Analyse de la variabilité des mesures de déflexion a la poutre Benkelman dans le cadre des travaux de réhabilitation de l'Autoroute du Nord : Identification des facteurs explicatifs et recommandations méthodologiques - Cas du PK 103 au PK 117

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2iE AVEC GRADE

MASTER

SPECIALITE : Génie Civil – Bâtiment et Travaux Publics

Présenté et soutenu publiquement le 15/07/2026 par :

Moussa Abdoul chérif waota SOGODOGO

(20221079)

Encadrant 2iE : Dr (MA) Marie Thérèse MBENGUE, Enseignant-Chercheur, Département Génie Civil, Institut 2iE

Maitre de stage : Monsieur Roméo KANGA, Chef de mission au BNETD

Structure d'accueil : Bureau National de l'Etude Technique et du Développement (BNETD)

Jury d'évaluation du stage :

Président : Pr. Adamah Messan

Membres et correcteurs :

M. Ousseini MONE

M. Komi Jeannot N'TSOUKPOE

DEDICACE

À mes parents,

Pour leur sacrifice, leur amour inconditionnel et leur soutien sans faille tout au long de mon parcours académique.

À mes enseignants,

Pour leurs efforts constants dans la transmission du savoir et la formation d'ingénieurs compétents et responsables.

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce travail, je dédie humblement ce mémoire.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à **l'institut 2iE** pour la qualité de la formation reçue et pour l'opportunité qui m'a été donnée de réaliser ce stage de fin d'études.

Mes remerciements vont également à **Monsieur KANGA Roméo**, mon maître de stage au **BNETD (Bureau National d'Études Techniques et de Développement)**, à **Monsieur Yacouba Fofana, Directeur DTIT,** à **Monsieur Agbohué Patrice, Coordonnateurs programmes DTIT,** pour leur disponibilité, leur orientation précieuse et leur accompagnement durant toute la période du stage.

J'adresse mes sincères remerciements à l'ensemble du personnel du **BNETD**, unité d'exécution du projet de réhabilitation de l'autoroute du Nord, pour leur accueil chaleureux et leur soutien technique.

Je remercie aussi **mon encadreur académique à 2iE**, **Docteure Marie-Thérèse MBENGUE**, pour ses conseils méthodologiques et ses observations constructives qui ont permis d'améliorer la qualité de ce travail.

Enfin, ma reconnaissance va à ma famille, mes amis et mes camarades pour leur encouragement constant.

Table des matières

DEDICACE ii
REMERCIEMENTS iii
ABREVIATIONS ET SIGLES vi
RESUME ix
ABSTRACT x
INTRODUCTION GENERALE 1
CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL ET DU PROJET ET DE L'ETUDE 3
I.1 PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL 3
I.1.1. Raisons sociales et missions principales 3
I.1.1.1. Organisations et domaines d'interventions 3
I.1.1.2. Rôle du stagiaire et encadrement 5
I.2.PRESENTATION DU PROJET ETUDIE : REHABILITATION DE L'AUTOROUTE DU NORD (PK 103 – PK 117) 5
I.2.1. Importance socio-économique du projet 8
I.2.2. Contraintes et enjeux techniques du diagnostic de chaussée 8
I.2.3. Comparaison des campagnes de déflexion avant-projet et pendant projet 8
I.3. PRESENTATION DE L'ETUDE 9
Conclusion partielle 12
CHAPITRE II : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE ET CADRE THEORIQUE 13
II.1. Généralités sur les chausses souples 13
II.2. Dégradation des chaussées et nécessité de réhabilitation 14
II.3. Diagnostic structurel des chaussées 15
II.4. Essai de déflexion à la poutre Benkelman 16
II.5. Facteurs influençant la mesure de déflexion 18
II.5.1. Influence des conditions climatiques 18
II.5.2. Influence de l'état de surface 18
II.5.3. Influence des caractéristiques des matériaux et de la structure de la chaussée 19
II.5.4. Influence de la méthode de mesure 19
II.6. Traitement statistique des mesures de déflexion 21
II.7. Apport de la revue bibliographique a la présente étude 22
Conclusion partielle 23
CHAPITRE III : METHODOLOGIE DE L'ETUDE 24
III.1. Approche méthodologique 24
III.2. Données collectées et outils utilisés 25

III.2.1. Mesures de déflexions 25
III.2.2. Facteurs climatiques et géotechniques : éléments disponibles et limites de la collecte 26
III.2.3. Etat de surface de vieillissement 27
III.3. Méthodes de traitement et d'analyse des données 28
III.3.1. Prétraitement des données 28
III.3.2. Calculs statistiques 30
III.3.3. Limites et contraintes rencontrées 31
Conclusion partielle 32
Chapitre IV. Résultats et analyses 33
IV.1. Présentation des données recueillies 33
IV.2. Effet du vieillissement et de l'état de surface 37
IV.2.1. Comparaison des déflexions avant-projet et pendant projet 38
IV.2.2. Influence des désordres de surface sur les valeurs de déflexion observées 40
IV.3. Analyse de la variabilité par coefficient de variation 44
Conclusion partielle 45
Chapitre V. DISCUSSION ET INTERPRETATION DES RESULTATS 47
V.1.Interprétation des résultats 47
Conclusion partielle 51
Conclusion générale et perspectives 52
Conclusion générale 52
Perspectives 53
Bibliographie 55
Annexe 1 : Fiche de déflexion ii
Annexe 2 : Calcul des déflexions vii

ABREVIATIONS ET SIGLES

MEER	:	Ministère de l'équipement et de l'entretien routier
BNETD	:	Bureau National d'Etudes technique et de Développement
LBTP	:	Laboratoire Bâtiment et Travaux Publics
FER	:	Fonds de l'entretien Routier
PK	:	Points kilométriques

LISTE DES FIGURES

Figure 1:Organigramme du BNETD..... 4
Figure 2:Panneau de présentation du projet de renforcement de l'autoroute du Nord (PK 103- PK 117) 6
Figure 3 : Coupe transversale d'une chaussée souple..... 14
Figure 4 : Principe de l'essai à la poutre Benkelman 17
Figure 5:Mise en place de la poutre Benkelman derrière le camion de charge 25
Figure 6:Exemple de chaussée fissurée avant essai de déflexion 27
Figure 7 : Répartition statistique des valeurs de déflexion avant rabotage..... 37
Figure 8 : Déflexion caractéristique par tronçon avec indication du seuil critique de $70*10-2mm$ (Avant rabotage)..... 38
Figure 9 : Comparaison des déflexions caractéristiques avant et pendant projet sur la voie lente 39
Figure 10:Comparaison des déflexions caractéristique savant et pendant projet sur la voie rapide..... 40
Figure 11:Histogramme du coefficient de variation Avant et Apres rabotage 44

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1:Exemple de délimitation des tronçons sur Excel 29
Tableau 2:Exemple d'anomalie de mesure détectée sur la fiche d'essai d'après rabotage 29
Tableau 3 : Résultats statistiques globaux des campagnes de mesure de déflexion sur le tronçon PK 103-PK 117 34
Tableau 4: Extrait de fiches de déflexion avant rabotage (exemple de données brutes traitées sous Excel) 35
Tableau 5 : Synthèse des dégradations de surface associées aux zones de fortes déflexions sur le tronçon PK 103- PK 117 41
Tableau 6: Tableau d'interprétation des valeurs du coefficient de variation Source : Elaboration de l'auteur a partir des principes d'analyse statistique du coefficient de variation 45

RESUME

L'auscultation des chaussées par la méthode de la déflexion constitue un outil essentiel pour l'évaluation structurelle des routes revêtues et la planification des travaux d'entretien.

Dans le cadre du projet de renforcement de l'autoroute du Nord (PK 103–PK 117), conduit par le BNETD pour le compte du Ministère de l'Équipement et de l'Entretien Routier, des variations significatives des valeurs de déflexion ont été observées entre les différentes campagnes de mesure. En particulier, les déflexions mesurées après rabotage se sont révélées, sur plusieurs sections, supérieures à celles enregistrées avant rabotage, tandis que des variations ont également été constatées sur la couche de base en GB 0/14. Ces observations ont conduit à analyser les facteurs susceptibles d'expliquer cette variabilité.

Les résultats montrent que la variabilité des mesures de déflexion est liée à l'action combinée du vieillissement du revêtement, des dégradations de surface, des caractéristiques structurelles des couches de chaussée et des conditions opératoires des essais. Les conditions climatiques, notamment la température et l'humidité, apparaissent également comme des facteurs explicatifs potentiels, conformément aux enseignements de la littérature. L'analyse du coefficient de variation a permis d'évaluer la dispersion des mesures et d'apprécier le degré d'homogénéité des sections étudiées.

L'étude met également en évidence que l'absence d'un enregistrement systématique des paramètres climatiques lors des campagnes de mesure limite l'interprétation des résultats. Elle recommande l'enregistrement systématique de la température et de l'humidité, la vérification régulière de l'étalonnage de la poutre Benkelman ainsi que l'association des mesures de déflexion aux observations visuelles et à des essais complémentaires afin d'améliorer la fiabilité du diagnostic structurel et d'optimiser les stratégies d'entretien des chaussées en Côte d'Ivoire.

Mots clés

- Déflexion
- Chaussée
- Variabilité
- Facteurs climatiques
- BNETD

ABSTRACT

Pavement evaluation using the deflection method is an essential tool for assessing the structural condition of flexible pavements and planning maintenance works.

As part of the rehabilitation project of the Northern Motorway (PK 103–PK 117), carried out by the Bureau National d'Études Techniques et de Development (BNETD) on behalf of the Ministry of Equipment and Road Maintenance of Côte d'Ivoire, significant variations in deflection measurements were observed between successive survey campaigns. In particular, deflection values measured after milling were, in several sections, higher than those recorded before milling, while additional variations were observed on the GB 0/14 base layer. These observations motivated the investigation of the factors likely to explain the variability of the measurements.

The results indicate that the variability of deflection measurements is related to the combined effects of pavement ageing, surface distresses, structural characteristics of pavement layers, and testing conditions. Climatic factors, particularly temperature and humidity, also appear to be potential contributors to the observed variability, in agreement with findings reported in the literature. Furthermore, the analysis of the coefficient of variation made it possible to assess the dispersion of the measurements and the degree of structural homogeneity of the different pavement sections.

The study also highlights that the absence of systematic recording of climatic parameters during Benkelman Beam surveys limits the interpretation of the results. It therefore recommends the systematic monitoring of temperature and humidity during survey campaigns, regular calibration of the Benkelman Beam, and the integration of deflection measurements with visual inspections and complementary tests in order to improve the reliability of structural diagnosis and optimize pavement maintenance strategies in Côte d'Ivoire.

Keywords

- Déflection
- Pavement
- Variability
- Climatics factors
- BNETD

INTRODUCTION GENERALE

Le réseau routier ivoirien constitue un élément essentiel du développement économique et social du pays. Il assure la mobilité des personnes et des biens, facilite les échanges commerciaux et contribue à l'intégration des différentes régions. Parmi les infrastructures majeures, l'autoroute du Nord reliant Abidjan à Yamoussoukro joue un rôle stratégique dans le transport national. Toutefois, l'augmentation du trafic, notamment des poids lourds, ainsi que les conditions climatiques ont progressivement entraîné la dégradation de sa structure, rendant nécessaires des travaux de réhabilitation.

Dans le cadre du projet de renforcement de cette autoroute, le Ministère de l'Équipement et de l'Entretien Routier (MEER), avec l'appui du Bureau National d'Études Techniques et de Développement (BNETD), a entrepris des campagnes d'auscultation sur le tronçon PK 103–PK 117 afin de caractériser le comportement structurel de la chaussée. Parmi les essais réalisés, la mesure de la déflexion à l'aide de la poutre de Benkelman constitue un indicateur essentiel pour évaluer la portance des chaussées et orienter les décisions de dimensionnement des travaux de renforcement.

L'analyse des données recueillies a toutefois mis en évidence des variations importantes des valeurs de déflexion entre différentes campagnes de mesure, notamment entre les mesures réalisées avant et après rabotage ainsi qu'au niveau de la couche de base en GB 0/14. Ces observations soulèvent des interrogations quant aux facteurs responsables de cette variabilité et à leur influence sur la fiabilité du diagnostic structurel des chaussées.

La présente étude cherche ainsi à répondre à la question suivante :

Quelles sont les causes de la variabilité des mesures de déflexion observées sur le tronçon PK 103–PK 117 de l'autoroute du Nord et dans quelle mesure cette variabilité affecte-t-elle la fiabilité du diagnostic structurel de la chaussée ?

