de vie (ans)
Verticale	179	7,74E+08	824	1.56	5	90.68	3.23
Horizontale	125	1,60E+06	824	1.56	5	3.23	

VI.4.5 Calcul de N par le logiciel ALIZÉ :

VI.4.5.1 Sollicitation verticale :

Les données d’entrées sont :

1. Le nombre de poids lourds de l’année mise en service.
2. Taux d’accroissement du trafic.
3. Coefficient d’agressivité.
4. Donnée de loi de fatigue du sol support.

Les données sont présentées dans l’interface de rentrée des données dans ALIZÉ rétro-calcul dans la Figure VI-4 :

Figure VI-4 : données de calcul de la durée de vie résiduelle vis-à-vis la sollicitation verticale.

Les résultats de calcul de la durée de vie résiduelle par le module ALIZÉ rétro-calcul sont présentés dans la figure VI.5 :

Figure VI-5 : calcul de la durée de vie résiduelle par ALIZÉ rétro-calcul



VI.4.5.2 Sollicitation horizontale :

Les données de rentrées sont :

1. Le nombre de poids lourds de l'année mise en service.
2. Taux d'accroissement du trafic.
3. Coefficient d'agressivité.
4. Donnée de loi de fatigue de la couche bitumineuse.
5. Les données des coefficients correcteurs ( $k_{ne}$ ,  $k_r$ ,  $k_{\theta}$ )

Figure VI-6 : Données de calcul de la durée de vie résiduelle vis à vis la sollicitation horizontale.

Les résultats de calcul de la durée de vie résiduelle vis-à-vis la déformation horizontale par le module ALIZÉ rétro-calcul sont présentés dans la Figure VI-7:

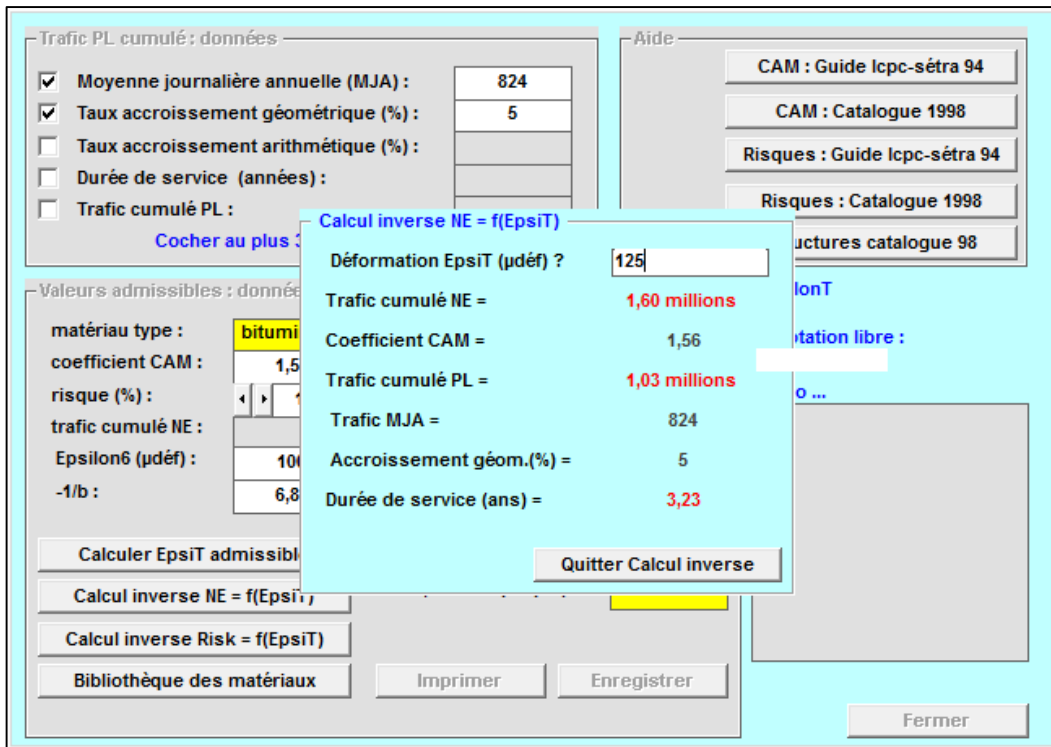


Figure VI-7 : Calcul de la durée de vie résiduelle par ALIZÉ rétro-calcul

L'interprétation des différents résultats concernant le nombre d'années fait apparaître une durée de vie résiduelle d'environ 90 ans pour le sol support et une durée d'environ 3 ans pour le matériaux bitumineux.

Conclusion :

Tableau VI-2 : Résultats de calcul de la durée de vie résiduelle.

Sollicitation	Durée de vie (ans)	Durée de vie de la chaussée (ans)
Verticale	90.68	3.23
Horizontale	3.23	

La durée de vie résiduelle de la chaussée de la sous-section choisie est le minimum des deux durées tirées par le calcul inverse est de 3ans.

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale :

Le développement économique d'un pays s'appuie sur plusieurs facteurs. Les infrastructures de transport avec ces différentes modes fait une importante partie de ces facteurs. Dans l'Algérie le mode de transport routier est le mode le plus prépondérant par une série de types qui sont par ordre d'importance les autoroutes (ex : autoroute EST-OUEST) les routes nationales (RN), les chemins de willayas (CW), les chemins communaux (CC).

L'intégration du concept de développement durable dans le domaine des travaux publics et plus précisément les routes fait apparaitre plusieurs directives à suivre. Parmi ces directives on cite l'obligation de l'exploitation des matériaux jusqu'aux limites, donc l'apparition du terme de la durée de vie résiduelle des chaussées routières.

La détermination de la durée de vie résiduelle est très importante dans la programmation des solutions d'entretien de l'infrastructure routière, cette durée est fonction de deux grands facteurs qui sont :

1. Le niveau de chargement
2. La capacité portante de la chaussée existante.

Le présent mémoire vise à définir une méthode de détermination de la durée de vie résiduelle d'une chaussée routière en exploitant les résultats donnés par ELMOD6 qui caractérise la capacité portante de la chaussée. L'introduction de ces résultats dans ALIZE LCPC donne les résultats des déformations sous la charge de référence de conception. L'exploitation des données de trafic, et les résultats des déformations calculées donnent la durée de vie résiduelle de la chaussée à auscultée.

Après le calcul de la durée de vie résiduelle, il reste à prendre la décision de renforcement de la chaussée, en ajoutant ce qu'il faut comme matériaux et en respectant les dispositions constructives. Avec la condition de ne pas dépasser les déformations admissibles. Et de soyez prudent lors de l'interprétation des résultats des modules concernant la relation épaisseur-modules de Young.

La détermination de la durée de vie résiduelle des chaussées routières est un domaine qui est vaste, il reste beaucoup à faire, concernant le comportement des matériaux et les lois de fatigue après l'expiration de la durée de vie résiduelle de la chaussée. Il reste à discuter sur la valeur de  $\epsilon_6$  de la loi de fatigue pour bien prendre en considération les comportements des matériaux surtout celles qui sont traitées. de plus le comportement du sol support qui a une grande influence sur les valeurs des modules de rigidité.