L'objectif général de ce travail est d'analyser les facteurs susceptibles d'expliquer la variabilité des mesures de déflexion afin d'améliorer l'interprétation des résultats et de proposer des recommandations pour les futures campagnes d'auscultation.

Plus spécifiquement, le travail vise à :

- Identifier et caractériser les sources de variabilité des mesures de déflexion à partir des données

disponibles (conditions de chantier, état de surface, phases d'intervention) ;

- Etudier les facteurs susceptibles influençant la variabilité des mesures à travers une revue bibliographique ;
- Quantifier la dispersion intra-campagne à travers une analyse statistique comparative ;
- Comparer les déflexions Avant-projet aux déflexions pendant projet.

Pour répondre à cette problématique, une approche méthodologique fondée sur l'exploitation rigoureuse des données de terrain a été adoptée. Les mesures ont été effectuées conformément à la norme NF P 98-200, puis traitées et analysées à l'aide d'outils statistiques (moyenne, écart- type, déflexion caractéristique, coefficient de variation) afin de dégager les tendances et les causes probables de variabilité.

Cette démarche s'inscrit dans la réalité des projets routiers africains, ou les contraintes de terrain, l'absence d'instruments climatiques embarqués, restriction des phases de rabotage par le maitre d'ouvrage, continuité du trafic constituent des défis techniques récurrents. Y répondre avec les données disponibles, en transparence sur les limites méthodologiques, constitue en soi une contribution à l'amélioration des pratiques d'auscultation en Côte d'Ivoire.

Le mémoire s'articule autour de cinq chapitres principaux :

- Le premier chapitre présente la structure d'accueil et le projet de réhabilitation de l'autoroute du Nord ;
- Le deuxième chapitre expose la revue bibliographique et le cadre théorique ;
- Le troisième chapitre est consacré à la méthodologie adoptée pour la collecte de traitement des données de déflexion ;
- Le quatrième chapitre est consacré à l'analyse et à la présentation des résultats obtenus.
- Le cinquième chapitre est consacré à la discussion et interprétation des résultats.

CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL ET DU PROJET ET DE L'ETUDE

I.1 PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL

I.1.1. Raisons sociales et missions principales

Le **Bureau National d'Études techniques et de Développement (BNETD)** est une institution publique ivoirienne chargée d'accompagner l'État dans la planification, la conception, l'exécution et le contrôle des projets de développement. Créé afin de doter le pays d'une structure d'ingénierie nationale forte, le BNETD intervient comme un acteur stratégique dans la réalisation des infrastructures et l'appui technique aux administrations publiques.

Les missions du BNETD couvrent un ensemble d'activités essentielles telles que :

- **La réalisation d'études techniques** dans les domaines des infrastructures routières, hydrauliques, énergétiques, environnementales et architecturales ;
- **Le contrôle et le suivi des travaux** d'infrastructures publiques afin d'assurer la conformité des réalisations ;
- **L'assistance à maitrise d'ouvrage**, permettant aux institutions étatiques de disposer d'un accompagnement technique fiable durant toutes les phases des projets ;
- **L'expertise et l'audit technique**, destinés à diagnostiquer, évaluer et améliorer les ouvrages existants ;
- **La planification et l'aménagement du territoire**, pour une gestion durable du développement national.

A travers ces missions, le BNETD se positionne comme un pilier du développement en Côte d'Ivoire, garantissant la qualité, la fiabilité et la durabilité des infrastructures réalisées. Son implication dans les projets routiers, notamment dans les activités de diagnostic et de contrôle, en fait un acteur clé du processus de réhabilitation de l'autoroute du Nord.

I.1.1.1. Organisations et domaines d'interventions

Le BNETD est structuré autour d'une **Direction Générale**, appuyée par plusieurs directions opérationnelles organisées selon les différents domaines techniques. Cette organisation permet une gestion efficace des projets complexes, grâce à une mobilisation de compétences

multidisciplinaires.

Les principaux domaines d'intervention comprennent :

- **Les infrastructures routières et les ouvrages d'art,**
- **L'hydraulique urbaine et rurale,**
- **Le bâtiment et l'architecture,**
- **L'énergie et les réseaux électriques,**
- **L'aménagement du territoire,**
- **La topographie et les études géotechniques.**

Dans le cadre du présent stage, l'intégration s'est faite au sein du département en charge des infrastructures routières, structure chargée du suivi, du contrôle et du diagnostic des projets routiers à l'échelle nationale. C'est ce département qui supervise le projet de réhabilitation de l'autoroute du Nord et qui coordonne les missions de terrain, notamment les campagnes de mesures de déflexion utilisées pour le diagnostic de la portance des chaussées. La figure 1 montre l'organigramme du BNETD.

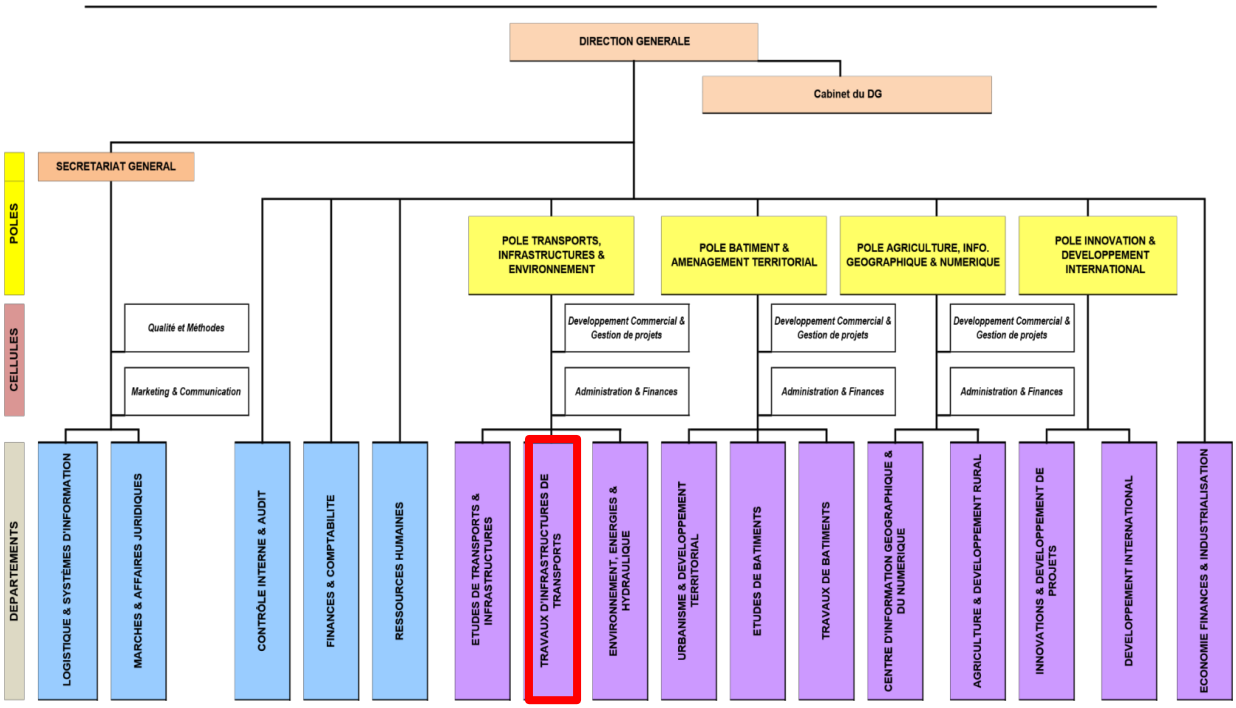


Figure 1:Organigramme du BNETD

I.1.1.2. Rôle du stagiaire et encadrement

Durant la période de stage, le travail a été réalisé sous la supervision de **Monsieur KANGA ROMEO**, maître de stage au BNETD. L'encadrement a également été assuré par l'équipe technique en charge du projet, composée d'ingénieurs, de techniciens et de contrôleurs.

Le rôle du stagiaire a principalement porté sur :

- La participation aux campagnes de mesures de déflexions sur le tronçon PK 103- PK 117 ;
- La collecte des données de terrain, y compris l'état de surface, les conditions climatiques et les relevés techniques ;
- L'analyse préliminaire des résultats, sous la supervision des ingénieurs ;
- L 'assistance au suivi des travaux et au contrôle de la qualité des interventions ;
- La rédaction de notes techniques, comptes rendus et documents liés au diagnostic.

Cette immersion a permis d'acquérir une meilleure compréhension des méthodes de diagnostic des chaussées, de l'utilisation des appareils de mesure, ainsi que du fonctionnement opérationnel d'un projet routier de grande envergure.

I.2.PRESENTATION DU PROJET ETUDIE : REHABILITATION DE L'AUTOROUTE DU NORD (PK 103 – PK 117)

L'autoroute du Nord, reliant Abidjan à Yamoussoukro, constitue l'un des axes majeurs du réseau routier ivoirien. L'Axe Abidjan-Singrobo totalisant un tronçon de 140 Km a été réalisé de 1975 à 1982 puis l'axe Singrobo-Yamoussoukro totalisant aussi un tronçon de 86 Km a été réalisé de 2007 à 2013. Ces deux axes jouent un rôle déterminant dans le transport de personnes et de marchandises entre le sud et le nord du pays.

Le tronçon PK 103 – PK 117 fait partie du programme de réhabilitation lancé par le Ministère de l'Equipement et de l'Entretien routier (MEER), sous la maitrise d'œuvre du BNETD et le contrôle technique du Laboratoire du Bâtiment et des Travaux publics (LBTP).

Ce projet vise à restaurer la capacité portante et à améliorer la durabilité de la structure de la chaussée. Il s'inscrit également dans le cadre des préparatifs des grands événements internationaux, notamment la Coupe d'Afrique des Nations (CAN 2023).

Le projet est matérialisé sur le terrain par un panneau de présentation (Figure 2) indiquant les principaux acteurs impliqués, à savoir le Ministère de l'Equipement et de l'Equipement et de l'Entretien routier (MEER) en tant que maitre d'ouvrage, le Fonds d'Entretien Routier (FER) pour le financement, le BNETD comme maitre d'œuvre, le LBTP pour le contrôle technique et l'entreprise PORTEO BTP chargée de l'exécution des travaux.



Figure 2:Panneau de présentation du projet de renforcement de l'autoroute du Nord (PK 103- PK 117)

Les objectifs principaux du projet sont les suivants :

- Améliorer le niveau de service et la sécurité des usagers ;
- Augmenter la durabilité et la résistance mécanique de la chaussée ;
- Réduire les couts d'entretien futurs ;
- Adapter la structure aux exigences du trafic poids lourds croissant.

Avant le lancement des travaux, une campagne d'inspection visuelle et d'auscultation structurelle a été réalisée sur le tronçon PK 103-PK 117 afin d'évaluer l'état de la chaussée existante. Cette phase de diagnostic a mis en évidence plusieurs formes de dégradations traduisant un vieillissement avancé de la structure.

Les principales dégradations observées sur le terrain étaient constituées de fissures longitudinales et transversales, de zones de faïençage ainsi que de nids de poule localisés.

L'évaluation du niveau de gravité a montré plusieurs zones de faïençage ainsi des nids de poule localisés. Ces désordres indiquaient une perte progressive de continuité mécanique du revêtement

ainsi qu'une diminution de la capacité portante de certaines sections.

Dans ces conditions, un simple entretien courant n'était plus suffisant pour restaurer durablement les performances de la chaussée.

En effet, sur plusieurs points kilométriques, l'ampleur des dégradations dépassait le cadre des opérations classiques d'entretien (colmatage, reprises ponctuelles ou resurfaçage localisé). Une intervention structurelle plus profonde s'est alors imposée afin de restaurer la portance globale de la chaussée. Par ailleurs, des remontées d'informations provenant des usagers ont signalé une dégradation du confort de roulement ainsi qu'une détérioration progressive des conditions de circulation sur certaines portions du tronçon. Ces constats ont contribué à orienter la décision vers une opération de réhabilitation.