### **Bibliographie :**

- [1] AASHTO Guide for design of pavement and structures, Appendix J, 1993, AASHTO.
- [2] A.C.Pronk, Equivalent Layer Théorie, Appendix I, BIDOC (Bibliothèque de documents).
- [3] ALIZE LCPC, Manuel d'utilisation de logiciel, version 1.3, LCPC 2010. Itech.
- [4] BROUTIN.M, Mémoire, Ph.D, Evaluation des chaussées souples aéroportuaires à l'aide du déflectomètre à masse tombante. Soutenue LCPC soutenue le 11 juin 2010. Paris
- [5] COST 336, Falling Weight Deflectometer, final report of action, 1996.
- [6] DIFFINE Th, Thèses M.Ing, Ecole de technologie supérieure université de QUEBEC. Montréal, 2012
- [7] DESROCHERS.P, Modules réversibles des matériaux granulaires de chaussées en conditions de laboratoire et de terrain, chapitre III, bibliothèque nationale du Canada. M. Sc Université LAVAL, 2001
- [8] FAURE. M, BABILOTTE.Ch, Les cours de routes, Tome II, ENTPE ALEAS.
- [9] GRENIER .S, Analyse dynamique du Deflectometer à masse tombante Tome I, facultés de sciences et de génie. Université de QUEBEC, 2007
- [10] H.HUANG. Y, Pavement analysis and design, 2<sup>ème</sup> Edition, PEARSON Prentice Hall, université Kentucky, 2004.
- [11] KEBAILI.N, ALGERIE EQUIPEMENT revue technique de l'école nationale supérieure des travaux publics (ENSTP Kouba) N°47 Mai 2010.
- [12] LACHANCE.D, Thèse M. Sc, analyse mécanique de chaussées flexibles, Faculté des sciences et génie Université de LAVAL. Bibliothèque nationale de Canada, 1999.
- [13] MTP, Catalogue de dimensionnement des chaussées neuves CTTP fascicule 2, 2001.
- [14] MTP, catalogue de dimensionnement des chaussées neuves CTTP fascicule 1, 2001.
- [15] MTP, catalogue de dimensionnement des chaussées neuves CTTP fascicule 3, 2001.
- [16] Ministère de l'Écologie du Développement et de l'Aménagement Durables. Les renforcements de chaussée, diagnostic et conception, version janvier 2009.guide technique SETRA, CFTR,
- [17] MILLIEN.A, PETIT.Ch, TAKARLI M, Rapport diagnostique de chaussée du CD36, université de limoges, avril 2009.
- [18] NGUYEN.M.L. Capacité portante évalué par FWD, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. LAVOC EPFL 2011
- [19] WERCKLER.S Rapport de TFE, développement de technique d'auscultation des chaussée, INSA Strasbourg Génie civil, Juin 2010.

Sites :

[www.reocities.com](http://www.reocities.com)

[www.repositry.up.ac.za](http://www.repositry.up.ac.za)

## Annexe

### Annexe :

Les résultats du FWD des déflexions sens aller :

Station ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
1	161,40	139,80	121,30	99,30	79,50	48,20	30,50	21,60	15,10
1	162,40	140,30	121,50	100,10	80,70	48,30	29,40	17,80	16,30
2	85,30	63,20	52,70	38,60	28,60	14,90	9,90	7,10	6,40
2	86,00	63,50	52,70	38,80	28,30	15,60	10,00	6,70	6,50
3	115,70	91,60	77,50	58,80	44,40	24,80	14,40	10,80	9,20
3	113,80	90,00	76,20	58,10	43,70	24,00	13,50	10,30	8,90
4	148,50	122,60	106,60	85,70	67,90	40,10	22,00	14,10	9,00
4	146,10	119,20	105,50	84,50	66,50	39,30	21,70	12,90	9,00
5	148,10	123,60	109,20	89,80	72,90	46,60	30,40	20,40	13,60
5	147,10	122,30	108,40	88,40	72,00	46,10	30,10	20,30	14,00
6	44,00	34,90	32,70	29,90	28,70	24,00	20,50	14,40	15,40
6	44,70	34,90	33,40	30,00	28,20	25,00	20,80	18,40	16,30
7	64,30	53,20	51,30	46,90	44,00	39,00	31,70	25,90	21,80
7	64,30	53,80	51,00	47,20	44,20	37,90	31,60	26,00	22,40
8	62,60	55,00	53,40	49,50	45,90	39,60	34,10	28,70	23,30
8	64,00	55,50	53,60	49,80	46,20	39,80	34,10	28,20	23,50
9	50,70	42,20	39,30	36,50	33,60	28,50	24,40	20,50	17,10
9	51,70	42,60	39,80	36,60	34,00	28,60	24,20	20,20	17,00
10	61,30	52,60	48,00	43,50	39,90	31,90	25,10	20,60	18,00
10	62,50	52,30	48,60	43,30	40,10	32,20	25,20	19,20	18,00
11	58,70	49,80	47,40	43,20	39,90	33,50	27,70	22,40	18,40
11	59,00	50,00	46,70	43,40	39,90	33,40	27,80	22,40	18,20
12	42,30	34,00	31,80	28,20	25,90	21,40	17,70	14,60	12,40
12	42,30	34,30	31,30	28,30	26,00	21,50	17,50	13,50	11,40
13	63,30	52,30	48,40	43,80	39,80	32,60	27,10	21,60	18,20
13	63,80	52,70	48,70	43,80	40,00	32,70	27,10	20,80	18,30
14	111,40	101,30	95,00	86,70	77,90	61,30	46,80	35,60	27,70
14	110,90	100,70	94,90	86,20	77,60	61,70	47,10	34,50	26,90
15	80,60	69,00	63,10	57,00	51,50	41,10	33,00	26,60	21,20
15	79,90	67,40	62,00	55,80	50,30	40,20	32,10	24,70	21,00
16	52,50	41,20	37,00	32,10	28,30	22,30	18,50	14,70	11,60
16	51,60	40,40	36,20	31,10	27,50	22,30	18,20	15,50	10,80
17	60,40	49,10	45,40	40,50	36,90	30,20	26,30	21,40	16,70
17	59,60	48,70	44,40	40,40	36,60	29,00	24,10	14,70	16,30
18	63,00	52,60	48,50	44,80	41,10	34,50	29,10	24,20	20,20
18	62,70	52,40	48,00	44,50	41,00	34,30	29,00	24,00	20,20
19	64,40	55,10	51,50	46,00	41,90	34,30	29,50	24,40	19,50
19	65,10	54,10	51,40	45,30	41,70	34,10	28,90	24,50	19,40