Dans ce contexte, le scénario retenu a consisté à procéder au rabotage du revêtement existant (Une couche de base en grave-bitume GB 0/14 d'épaisseur 5 cm et une couche de roulement en BB d'épaisseur 5 cm), suivi de la mise en œuvre d'une couche de base en grave-bitume GB 0/14 d'épaisseur 6 cm, puis de l'application d'une nouvelle couche de roulement en béton bitumineux (BB) d'épaisseur 5 cm. Le rabotage visait principalement à éliminer les couches superficielles présentant les plus fortes dégradations et à créer une interface favorable à la reprise structurelle. La couche de base en grave-bitume avait pour rôle de redistribuer les charges du trafic vers les couches inférieures tout en assurant une meilleure rigidité globale de la structure. Enfin, la couche de roulement en béton bitumineux avait pour objectif de restaurer les caractéristiques de surface, notamment l'adhérence, l'étanchéité et le confort de circulation.

Cependant, malgré cette stratégie de réhabilitation, les campagnes successives de mesures de déflexion ont révélé des variations parfois importantes entre certaines valeurs enregistrées avant le projet et celles révélées au cours des travaux.

Cette évolution inattendue des mesures constitue l'élément déclencheur de la présente étude, orientée vers l'analyse des facteurs pouvant expliquer la variabilité des déflexions mesurées sur le tronçon étudié.

Le diagnostic structurel, réalisé avant et après les travaux, vise à évaluer la portance résiduelle de la chaussée et à vérifier la conformité des résultats aux spécifications du projet.

I.2.1. Importance socio-économique du projet

L'autoroute du Nord constitue un axe majeur de mobilité entre Abidjan et les grandes villes intérieures telles que Yamoussoukro, Bouaké et Korhogo. Son bon fonctionnement est crucial pour :

- Le développement économique national,
- La fluidité du transport de marchandises et de produits agricoles,
- La compétitivité du port autonome d'Abidjan,
- La desserte des zones industrielles et agro-industrielles,
- La circulation des populations et l'intégration territoriale.

Sa réhabilitation contribue également à réduire les couts logistiques, à améliorer la sécurité routière et à soutenir la croissance économique du pays.

I.2.2. Contraintes et enjeux techniques du diagnostic de chaussée

Le diagnostic de chaussée constitue une étape déterminante dans le dimensionnement des travaux de réhabilitation. Toutefois, plusieurs facteurs compliquent cette démarche :

- **Les conditions climatiques variables** au moment des mesures ;
- **L'hétérogénéité des matériaux en place** ;
- **Le vieillissement différencié selon les sections** ;
- **Les limitations liées à la circulation et à l'accessibilité** lors des essais ;
- **La variabilité des valeurs de déflexion** ; rendant l'interprétation parfois complexe.

Ces contraintes soulignent l'importance d'une méthodologie rigoureuse pour fiabiliser les résultats. L'analyse approfondie des facteurs de variabilité des déflexions, objet du présent mémoire, permet ainsi d'améliorer la précision du diagnostic et la qualité du dimensionnement des renforcements.

I.2.3. Comparaison des campagnes de déflexion avant-projet et pendant projet

Dans le cadre des études préparatoires au renforcement de l'autoroute du Nord, une première campagne de mesures de déflexion a été réalisée avant le démarrage des travaux afin d'évaluer l'état structurel initial de la chaussée et de définir les besoins d'intervention.

Par la suite, une seconde campagne a été réalisée pendant l'exécution des travaux afin de vérifier le comportement de la structure après les premières opérations de réhabilitation et d'apprécier l'évolution de la portance.

Un extrait des données comparatives de déflexion avant-projet et pendant projet est présenté en Annexe 1 afin d'utiliser les écarts observés entre les deux campagnes de mesure.

Cette situation suggère que les mesures de déflexion ne dépendent pas uniquement de la structure de la chaussée, mais peuvent également être influencées par plusieurs paramètres tels que :

- Les conditions climatiques au moment des essais :
- Le niveau de dégradation initial ;
- L'état de surface après intervention ;
- La nature des couches sollicitées ;
- Les conditions de réalisation des mesures.

Ainsi, au-delà du simple diagnostic de portance, ces différences de résultats ont conduit à s'interroger sur la fiabilité et la reproductibilité des campagnes de mesure.

C'est cette observation qui constitue le point de départ de la présente étude et qui conduit à la problématique suivante :

Quels sont les facteurs responsables des écarts observés entre les différentes campagnes de mesures de déflexion sur le tronçon PK 103 – PK 117, et dans quelle mesure le sens de ces variations influence-t-il la fiabilité du diagnostic structurel de la chaussée ?

I.3. PRESENTATION DE L'ETUDE

Dans le cadre du programme national de renforcement et d'entretien des infrastructures routières, le Ministère de l'Équipement et de l'Entretien Routier (MEER) a engagé, à travers le BNETD, une série d'études techniques visant à évaluer l'état structurel de l'autoroute du Nord. Cette démarche s'inscrit dans une perspective de maintenance préventive et d'optimisation des investissements routiers à long terme.

L'étude présentée dans le cadre de ce mémoire porte spécifiquement sur la section PK 103-117 de l'autoroute du Nord. Cette portion, bien qu'ayant fait l'objet d'interventions antérieures, présente encore des disparités de comportement mécanique observées au cours des essais de déflexion réalisés à la poutre de Benkelman. Ces mesures, effectuées à différentes étapes de la réhabilitation (Avant rabotage, Après rabotage et sur la couche de base en GB 0/14), ont été relevées des variations parfois significatives sur le tronçon, malgré des conditions apparentes de mesure similaires.

Partant de ce constant, la présente étude vise à analyser les facteurs susceptibles d'expliquer la variabilité des mesures de déflexion. Elle cherche également à améliorer l'interprétation de ces mesures dans le cadre du diagnostic structurel des chaussées, en s'appuyant sur l'analyse de l'état de surface, des conditions de réalisation des essais et des facteurs environnementaux identifiés dans la littérature comme pouvant influencer le comportement mécanique des chaussées.

Par ailleurs, l'étude s'intéresse à la dispersion des valeurs de déflexion enregistrées au cours des différentes campagnes de mesure. A travers l'utilisation d'indicateurs statistiques tels que la moyenne, l'écart-type, la déflexion caractéristique et le coefficient de variation, elle vise à apprécier le degré d'homogénéité structurelle des sections étudiées et à évaluer la cohérence des résultats obtenus. Cette démarche permet ainsi d'apporter un éclairage complémentaire sur la fiabilité du diagnostic réalisé à partir des essais de déflexion.

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la collaboration entre le BNETD, chargé du contrôle et du suivi technique, et le Laboratoire du Bâtiment et des Travaux publics (LBTP), responsable de l'auscultation et du traitement des données de déflexion. Les campagnes de mesure réalisées sur le terrain constituent la base de données principale de cette étude.

Ces données ont ensuite été exploitées et analysées à l'aide d'outils statistiques sous Microsoft Excel, afin d'évaluer la portance, la variabilité et la cohérence des résultats enregistrés le long du tronçon.

L'intérêt scientifique de cette étude réside dans le fait qu'elle aborde une problématique concrète rencontrée dans la pratique du diagnostic routier : la variabilité intra-tronçon des mesures de déflexion. En cherchant à comprendre les origines de ces écarts, le travail contribue à améliorer la fiabilité des essais réalisés à la poutre de Benkelman et à renforcer la pertinence des décisions

techniques relatives aux travaux de réhabilitation. Ainsi, les résultats issus de cette analyse constituent une base de réflexion utile non seulement pour les ingénieurs du BNETD et du MEER, mais aussi pour l'ensemble des acteurs impliqués dans la gestion et la maintenance des infrastructures routières en Côte d'Ivoire.

Dans cette optique, la présente étude est orientée autour d'un objectif général, d'objectifs spécifiques ainsi que d'hypothèses de recherche permettant de guider l'analyse des résultats obtenus.

L'objectif général de ce mémoire est ainsi d'analyser les facteurs susceptibles d'expliquer la variabilité des mesures de déflexion sur la section PK 103 – PK 117 de l'Autoroute du Nord, ainsi que la fiabilité du diagnostic structurel afin de formuler des recommandations méthodologiques concrètes pour les futures campagnes d'auscultation**.**

De manière spécifique, il s'agit de :

- Identifier et caractériser les sources de variabilité des mesures de déflexion à partir des données disponibles (conditions de chantier, état de surface, phases d'intervention) ;
- Etudier les facteurs susceptibles influençant la variabilité des mesures à travers une revue bibliographique
- Quantifier la dispersion intra-campagne à travers une analyse statistique comparative ;
- Comparer les déflexions Avant-projet aux déflexions pendant projet

Afin d'orienter l'analyse et de vérifier les causes potentielles des écarts observés entre les campagnes de mesure, la présente étude repose sur les hypothèses suivantes :

Hypothèse générale :

La variabilité des mesures de déflexion observée sur le tronçon PK 103- PK 117 résulte de l'influence combinée de l'état de surface, des caractéristiques des matériaux constituant la structure, ce qui peut affecter la fiabilité du diagnostic structurel obtenu à partir des mesures de déflexion.

Hypothèses spécifiques :

- **H1 :** l'état de surface et le niveau de dégradation observé (fissures, faïençage, irrégularités locales) contribuent aux écarts de déflexion enregistrés sur un même tronçon.

- **H2 :** L'analyse statistique des mesures de déflexion, notamment à travers le coefficient de variation, permet d'apprécier le degré d'homogénéité structurelle des sections étudiées et d'améliorer l'interprétation de la variabilité observée.

Ces hypothèses constituent le fil conducteur de l'étude et serviront de base pour l'analyse, l'interprétation et la discussion des résultats présentés dans les chapitres suivants.

Conclusion partielle

En somme, ce premier chapitre a permis de présenter le cadre institutionnel et technique dans lequel s'inscrit cette étude. Le BNETD, structure d'accueil du stage, joue un rôle central dans la planification, le contrôle et l'évaluation des projets d'infrastructures en Côte d'Ivoire.

Le projet de réhabilitation de l'autoroute du Nord, et plus particulièrement du tronçon PK 103-PK 117, s'inscrit dans cette dynamique de modernisation du réseau routier national, afin d'assurer la durabilité et la sécurité.

L'analyse des travaux a mis en évidence la nécessité de cette nouvelle intervention, motivée par le vieillissement des matériaux et de la recrudescence des dégradations structurelles telles que les fissurations et faïençages.

Cependant, les écarts constatés entre certaines mesures de déflexion sur un même tronçon traduisent une variabilité importante du comportement de la chaussée, posant la question de la fiabilité et de l'interprétation des résultats.

Cette constatation justifie pleinement la présente étude, qui s'attache à analyser la variabilité des mesures de déflexion obtenues à la poutre de Benkelman et d'en identifier les facteurs explicatifs, en vue d'améliorer la fiabilité du diagnostic structurel des chaussées.

CHAPITRE II : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE ET CADRE THEORIQUE

La mesure de la déflexion constitue l'un des outils les plus utilisés pour l'évaluation structurelle des chaussées revêtues. Elle permet d'apprécier la capacité portante d'une structure de chaussée soumise à une charge roulante et d'orienter les décisions relatives à l'entretien, au renforcement ou à la réhabilitation du SETRA-LCPC [1]. La norme NF P 98-200-2 précise que la déflexion est un paramètre essentiel de l'auscultation des chaussées et définit les méthodes de mesure sous charge roulante.

Toutefois, les valeurs de déflexion ne dépendent pas uniquement de l'état structurel réel de la chaussée. Elles peuvent être influencées par plusieurs facteurs, notamment les conditions climatiques, l'état de surface, les conditions opératoires lors des mesures de déflexion [2] [3] [4]. C'est pourquoi une revue bibliographique est nécessaire afin de poser les bases théoriques permettant de comprendre et d'interpréter les résultats obtenus dans la présente étude.

Le présent chapitre présente donc les notions relatives à la structure des chaussées souples, au diagnostic structurel, à l'essai de déflexion a la poutre Benkelman, ainsi qu'aux principaux facteurs de variabilité des mesures.

II.1. Généralités sur les chausses souples

Selon le CEBTP, une chaussée souple est une structure multicouche destinée à supporter les charges du trafic et à les transmettre progressivement au sol support [5]. Elle est généralement constituée d'une couche de roulement, d'une couche de base, d'une couche de fondation et d'une plateforme support.

La couche de roulement est directement exposée au trafic et aux agressions climatiques. Elle assure l'adhérence, l'étanchéité, le confort de circulation et la protection des couches inférieures selon le LCPC-SETRA [6]. Lorsque cette couche vieillit, elle peut présenter des fissures, du faïençage, des arrachements ou des nids-de-poule.

La couche de base joue un rôle mécanique important. Elle répartit les efforts transmis par les véhicules et limite les déformations dans les couches inférieures selon Huang [2]. Dans le cas du présent projet, la couche de base prévue est en grave-bitume GB 0/14. Ce matériau doit assurer une meilleure rigidité et une meilleure répartition des charges.