## Annexe

20	204,40	186,30	172,40	152,10	132,70	97,40	71,30	51,80	36,00
20	205,40	186,70	173,80	152,30	133,20	97,90	72,30	52,10	36,40
21	239,50	219,50	201,00	176,00	150,70	105,10	69,70	46,00	30,10
21	242,60	221,30	203,20	177,50	152,20	106,40	71,60	48,40	31,20
22	216,80	196,10	180,90	158,80	136,40	96,90	66,60	43,50	34,00
22	214,30	194,20	178,20	156,10	134,10	94,60	65,50	41,50	31,60
23	181,10	159,20	145,00	124,80	105,10	71,70	47,90	33,00	22,80
23	176,80	155,30	141,90	121,60	102,60	70,10	47,00	32,20	22,60
24	191,90	165,50	147,80	121,30	97,10	58,60	32,60	17,80	11,60
24	188,60	163,90	145,80	119,50	96,00	58,00	32,40	16,40	11,80
25	85,60	72,60	66,40	56,50	47,70	33,70	24,50	19,50	14,80
25	83,20	71,20	64,00	55,20	46,70	33,00	22,50	11,90	13,90
26	78,80	65,90	58,90	49,60	41,70	27,50	17,30	10,30	6,60
26	77,60	64,80	58,20	49,30	41,20	27,10	16,80	10,60	6,70
27	227,80	199,20	176,90	146,40	119,00	75,80	45,80	25,40	14,20
27	227,00	199,70	177,00	147,20	119,60	76,50	45,70	26,70	16,20
28	154,40	133,10	119,30	100,20	83,80	58,50	42,80	31,00	24,60
28	151,70	129,90	116,80	98,00	82,00	57,30	42,10	29,70	24,50
29	97,10	87,40	84,20	77,30	72,20	61,50	50,90	43,20	35,20
29	98,30	88,60	85,30	78,90	73,10	62,70	51,30	44,10	36,40
30	297,30	268,20	241,20	207,10	173,60	118,00	80,20	55,50	41,30
30	299,10	269,00	242,40	207,40	173,50	118,50	81,30	57,30	42,80
31	146,10	131,50	119,10	105,10	91,30	69,30	54,30	42,00	33,20
31	149,30	133,60	122,30	106,80	93,30	71,20	55,30	44,30	34,30
32	80,60	70,20	64,90	59,50	54,70	45,60	39,20	32,80	26,60
32	82,40	71,60	66,50	60,90	55,80	46,80	39,80	32,70	27,20
33	79,60	69,30	64,00	59,10	55,00	45,40	38,10	31,10	25,90
33	81,10	70,10	65,00	59,90	55,20	46,00	38,80	32,00	26,40
34	160,20	141,00	127,50	109,00	90,90	61,20	39,80	24,50	15,50
34	164,50	143,80	129,70	111,70	93,80	62,70	40,30	24,80	16,30
35	135,60	116,90	105,20	92,20	79,70	55,60	38,30	26,60	18,80
35	138,90	118,90	106,70	93,70	81,00	56,90	39,80	28,30	19,50
36	217,00	187,40	163,00	128,60	99,50	57,00	32,00	18,40	11,30
36	221,30	191,30	166,70	131,80	101,70	58,50	33,20	19,80	12,40
37	457,50	385,20	320,90	249,40	191,90	115,30	74,80	50,30	34,80
37	460,80	390,40	327,80	256,60	198,20	119,30	76,30	51,50	35,90
38	909,20	670,40	562,60	387,90	285,90	128,20	75,30	52,00	39,70
38	884,20	671,90	563,60	394,00	292,50	130,70	76,60	52,10	39,10
39	59,30	48,40	43,50	37,00	32,10	22,80	16,00	10,10	6,60
39	57,50	46,80	41,80	36,10	31,00	22,00	15,20	11,30	6,30
40	157,80	130,80	114,40	89,00	69,50	43,00	29,40	21,30	18,70
40	153,90	126,80	110,50	86,70	67,50	41,70	28,00	21,00	18,50