La couche de fondation, quant à elle, assure la transition entre les couches supérieures et le sol support. Elle contribue à la stabilité globale de la chaussée selon le CEBTP [5]. Lorsque cette couche présente une humidité élevée, une mauvaise compacité ou une hétérogénéité des matériaux, la portance globale peut être affectée. Ainsi le comportement d'une chaussée souple dépend de l'interaction entre ses différentes couches. Selon le CEBTP et HUANG, une dégradation observée en surface peut traduire soit un simple vieillissement du revêtement, soit une faiblesse plus profonde de la structure [7] [2].

La figure 3 montre la coupe transversale d'une chaussée souple.

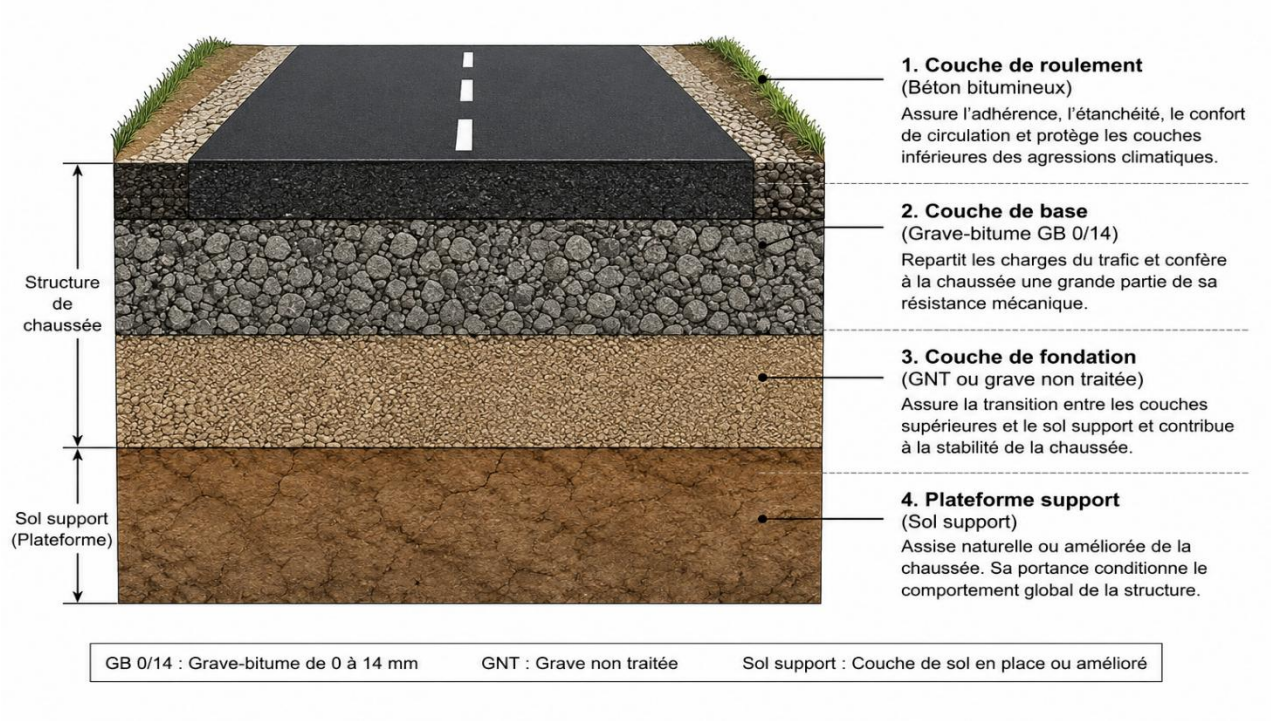


Figure 3 : Coupe transversale d'une chaussée souple

II.2. Dégradation des chaussées et nécessité de réhabilitation

Les chaussées souples subissent progressivement les effets du trafic, du climat et du vieillissement des matériaux. Sous l'action répétée des charges, des déformations peuvent apparaitre, notamment lorsque la structure n'est plus suffisamment rigide pour supporter les sollicitations.

Selon le LCPC-SETRA ,les principales dégradations observées sur les chaussées revêtues sont [8]:

- Les fissures longitudinales et transversales ;

- Le faïençage ;
- Les nids-de-poule ;
- Les orniérages ;
- Les affaissements localisés ;
- Les arrachements de matériaux.

Ces mécanismes de dégradation sont largement décrits dans les guides de diagnostic des chaussées.

Selon PIARC, le faïençage est généralement un signe de fatigue avancée de la couche de roulement [9]. Il traduit une rupture progressive de la continuité du revêtement et peut favoriser l'infiltration de l'eau dans les couches inférieures. Les nids-de-poule, quant à eux, représentent une dégradation plus avancée, souvent liée à la perte de matériaux et à l'affaiblissement local de la chaussée.

Lorsque ces dégradations deviennent importantes, l'entretien courant devient insuffisant.

Les opérations classiques comme le colmatage ou les réparations ponctuelles ne permettent plus de restaurer durablement la portance. Une réhabilitation ou un renforcement devient alors nécessaire.

Dans le cas du tronçon PK 103- PK 117, les fissures, faïençages et nids-de-poule observés justifient donc la mise en œuvre de travaux plus importants, notamment le rabotage du revêtement existant et la mise en place de nouvelles couches bitumineuses.

II.3. Diagnostic structurel des chaussées

Selon le SETRA-LCPC, le diagnostic structurel d'une chaussée consiste à évaluer sa capacité à supporter les charges du trafic sans présenter de déformations excessives [1]. Cette approche est recommandée dans les méthodes d'évaluation structurelle des chaussées développées par le SETRA-LCPC [1] qui préconisent le recours à des investigations visuelles et mécaniques afin d'apprécier l'état réel de la structure de chaussée. Il permet de déterminer si la structure est encore apte à assurer son rôle ou si des travaux de renforcement sont nécessaires.

Il existe deux grandes familles de méthodes d'auscultation :
Les méthodes destructives comprennent les sondages, les carottages et les ouvertures de chaussée. Elles permettent d'identifier directement les matériaux et les épaisseurs des couches, mais elles sont ponctuelles, couteuses et perturbent la circulation.

Selon HUANG, les méthodes non destructives permettent d'évaluer le comportement de la chaussée sans l'endommager [2]. Elles comprennent notamment la poutre Benkelman, le déflectographe, le curvimètre, le FWD et le LWD.

La poutre Benkelman est particulièrement utilisée dans les pays d'Afrique francophone pour les diagnostics de chaussées, car elle est simple, robuste et adaptée aux campagnes de terrain. Le guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux du CEBTP reste d'ailleurs une référence importante pour les études routières en Afrique francophone.

II.4. Essai de déflexion à la poutre Benkelman

L'essai à la poutre Benkelman permet de mesurer la déformation verticale de la chaussée sous l'effet d'une charge roulante. La norme NF P 98-200-2 traite cette méthode d'auscultation et précise que l'interprétation de l'essai dépend de la structure considérée. Selon la norme NF P 98-200-2,publiée par l'Association Française de Normalisation (AFNOR) la déflexion mesurée à la poutre Benkelman constitue un indicateur direct du comportement structurel des chaussées souples [10]. Le CEBTP [7] souligne également que cet essai permet d'apprécier la capacité portante d'une chaussée en service et constitue un outil de diagnostic largement utilisé dans les pays tropicaux.

Le principe consiste à placer la poutre au niveau du point de mesure, puis à appliquer une charge à l'aide d'un véhicule chargé. Lorsque le véhicule s'éloigne, la chaussée reprend progressivement sa position initiale. Le déplacement mesuré correspond à la déflexion. Ce principe est décrit dans la norme NF P 98-200-2 et repris dans le CEBTP [11]. La figure 4 illustre le principe de l'essai.

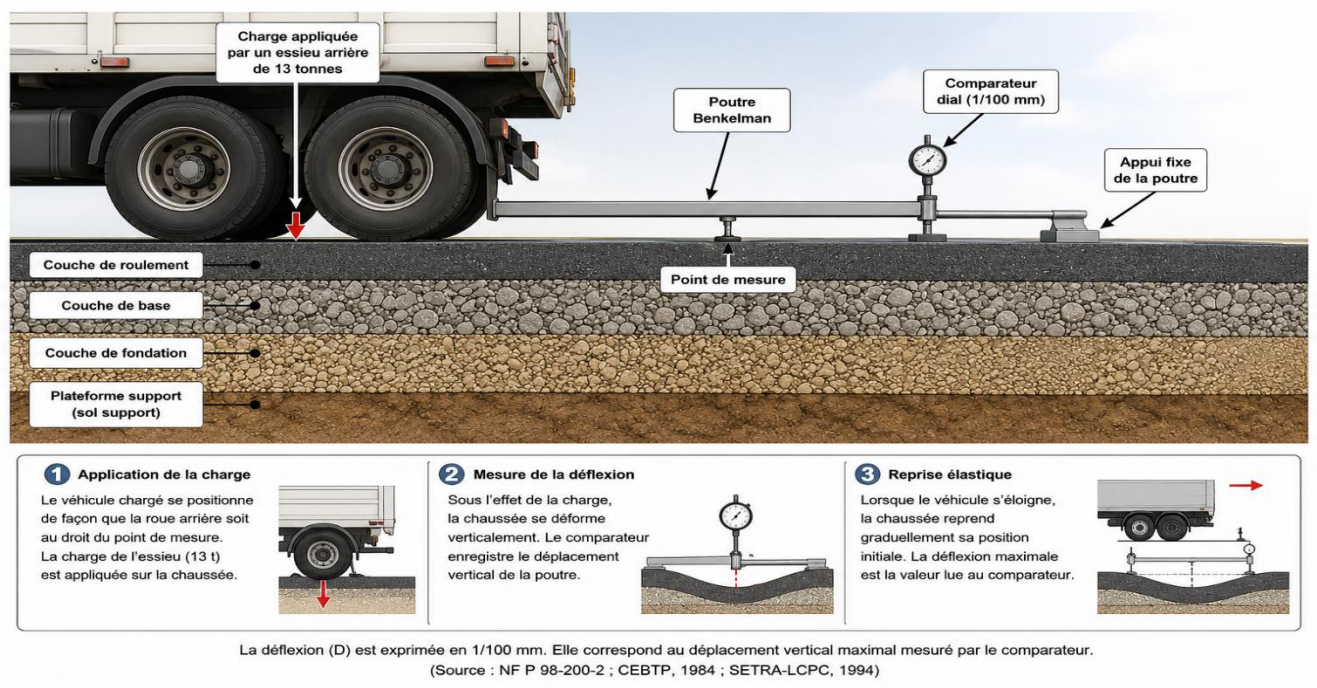


Figure 4 : Principe de l'essai à la poutre Benkelman

La déflexion est généralement exprimée en 1/100 mm. Une faible valeur de déflexion traduit une chaussée rigide et une bonne portance. A l'inverse, une valeur élevée traduit une structure plus déformable, pouvant indiquer une faiblesse structurelle ou une hétérogénéité des couches [11] [1]. Cependant, la déflexion ne doit pas être interprétée isolement. Selon plusieurs sources, [1], [11], [3], l'interprétation des mesures de déflexion doit être complétée en tenant compte :

- Du type de chaussée ;
- De la nature des couches ;
- De l'état de surface ;
- Des conditions climatiques.

Cette précaution est importante dans le cadre de la présente étude, car les écarts observés entre les campagnes ne peuvent pas être attribués automatiquement à une dégradation structurelle. Ils peuvent aussi résulter de l'influence des conditions climatiques, des caractéristiques des matériaux, de l'état de surface ou encore des conditions opératoires de réalisation des essais, comme le soulignent le [7], [1] et [3].

II.5. Facteurs influençant la mesure de déflexion

II.5.1. Influence des conditions climatiques

Selon SHELL, les matériaux bitumineux sont sensibles à la température [12]. Plusieurs études comme [2], [4], [3] ont montré que la température et l'humidité influencent significativement la rigidité des matériaux bitumineux et la portance des couches de chaussée. Lorsque la température augmente, le bitume devient plus souple et la chaussée peut présenter des déformations plus importantes [2] [3].

A l'inverse, lorsque la température est basse, le matériau devient plus rigide mais peut être plus fragile.

L'humidité constitue également un facteur majeur de variabilité des mesures de déflexion. Selon plusieurs sources, l'infiltration de l'eau dans les couches granulaires ou dans le sol support entraîne une augmentation de leur teneur en eau, réduisant leur résistance mécanique et leur capacité portante [1] [7]. Cette diminution de portance se traduit généralement par une augmentation des déformations sous charge et donc par des valeurs de déflexion plus élevées.

Ainsi deux mesures effectuées sur une même section peuvent donner des résultats différents si les conditions climatiques ne sont pas identiques. C'est pourquoi plusieurs guides techniques , recommandent d'enregistrer systématiquement la température du revêtement et d'observations sur l'humidité [1] [3].

Dans la présente étude, aucune mesure instrumentale directe de température et d'humidité n'a été réalisée. L'influence climatique est donc considérée comme un facteur potentiel de variabilité et interprétée qualitativement.

II.5.2. Influence de l'état de surface

L'état de surface joue un rôle important dans la qualité des mesures de déflexion. Selon plusieurs sources, les désordres de surface tels que les fissures, le faïençage, les nids-de-poule ou les affaissements sont des indicateurs de l'évolution de l'état de la chaussée et peuvent être associés à une diminution de sa capacité portante [13] [8]. Le CEBTP [11] souligne également que l'observation de ces dégradations constitue une étape indispensable du diagnostic structurel et doit être associée aux essais de déflexion.

Selon AASHTO, les fissures créent une discontinuité dans le revêtement, favorisent la concentration des contraintes et accélèrent la perte de rigidité des couches superficielles [4]. Elles peuvent modifier la transmission des charges et provoquer une réponse locale différente de celle d'une zone saine. Le faïençage traduit une fatigue avancée du revêtement et peut être associé à une perte de rigidité locale. Les nids-de-poule et les affaissements perturbent également la planéité nécessaire à la bonne mise en place de la poutre.

Ainsi, lorsque la poutre est placée à proximité d'une fissure ou d'une zone irrégulière, la valeur mesurée peut être plus élevée ou plus instable. Cela justifie la prise en compte de l'état de surface dans l'interprétation des résultats [13] [14] et [3].

II.5.3. Influence des caractéristiques des matériaux et de la structure de la chaussée

Selon Ullidtz Per, la réponse d'une chaussée sous chargement dépend fortement des caractéristiques mécaniques des matériaux qui composent les différentes couches de la structure [15]. La nature des matériaux, leur état de conservation, leur teneur en eau ainsi que leur degré de compactage influencent directement les valeurs de déflexion mesurées.

Les chaussées présentant des couches affaiblies, vieillies ou hétérogènes ont tendance à enregistrer des déflexions plus importantes sous l'effet du chargement. A l'inverse, une structure présentant une bonne cohésion entre les couches et des matériaux de qualité conserve généralement une meilleure capacité portante.

Plusieurs auteurs soulignent que les variations de rigidité entre les différentes couches de chaussée peuvent être à l'origine d'écarts significatifs dans les mesures de déflexion. Ainsi, l'analyse des caractéristiques structurelles constitue un élément essentiel dans l'interprétation des résultats d'auscultation et dans l'évaluation de l'état mécanique d'une chaussée.

II.5.4. Influence de la méthode de mesure

La méthode de mesure constitue également un facteur de variabilité. Bien que l'essai à la poutre Benkelman soit normalisé par la norme NF P 98-200-2, plusieurs auteurs soulignent que les conditions de réalisation de l'essai peuvent être à l'origine d'une variabilité des résultats lorsqu'elles ne sont pas strictement maîtrisées [11] , [1] , [3]. En effet, la précision des mesures dépend non seulement de la qualité du matériel utilisé, mais également du respect des prescriptions relatives au positionnement des

équipements, aux conditions d'essai et aux opérations de lecture.

Les sources de variabilité peuvent être liées :

- Au positionnement de la poutre ;
- Au positionnement du véhicule de charge ;
- A la stabilité du comparateur ;
- A la lecture de la valeur ;
- Aux vibrations pendant l'essai ;
- A l'irrégularité de la surface ;
- A la calibration du matériel.

Le positionnement de la poutre constitue un élément essentiel de la qualité de la mesure. Selon la norme NF P 98-200-2, la pointe de la poutre doit être placée avec précision au point de mesure afin que le déplacement vertical enregistré corresponde effectivement à la déformation de la chaussée sous la charge appliquée. Un mauvais positionnement peut entraîner une erreur sur la valeur mesurée.

Le positionnement du véhicule de charge influence également les résultats. La norme NF P 98-200-2 précise les conditions de chargement et la trajectoire que doit suivre le véhicule afin d'assurer une application correcte de la charge sur la chaussée. Un décalage latéral ou longitudinal de l'essieu par rapport au point de mesure peut modifier la répartition des contraintes et conduire à une variation de la déflexion enregistrée.

La stabilité du comparateur et la lecture des mesures constituent également des sources potentielles d'erreur. Le CEBTP [11] rappelle qu'un comparateur mal fixé, des vibrations dues au passage d'autres véhicules ou une lecture imprécise peuvent affecter la précision des résultats. Ces erreurs sont généralement faibles mais peuvent devenir significatives lorsque plusieurs campagnes de mesure sont comparées.

L'étalonnage régulier du matériel représente enfin une condition indispensable pour garantir la fiabilité des essais. Comme le recommande [1] et [3], la vérification périodique de la poutre Benkelman et du comparateur permet de limiter les erreurs instrumentales et d'améliorer la reproductibilité des mesures.

Ainsi, même lorsque l'essai est réalisé conformément aux prescriptions de la norme NF P 98-200-2, les conditions pratiques de terrain peuvent introduire une variabilité supplémentaire dans les mesures de déflexion. L'interprétation des résultats doit donc tenir compte non seulement de l'état structurel de la chaussée, mais également des conditions opératoires dans lesquelles les essais ont été réalisés.

Cette observation revêt une importance particulière dans le cadre de la présente étude, car les variations observées entre les différentes campagnes réalisées sur le tronçon PK 103–PK 117 peuvent résulter à la fois des caractéristiques de la chaussée et des conditions de réalisation des essais. Il apparaît donc indispensable de respecter rigoureusement les prescriptions de la norme NF P 98-200-2 afin de limiter les incertitudes liées à la méthode de mesure et d'améliorer la fiabilité du diagnostic structurel.

II.6. Traitement statistique des mesures de déflexion

Les mesures de déflexion sont nombreuses et variables. Pour les interpréter correctement, il est nécessaire d'utiliser des indicateurs statistiques. Selon Dagnelie.P, la statistique descriptive permet de résumer les données et de mettre en évidence leur dispersion [16]. Cette approche est couramment utilisée dans les études de diagnostic routier car elle permet de caractériser simultanément le niveau de moyen de portance et de l'homogénéité structurelle des chaussées. Elle est adaptée à cette étude, car l'objectif n'est pas seulement de connaitre une valeur moyenne, mais aussi de comprendre la variabilité des mesures.

Les principaux indicateurs utilisés sont :

- La moyenne ;
- Le coefficient de variation ;
- La variance ;
- L'écart-type ;
- La déflexion caractéristique.

La moyenne permet d'apprécier le niveau global de déformabilité d'un tronçon. Selon Saporta.G, le coefficient de variation est un indicateur d'homogénéité structurelle [17].
La variance mesure la dispersion des valeurs autour de la moyenne. L'écart-type permet d'évaluer l'importance des fluctuations des mesures. La déflexion caractéristique permet de prendre en compte à la fois la valeur moyenne et la dispersion. Elle est généralement utilisée pour identifier les sections les plus défavorables et orienter les décisions de renforcement. Ainsi, un tronçon peut présenter une

moyenne modérée mais un écart-type élevé. Dans ce cas, la chaussée n'est pas homogène, et certaines zones peuvent nécessiter une attention particulière.

II.7. Apport de la revue bibliographique a la présente étude

La revue bibliographique met en évidence que la déflexion est un indicateur essentiel du comportement structurel des chaussées. Toutefois, elle montre également que cet indicateur doit être interprété avec prudence.

Les valeurs mesurées peuvent être influencées par :

- Les conditions climatiques ;
- L'état de surface ;
- La nature des matériaux ;
- Les conditions opératoires de mesure.

Ces éléments correspondent directement aux hypothèses formulées dans la présente étude. Ils permettent de soutenir scientifiquement l'analyse menée dans le chapitre des résultats.

Ainsi, le chapitre bibliographique justifie :

- Le choix de l'essai à la poutre Benkelman ;
- L'analyse des variations entre campagnes ;
- La prise en compte des conditions climatiques ;
- L'analyse de l'état de surface ;
- L'étude de l'influence de la méthode ;
- L'utilisation d'un traitement statistique descriptif.

Conclusion partielle

Ce chapitre a permis de présenter les bases théoriques nécessaires à la compréhension de la variabilité des mesures de déflexion. Il ressort que la déflexion constitue un indicateur essentiel de la portance des chaussées, mais que son interprétation dépend de plusieurs facteurs.

Les conditions climatiques, l'état de surface et les conditions de réalisation de l'essai peuvent influencer les valeurs obtenues. De même, le traitement statistique des données est indispensable pour apprécier la dispersion des mesures et identifier les zones hétérogènes.

Cette revue bibliographique constitue donc le socle théorique de la méthodologie présentée dans le chapitre suivant, ainsi que de l'analyse des résultats obtenus sur le tronçon PK 103 – PK 117 de l'autoroute du Nord.

CHAPITRE III : METHODOLOGIE DE L'ETUDE

Le chapitre précédent a mis en lumière le contexte du projet et les enjeux techniques liés à la variabilité des mesures de déflexion observées sur le tronçon PK 103 – PK 117 de l'autoroute du Nord.

Pour répondre à ces problématiques, il est nécessaire de mettre en place une démarche méthodologique rigoureuse permettant de collecter, traiter et analyser les données issues des essais de terrain.

Ainsi, le présent chapitre décrit la méthodologie adoptée dans le cadre de cette étude. Il expose les principes des essais réalisés, les outils et matériels utilisés, ainsi que les procédures de traitement et d'analyse des données de déflexion.

Cette approche vise à garantir la fiabilité des résultats et à établir une base solide pour l'interprétation des phénomènes observés dans les chapitres suivants.

III.1. Approche méthodologique

L'étude de la portance des structures de chaussées s'inscrit dans une démarche expérimentale visant à évaluer l'état structural de l'autoroute du Nord (tronçon PK 103 – PK 117). Elle repose sur l'exploitation des mesures de déflexion obtenues à l'aide de la poutre Benkelman, selon la norme NF P 98-200-2.

Les essais ont été réalisés sous la supervision du BNETD, en collaboration avec le Laboratoire du Bâtiment et des travaux Publics (LBTP) et l'entreprise PORTEO BTP, chargée de la mise en œuvre des travaux de réhabilitation. Cette méthodologie combine trois étapes principales :

- La collecte de données de déflexion sur le terrain,
- La prise en compte des conditions environnementales,
- Le traitement statistique des mesures afin d'évaluer la variabilité des valeurs obtenues et d'en déduire la performance structurelle de la chaussée.

L'objectif de cette approche est de dégager les tendances de comportement du revêtement avant et après rabotage, et de vérifier la qualité du support avant l'application du GB 0/14.

III.2. Données collectées et outils utilisés

III.2.1. Mesures de déflexions

Les essais de déflexion ont été réalisés à l'aide de la poutre Benkelman, un appareil mécanique permettant de mesurer la flèche verticale de la surface d'une chaussée soumise à une charge statique. Conformément à la norme NF P 98-200-2, publiée par l'Association Française de Normalisation (AFNOR), la poutre Benkelman permet d'évaluer la déformabilité des chaussées souples sous charge roulante selon PIARC [3].

Cet essai consiste à positionner la poutre derrière un camion de charge normalisé afin de mesurer, à l'aide d'un comparateur, la déformation élastique du revêtement lorsque le véhicule s'éloigne.

La figure 5 illustre la mise en place de la poutre Benkelman derrière le camion de charge lors des essais réalisés sur le tronçon étudié.



Figure 5:Mise en place de la poutre Benkelman derrière le camion de charge

Le dispositif se compose :

- D'un levier métallique articulé reposant sur trois points,
- D'un comparateur gradué au 1/100 mm,
- D'un véhicule porteur (camion benne) assurant la charge d'essai

Le principe consiste à mesurer la flèche de la chaussée lorsque le camion chargé quitte progressivement le point d'essai. Cette flèche traduit la rigidité du support et donc la portance structurelle de la chaussée.

La fréquence d'essai adoptée sur le terrain est de 20 mètres, avec trois points de mesure à chaque station : gauche, axe et droite.