## Annexe

Les résultats du FWD des déflexions sens retour :

Station ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
1	201,000	187,400	175,800	157,900	137,600	97,600	66,400	44,400	28,900
1	196,600	183,300	172,500	154,600	134,600	95,700	65,400	43,400	28,300
2	222,100	165,000	133,500	101,000	79,900	46,700	26,000	15,300	12,200
2	213,200	159,100	129,300	97,700	77,100	44,800	26,000	15,500	11,500
3	279,400	235,000	208,700	173,500	142,600	93,800	62,200	44,300	33,200
3	278,000	233,200	207,900	173,200	142,600	94,000	63,100	45,100	33,900
4	485,800	388,900	323,000	240,300	179,200	104,700	67,500	48,000	35,800
4	482,300	387,200	322,600	241,600	180,500	106,200	69,800	50,400	36,500
5	208,900	161,200	132,100	96,200	68,500	31,600	14,900	6,300	2,600
5	206,000	159,500	130,700	95,700	68,800	32,000	14,900	6,400	3,100
6	100,600	88,500	80,200	71,700	62,200	45,700	32,700	22,200	15,000
6	102,000	89,200	81,600	72,500	62,100	46,700	33,000	24,200	14,800
7	110,500	98,800	89,400	79,100	68,700	50,500	37,200	26,700	19,300
7	111,100	99,400	90,100	79,700	69,300	50,800	37,300	26,800	19,500
8	274,400	242,800	217,000	181,300	147,900	95,100	60,400	35,100	23,300
8	277,200	243,900	219,100	183,400	149,400	95,900	60,400	37,600	24,700
9	261,600	231,700	214,400	182,800	159,200	112,500	80,500	55,700	42,500
9	268,000	236,800	219,700	188,800	162,700	116,400	82,000	55,100	43,300
10	96,600	80,200	73,000	64,200	56,200	43,000	33,400	25,500	19,300
10	100,400	83,900	75,700	66,900	58,700	44,800	34,700	26,600	19,800
11	66,000	56,300	53,200	47,300	43,300	35,400	29,100	23,900	20,000
11	68,700	56,300	55,000	48,700	44,400	36,700	30,100	25,000	20,700
12	156,000	136,100	126,100	108,900	94,600	70,100	53,500	43,100	32,500
12	158,900	136,200	126,200	109,400	94,900	70,500	52,800	38,100	32,900
13	125,300	109,300	101,000	89,900	78,800	59,500	44,900	33,400	25,500
13	125,500	109,900	101,200	89,800	79,100	59,900	45,100	33,700	26,100
14	140,300	122,900	113,000	100,600	88,700	68,400	52,700	40,600	31,000
14	138,600	121,200	112,200	100,100	87,700	68,000	52,400	41,200	31,600
15	94,100	81,400	72,900	62,500	53,000	37,100	25,300	16,600	11,900
15	95,000	80,700	71,400	62,500	52,700	36,700	24,800	16,200	12,100
16	100,400	87,900	79,700	69,600	60,300	44,700	33,300	24,700	19,800
16	97,900	84,800	76,400	67,300	58,400	43,100	32,100	23,800	19,000
17	184,200	156,400	135,800	105,700	79,100	40,300	17,300	6,000	1,500
17	179,200	151,400	131,700	102,600	76,800	38,800	16,400	5,600	1,900
18	217,600	190,300	169,800	139,400	112,100	69,600	42,900	27,000	18,200
18	213,500	186,800	166,200	136,700	109,600	68,700	41,800	28,000	18,700
19	239,100	211,400	188,500	155,900	125,300	76,700	45,500	27,800	17,800
19	237,500	209,600	186,300	154,400	124,300	76,400	45,600	28,200	18,200
20	284,400	251,400	229,200	193,000	159,700	105,600	69,600	45,900	34,800
20	283,700	251,100	228,300	192,000	159,200	105,600	70,800	48,000	34,900
21	224,400	199,900	181,800	155,700	130,600	89,100	61,300	42,200	31,400
21	223,200	198,300	180,900	154,200	129,500	88,700	61,100	42,700	31,500