Le choix de cet intervalle de mesure ne constitue pas une exigence directe de la norme NF P 98-200 mais répond aux exigences du diagnostic détaillé réalisé dans le cadre du projet [6] [5].

Cette fréquence de mesure a été retenue afin :

- D'obtenir une caractérisation fine du comportement structurel ;
- D'identifier les variations locales de portance ;
- De mieux détecter les zones hétérogènes ;
- D'améliorer la représentativité statistique des résultats.

III.2.2. Facteurs climatiques et géotechniques : éléments disponibles et limites de la collecte

Les mesures de déflexion a la poutre Benkelman sont comme sensibles aux conditions environnementales, notamment à la température et à l'humidité du revêtement. Ces paramètres peuvent influencer la rigidité des matériaux bitumineux ainsi que la portance de la chaussée.

Dans le cadre de cette étude, aucune mesure instrumentale directe de température ou d'humidité n'a été réalisée au moment des essais. Toutefois, certaines précautions ont été prises afin de limiter l'influence de ces facteurs. Les mesures étaient suspendues en cas de pluie et les périodes caractérisées par des conditions météorologiques extrêmes étaient évitées dans la mesure du possible.

Ces éléments constituent une limite de l'étude et justifient que l'influence des conditions climatiques soit analysée de manière qualitative à partir des observations de terrain et des enseignements de la

littérature spécialisée.

III.2.3. Etat de surface de vieillissement

L'état de surface a été observé avant chaque série d'essais afin d'identifier les dégradations visibles : fissures, orniérages, nids de poule, réparations anciennes.

Ces dégradations, en modifiant la continuité et la planéité du revêtement, peuvent perturber la stabilité de la poutre Benkelman et fausser localement les valeurs de déflexion.

La planéité du revêtement, c'est-à-dire le degré de régularité de la surface de la chaussée, constitue un paramètre essentiel lors des essais de déflexion.

Avant chaque mesure, une inspection visuelle de la chaussée est effectuée pour vérifier l'état de surface et repérer les zones dégradées susceptibles d'influencer les résultats.

En effet, une surface irrégulière (présentant des fissures, affaissements ou bosses) perturbe la stabilité de la poutre Benkelman et peut engendrer des valeurs de déflexion surestimées ou sous-estimées selon la position du capteur.

La figure 6 présente un exemple de chaussée fissurée observée avant la réalisation des essais de déflexion.



Figure 6:Exemple de chaussée fissurée avant essai de déflexion

Ces observations sont donc notées systématiquement sur les fiches de terrain afin d'interpréter correctement les écarts éventuels entre points successifs.

III.3. Méthodes de traitement et d'analyse des données

Les données brutes issues des fiches de terrain ont été saisies dans Microsoft Excel pour traitement et analyse.

Le traitement comprend plusieurs étapes : le prétraitement, le calcul des indicateurs statistiques et la classification des valeurs par tronçon.

III.3.1. Prétraitement des données

Avant toute analyse, les valeurs anormales (erreurs de lecture, chiffres manquants ou doublons) ont été supprimées.

Les données ont ensuite été regroupées par point kilométrique (PK), en distinguant les deux sens de circulation : Yamoussoukro-Abidjan et Abidjan-Yamoussoukro.

Les tronçons ont été délimités chaque 500 m en fonction du calcul de la déflexion caractéristique. Sur la section étudiée (PK 103 – PK 117), les divisions présentées dans le tableau 1 ont été retenues.

Les fiches d'essai du tableau 2 comportent les rubriques suivantes :

- Localisation (PK)
- Lectures du comparateur (gauche, axe, droite),
- Déflexions correspondantes,
- Et un commentaire d'observation sur les anomalies éventuelles.

Tableau 1:Exemple de délimitation des tronçons sur Excel

Troncon	Positions kilometriques (PK)	Longueur approximative (m)
T1	103+000-103+500	500
T2	103+520-104+000	500
T3	104+020-104+500	500
T4	104+520-105+000	500
T5	105+020-105+500	500
T6	105+520-106+000	500
T7	106+020-106+500	500
T8	106+520-107+000	500
T9	107+020-107+500	500
T10	107+520-108+000	500
T11	108+020-108+500	500
T12	108+520-109+000	500
T13	109+020-109+500	500
T14	109+520-110+000	500
T15	110+020-110+500	500
T16	110+520-111+000	500
T17	111+020-111+500	500
T18	111+520-112+000	500
T19	112+020-112+500	500
T20	112+520-113+000	500
T21	113+020-113+500	500
T22	113+520-114+000	500
T23	114+020-114+500	500
T24	114+520-115+000	500
T25	115+020-115+500	500
T26	115+520-116+000	500
T27	116+020-116+500	500
T28	116+520-117+000	500

Tableau 2:Exemple d'anomalie de mesure détectée sur la fiche d'essai d'après

PK	Déflexion gauche ($\times 10^{-2}$mm)	Déflexion axe ($\times 10^{-2}$mm)	Déflexion droite ($\times 10^{-2}$mm)	Valeur seuil critique	Commentaire
106+640	56	36	62	70	Valeur normale
106+520	**84**	64	**122**	70	Anomalie – mesure sur après rabotage
106+240	28	24	44	70	Valeur normale

Les mesures de déflexion utilisées dans cette étude proviennent de plusieurs campagnes d'auscultation réalisées à différentes dates, en fonction de l'avancement des travaux de réhabilitation. Les données analysées concernent les tronçons du PK 103 au PK 117, dont les campagnes de mesure retenues ont notamment été réalisées le 25 novembre 2024.

III.3.2. Calculs statistiques

Plusieurs méthodes statistiques peuvent être utilisées pour l'analyse des mesures de déflexion, notamment les analyses de corrélation, les tests statistiques comparatifs, les modèles de régression ou encore les méthodes géostatistiques. Toutefois ces approches répondent à des objectifs différents. Dans le cadre de notre étude, le traitement des données de déflexion se réalisera à l'aide de la statistique descriptive. Cette méthode a été retenue car elle permet de caractériser le comportement global de la chaussée à partir d'un grand nombre de mesures tout en évaluant la dispersion des valeurs observées. Les indicateurs statistiques retenus sont la moyenne, la variance, l'écart-type, la déflexion caractéristique et le coefficient de variation. Ces paramètres sont couramment utilisés dans les études de diagnostic routier pour apprécier l'homogénéité structurelle et identifier les zones présentant une portance insuffisante. La déflexion caractéristique constitue notamment un indicateur de référence puisqu'elle prend en compte à la fois le niveau moyen de déformation et la variabilité des mesures enregistrées.

Pour chaque tronçon, la déflexion moyenne est calculée par la relation suivante :

$$\textbf{Equation 1} : \overline{D} = \frac{\sum D_i}{n}$$

Où :

- $\overline{D}$ est la déflexion moyenne
- D_i est la valeur individuelle de déflexion,
- n Le nombre total de points mesurés.

La Variance V(D) des mesures s'exprime par :

$$\textbf{Equation 2} : V(D) = \frac{\sum (D_i - \overline{D})^2}{n-1}$$

Et l'écart-type associé est :

$$\textbf{Equation 3 :}\ \sigma = \sqrt{V(D)}$$

Et le coefficient de variation est :

$$\textbf{Equation 4 :}\ CV = \frac{\sigma}{\overline{D}}$$

Et la déflexion caractéristique s'exprime par :

$$\textbf{Equation 5 :}\ D_c = \overline{D} + k \times \sigma \text{ avec k=2 [18]}$$

Ces indicateurs permettent de quantifier la dispersion des valeurs et d'évaluer la variabilité structurelle du tronçon.

III.3.3. Limites et contraintes rencontrées

Les essais ont été menés dans des conditions réelles de circulation et de climat tropical, ce qui a imposé certaines contraintes :

- La présence de fissures, nids-de-poule et dégradations de surface influence localement la stabilité de la poutre Benkelman et fausse certaines lectures.
- Les températures extrêmes (forte chaleur ou fraicheur marquée) modifient la rigidité des enrobés et entrainent des valeurs instables.
- En cas de pluie, les essais sont interrompus pour éviter l'effet du mouillage sur la portance.
- La densité de points élevée (un essai tous les 20 m) allonge la durée de la campagne et demande une grande rigueur de manipulation.

L'absence de données climatiques instrumentées n'a pas permis d'établir une corrélation directe entre environnement et déflexion.

Par ailleurs, les mesures réalisées après rabotage ont été influencées par le maintien des couches sous-jacentes.

En effet, le retrait complet jusqu'à la couche de fondation non traitée (GNT) n'a pas été autorisé dans le cadre du projet, ce qui a pu maintenir des hétérogénéités locales et influencer les valeurs enregistrées.

Enfin, l'essai à la poutre de Benkelman demeure sensible :

- Aux irrégularités de surface ;
- Au positionnement du matériel ;

- Aux conditions d'exécution.

Malgré ces contraintes, la méthodologie appliquée a permis d'obtenir une base de données pour l'analyse des mesures de déflexion, et représentative sur laquelle repose l'analyse des résultats présentée au chapitre 3.

Conclusion partielle

Ce chapitre a présenté la démarche méthodologique adoptée pour l'évaluation de la portance et de la variabilité des mesures de déflexion sur le tronçon PK 103-PK117 de l'autoroute du Nord. L'étude s'est appuyée sur une approche expérimentale rigoureuse combinant la collecte de données de terrain, le traitement statistique des mesures.

L'essai à la poutre Benkelman, réalisé selon la norme NF P 98-200-2, a constitué l'outil principal de diagnostic pour déterminer la déformabilité de la chaussée et son homogénéité structurelle. Les observations relatives à l'état de surface, aux conditions climatiques et à la géométrie de la chaussée ont permis de mieux encadrer les facteurs susceptibles d'influencer les valeurs mesurées.

Le traitement des données, effectué à l'aide de Microsoft Excel, a conduit au calcul des indicateurs statistiques tels que la moyenne, la variance, l'écart-type et le coefficient de variation, outils essentiels pour quantifier la dispersion et la fiabilité des mesures. Malgré certaines contraintes liées aux conditions de terrain et aux variations climatiques, la méthodologie appliquée a permis de constituer une base de données cohérente et exploitable pour l'analyse approfondie des résultats.

Le chapitre suivant sera donc consacré à la présentation, à l'analyse et à la discussion des résultats obtenus, en mettant en évidence les tendances observées, les écarts significatifs et les facteurs explicatifs de la variabilité des déflexions.

Chapitre IV. Résultats et analyses

Ce chapitre présente les résultats issus des campagnes de mesures de déflexion réalisés sur le tronçon PK 103-PK 117 de l'autoroute du Nord.

L'objectif est d'analyser et d'interpréter les données recueillies afin d'identifier les facteurs susceptibles d'influencer la variabilité observée des mesures.

L'étude s'appuie sur les valeurs calculées dans Excel notamment les moyennes, les écarts-types, les coefficients de variation et les déflexions caractéristiques ainsi que sur l'observation des tendances graphiques le long du tronçon.

Les analyses portent sur trois campagnes successives :

- Avant rabotage
- Apres rabotage
- Sur la couche de base en GB 0/14.

Ces résultats permettent de caractériser le comportement structurel de la chaussée et de mettre en évidence les effets conjoints des conditions climatiques, de l'état de surface.

IV.1. Présentation des données recueillies

Les essais ont été réalisés à l'aide de la poutre de Benkelman, conformément aux normes NF P 98-200, sous la supervision du BNETD et du LBTP.

Trois séries distinctes ont été effectuées :

- Avant rabotage, afin d'évaluer la portance initiale du revêtement existant ;
- Apres rabotage, pour mesurer la réponse de la chaussée après suppression de la couche dégradée ;
- Sur la couche de base GB 0/14, afin de vérifier la rigidité obtenue après mise en œuvre.

La fréquence d'essai adoptée était de 20 mètres, avec trois points de mesure par station : gauche, axe et droite. Les résultats statistiques globaux sont observés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Résultats statistiques globaux des campagnes de mesure de déflexion sur le tronçon PK 103-PK 117

Campagne de mesure	**Moyenne globale (mm)**	**Ecart-type global**	**Observation/Interpretation**
Avant rabotage	53,95	14,33	Campagne initiale – valeurs influencées par humidité et vieillissement
Après rabotage	58,84	16,56	Structure plus mince – légère hausse de variabilité

Les valeurs relevées ont été traitées sous Excel pour le calcul des moyennes et indicateurs de dispersion (Variance, écart-type). Les résultats globaux obtenus sur la voie lente sont présentés dans le tableau 3.