## Annexe

22	168,600	153,600	143,600	129,700	116,200	90,300	68,500	50,700	41,100
22	165,900	151,300	141,900	128,500	114,500	89,200	68,000	50,300	40,700
23	175,100	156,000	141,400	123,000	104,800	73,600	49,900	33,400	24,600
23	170,700	151,300	139,500	118,800	100,800	71,500	50,300	34,400	23,500
24	122,800	103,100	90,800	73,000	58,100	33,500	19,700	11,400	6,400
24	120,000	100,600	88,500	71,300	56,400	32,900	18,000	11,700	6,300
25	282,300	243,100	210,400	168,800	130,500	69,800	33,900	17,300	8,300
25	278,400	239,600	206,800	165,100	128,100	68,400	33,100	15,300	7,900
26	155,500	135,500	123,700	106,400	89,300	60,100	39,000	24,800	16,000
26	154,100	134,800	122,700	105,400	88,100	59,700	38,800	24,200	15,500
27	123,400	109,700	101,100	90,700	79,800	60,900	45,300	33,800	27,000
27	125,000	109,300	103,200	91,100	80,600	61,100	45,900	35,500	27,400
28	108,700	97,900	91,300	82,300	74,000	57,500	44,500	33,600	26,700
28	107,300	96,000	90,100	80,300	71,500	57,200	45,400	34,500	26,300
29	75,500	67,300	63,000	58,900	55,200	47,100	38,800	32,600	26,100
29	75,300	67,000	63,800	59,800	55,400	46,800	39,000	33,000	25,500
30	71,800	62,500	60,600	55,700	52,400	45,500	40,100	33,600	26,600
30	71,200	62,000	59,100	55,300	52,300	45,300	39,400	34,400	26,600
31	80,100	68,600	65,700	61,600	58,000	50,500	43,500	36,400	30,100
31	78,000	68,900	65,800	62,400	58,400	50,300	43,200	35,200	29,900
32	76,400	67,600	64,400	60,100	56,300	49,100	42,000	35,900	28,800
32	76,800	68,600	64,300	60,200	56,500	49,200	43,200	36,200	28,200
33	60,900	51,200	48,800	44,400	41,600	35,600	31,300	26,800	22,500
33	60,500	51,000	48,200	44,600	41,300	35,800	30,700	25,900	22,100
34	60,200	49,400	46,500	41,500	38,300	31,500	27,100	23,400	17,900
34	58,600	49,900	45,500	41,400	38,200	30,900	25,300	19,800	18,400
35	53,900	43,700	41,200	36,000	32,400	26,500	21,500	18,600	12,800
35	55,700	44,800	42,000	36,900	33,000	26,800	21,400	17,000	13,100
36	228,200	189,900	159,200	117,800	84,600	40,400	18,900	10,800	7,400
36	219,200	182,300	152,800	112,800	81,000	39,100	18,800	12,100	7,500