L'interprétation des observations présentées dans le tableau 3 repose sur l'analyse des moyennes globales et des écarts-types calculés pour chaque campagne. La moyenne renseigne sur le niveau global de déformabilité de la chaussée, tandis que l'écart-type permet d'apprécier la dispersion des mesures et donc le degré d'homogénéité de la structure. Une augmentation de la moyenne traduit généralement une déformabilité plus importante de la structure, tandis qu'une augmentation de l'écart-type indique une plus forte hétérogénéité des valeurs enregistrées. Les observations formulées dans le tableau 3 résultent donc de l'analyse conjointe de ces deux indicateurs statistiques et de leur confrontation aux conditions observées sur le terrain.

Avant rabotage

La campagne réalisée avant rabotage présente une déflexion moyenne de $53{,}95 \times 10^{-2}$ mm et un écart-type de $14{,}33 \times 10^{-2}$ mm. Selon le SETRA, ces valeurs traduisent un comportement structurel relativement hétérogène de la chaussée. Selon le SETRA [18], l'interprétation des mesures de déflexion doit être réalisée en tenant compte de la dispersion des mesures ainsi que des observations visuelles des dégradations. Dans le cas présent, les fissures et le faïençage observés sur le terrain, associés à une dispersion modérée des mesures, suggèrent une hétérogénéité structurelle pouvant être liée au vieillissement progressif du revêtement.

Apres rabotage

Apres rabotage, la moyenne atteint $58{,}84*10^{-2}$mm tandis que l'écart-type s'élève à $16{,}56*10^{-2}$mm. L'augmentation simultanée de ces deux indicateurs traduit une déformabilité plus importante ainsi qu'une plus forte dispersion des mesures. Cette situation s'explique par le retrait de la couche superficielle et par l'exposition de couches présentant des caractéristiques mécaniques variables. La présence de couches intermédiaires non entièrement retirées a également pu contribuer à cette hétérogénéité.

Tableau 4: Extrait de fiches de déflexion avant rabotage (exemple de données brutes traitées sous Excel)

	Avant Rabotage		
	Déflexion (1/100 mm)		
PK (m)	**Voie Rapide**	**Axe**	**Voie Lente**
103+000	40	48	26
103+020	36	42	20
103+040	32	36	56
103+060	36	30	48
103+080	40	30	54
103+100	42	32	14

Les valeurs de déflexion mesurées avant rabotage varient le long du tronçon PK 103- PK 117, traduisant une hétérogénéité structurelle de la chaussée.

La figure 7 illustre cette variation longitudinale, ou l'on observe des pics localisés sur certaines sections.

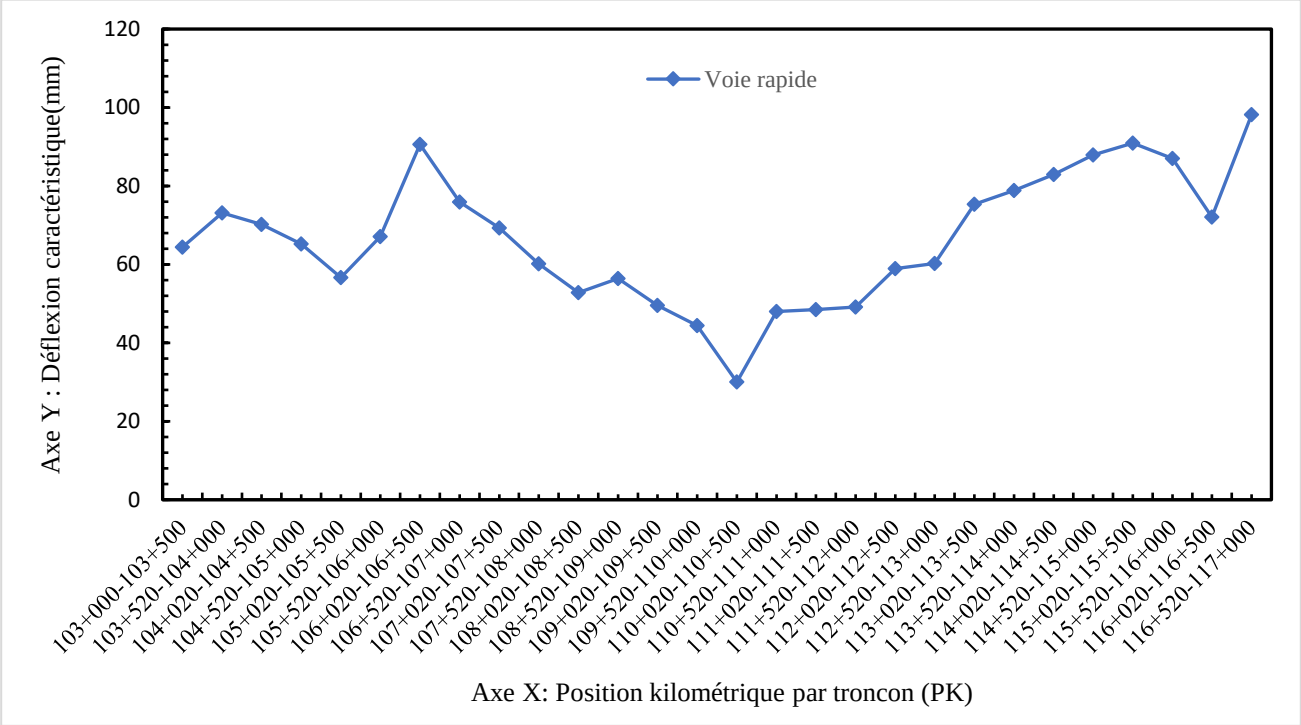


Figure 7 : Variation longitudinale des déflexions mesurées sur le tronçon PK 103-117 (Avant Rabotage)

Ces valeurs montrent une variabilité modérée, caractéristique des chaussées souples soumises à des conditions environnementales fluctuantes.

Les sections homogènes présentent des valeurs de déflexion stables, tandis que certaines zones affichent des pics localisés révélant des anomalies structurelles ou de surface.

La distribution statistique des valeurs de déflexion caractéristique avant rabotage montre une concentration des mesures autour de 50×10^{-2} mm, avec quelques valeurs supérieures à 70×10^{-2} mm, susceptibles de traduire localement des zones de faible portance.

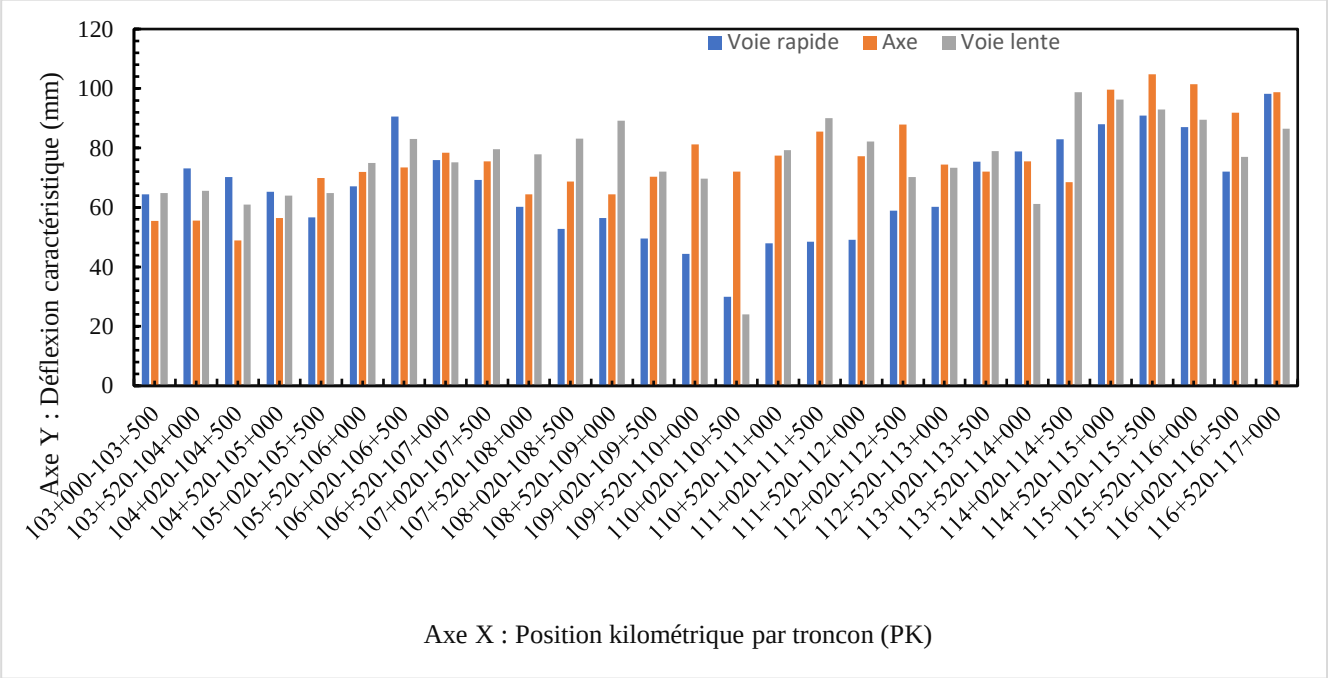


Figure 7 : Répartition statistique des valeurs de déflexion avant rabotage

La répartition des déflexions caractéristiques avant rabotage met en évidence une variabilité spatiale du comportement structural de la chaussée sur le tronçon étudié. Les valeurs ne sont pas uniformes d'un PK à l'autre, ce qui traduit une hétérogénéité de la capacité portante de la structure. Les déflexions relativement faibles observées sur certains tronçons, notamment aux environs des PK 110+000 à 111+500 sur la voie rapide, peuvent indiquer une structure plus rigide ou un meilleur état des couches de chaussée. À l'inverse, les valeurs plus élevées relevées sur plusieurs sections, en particulier sur la voie lente, traduisent une plus grande déformabilité de la chaussée, susceptible d'être liée à une dégradation structurelle plus marquée ou à des sollicitations répétées du trafic lourd. Par ailleurs, la convergence des valeurs observée à partir du PK 114+520 suggère un comportement plus homogène des trois voies sur cette partie du tronçon.

IV.2. Effet du vieillissement et de l'état de surface

Le vieillissement du revêtement et son état de surface influencent directement la réponse mécanique de la chaussée.

Sur le tronçon PK 103-PK 117, les inspections visuelles ont révélé la présence de fissures, de faïençages et d'orniérages sur certaines sections, traduisant un vieillissement avancé du liant bitumineux.

Les graphiques des variations longitudinales (Figure 9) par PK montrent des pics localisés, souvent

supérieurs à $70*10^{-2}$ mm (seuil critique). Ces anomalies ponctuelles correspondent très probablement à des zones fissurées ou affaiblies, ou la continuité structurelle est rompue.

L'analyse du graphique de la figure 9 permet d'identifier les zones critiques ou les valeurs de déflexion dépassent le seuil de $70*10^{-2}$ mm.

Ces dépassements localisés coïncident avec les sections présentant des fissures ou du faïençage, confirmant la corrélation entre l'état de surface et la portance mesurée.

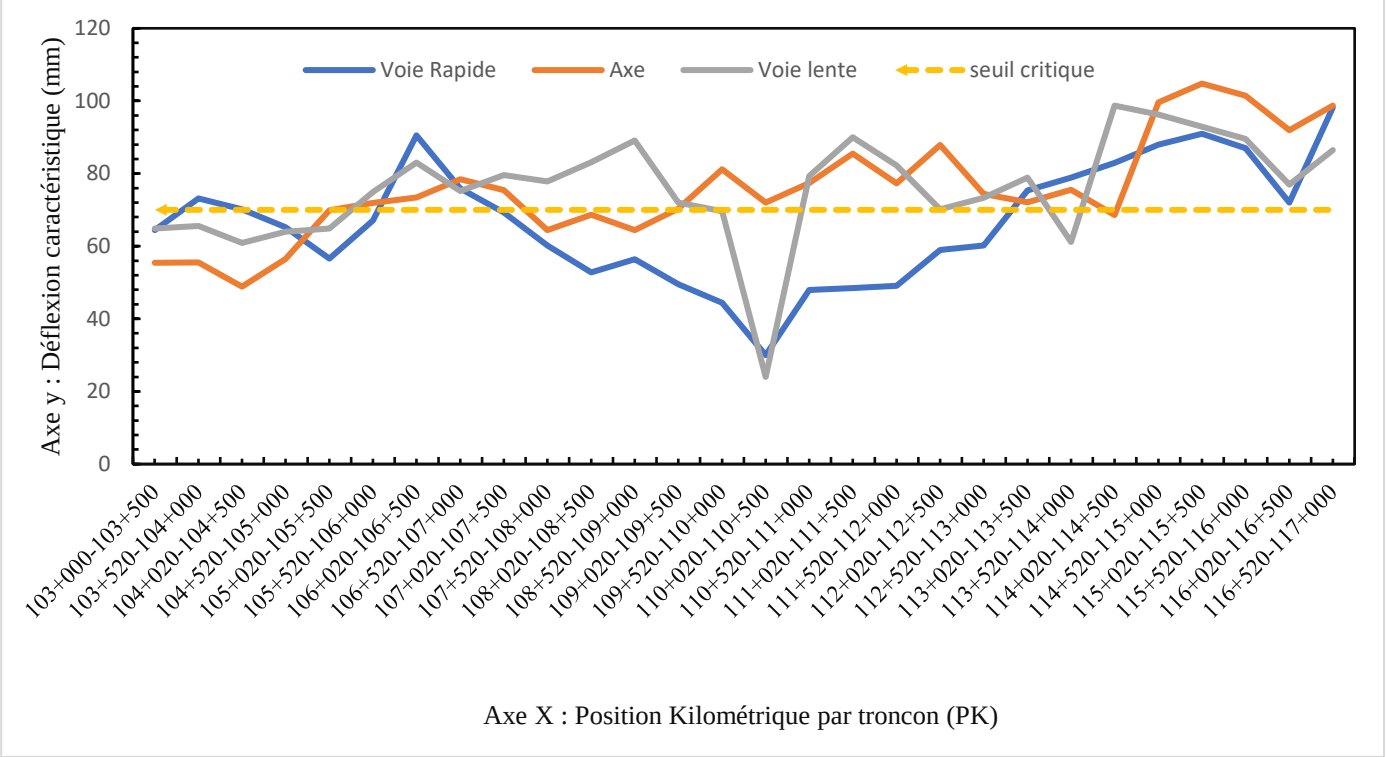


Figure 8 : Déflexion caractéristique par tronçon avec indication du seuil critique de $70*10^{-2}$mm (Avant rabotage)

IV.2.1. Comparaison des déflexions avant-projet et pendant projet

Afin d'évaluer l'effet de l'état de surface sur le comportement mécanique de la chaussée, une comparaison a été effectuée entre les déflexions caractéristiques mesurées avant-projet et celles relevées pendant rabotage sur le même tronçon.

Les figures 10 et 11 montrent d'une part une comparaison des déflexions caractéristiques avant et pendant projet sur la voie lente et d'autre part une comparaison des déflexions caractéristiques avant et pendant projet sur la voie rapide.

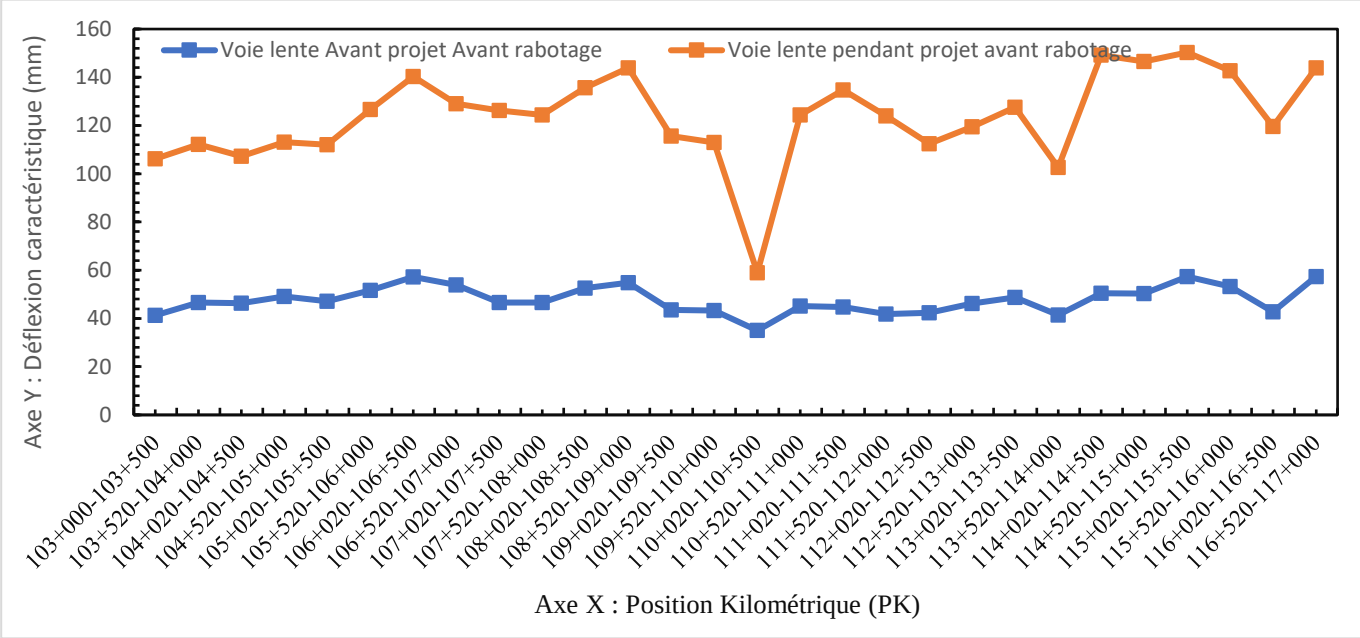


Figure 9 : Comparaison des déflexions caractéristiques avant et pendant projet sur la voie lente

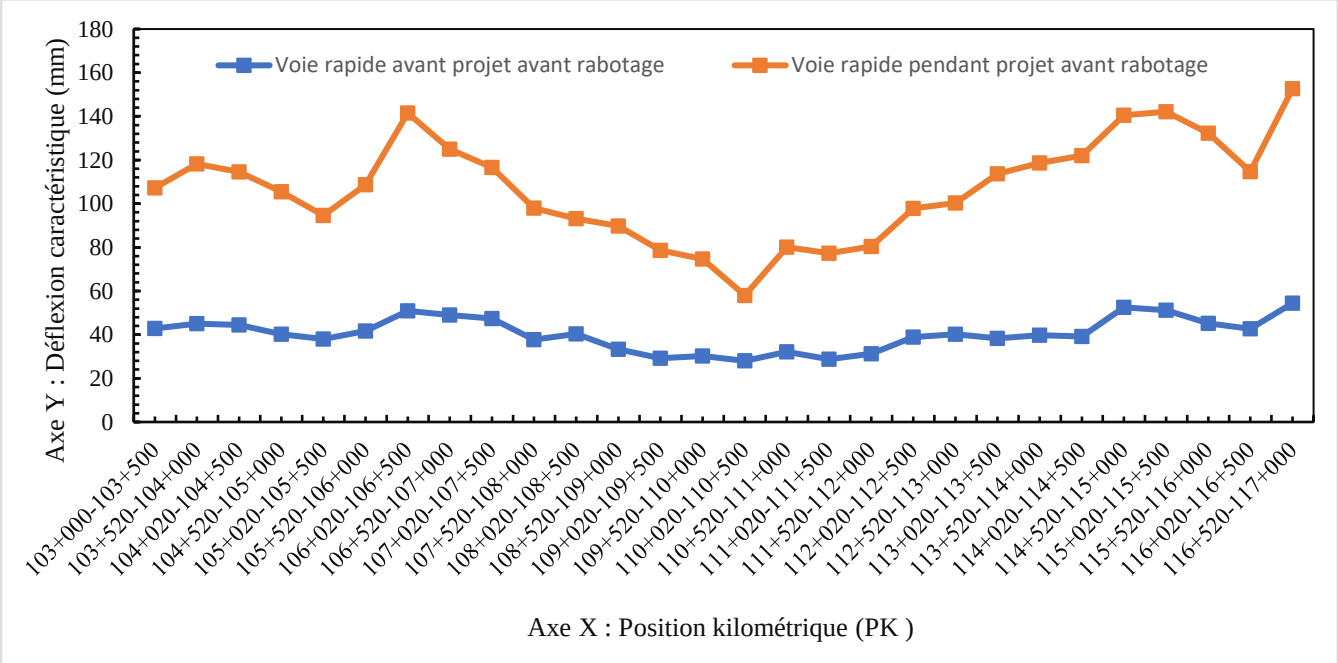


Figure 10:Comparaison des déflexions caractéristique savant et pendant projet sur la voie rapide

L'analyse des figures 10 et 11 montre que les déflexions caractéristiques mesurées pendant le projet sont globalement supérieures à celles enregistrées avant le projet, aussi bien sur la voie lente que la voie rapide cette augmentation est particulièrement marquée sur certains tronçons ou les valeurs dépassent $140 \times 10^{-2} mm$. Cette évolution peut être associée à la dégradation progressive de l'état de surface observée sur le terrain, notamment la présence de fissures, de nids-de-poule et de réparations localisées. Ces désordres traduisent un affaiblissement de la structure de chaussée et favorisent une augmentation de sa déformabilité sous l'effet des charges roulantes.

Par ailleurs, les variations observées d'un tronçon à l'autre montrent que le comportement mécanique de la chaussée n'est pas uniforme sur l'ensemble de la section étudiée. Ces résultats suggèrent que l'état de surface constitue un facteur important dans l'explication de la variabilité des mesures de déflexion enregistrées sur le tronçon PK 103-PK 117.

IV.2.2. Influence des désordres de surface sur les valeurs de déflexion observées

Afin de compléter l'analyse des déflexions observées sur le tronçon PK 103- PK 117, une comparaison a été réalisée entre les valeurs de déflexion enregistrées et les dégradations relevées lors des inspections visuelles. Le tableau 5 présente les principaux désordres observés au niveau des sections caractérisées par des déflexions élevées, dans le but d'apprécier l'influence de l'état de surface sur le comportement structurel de la chaussée.

Tableau 5 : Synthèse des dégradations de surface associées aux zones de fortes déflexions sur le tronçon PK 103- PK 117

PK	Déf Avant-projet	Déf pendant projet	Désordre	Type de désordre
106+020- 106+500	57,27	83,05		Nid-de-poule(pothole)
107+020 – 107+500	46,60	79,62		Fissure longitudinale
108+020 – 108+500	52,55	83,14		Nid-de-poule accompag fissuration
108+520- 109+000	54,77	89,15		Nids-de-poule multiples/dégradation localisée de surface
110+520- 111+000	45,15	79,28		réparation de surface

111+020- 111+500	44,75	90,02		Nids-de-poule multiples
113+020- 113+500	48,73	78,89		Réparation localisée (rapiéçage) / reprise de chaussée
114+020- 114+500	50,50	98,71		Orniérage avec stagnati d'eau
114+520- 115+000	50,28	96,24		Nid-de-poule avec arrachement de matéria
115+020- 115+500	57,36	92,94		Nid-de-poule important

115+520- 116+00	53,20	89,51		Nids-de-poule multiples rive de chaussée
116+520- 117+000	57,41	86,49		Nid-de-poule isolé

L'analyse des observations de terrain met en évidence une relation manifeste entre l'état de surface de la chaussée et les niveaux de déflexion enregistrés sur le tronçon étudié. Les sections présentant les valeurs de déflexion les plus élevées correspondent généralement aux zones ou des dégradations significatives ont été identifiées lors des inspections visuelles.

Les désordres observés sont principalement constitués de nids-de-poule, de fissures longitudinales, de dégradations de rive, d'orniérages localisés et de zones ayant fait l'objet de réparations ponctuelles. Ces pathologies traduisent un vieillissement avancé du revêtement ainsi qu'une perte progressive de la continuité structurelle des différentes couches de chaussée. La comparaison entre les déflexions avant-projet et celles relevées pendant les travaux montre une augmentation notable des valeurs sur plusieurs tronçons. Par exemple, les sections comprises entre les PK 114+020 – 114+500 et 114+520 – 115+000 présentent des déflexions supérieures à $96 \times 10^{-2} mm$ pendant projet, tandis que les inspections ont révélé la présence d'orniérages, de stagnations d'eau et de nids-de-poule accompagnés d'arrachement de matériaux. De telles dégradations favorisent les infiltrations d'eau et accélèrent la détérioration des couches sous-jacentes, ce qui se traduit par une augmentation de la déformabilité de la structure sous chargement.

De même, les zones affectées par des fissures longitudinales ou des réparations localisées présentent souvent des valeurs de déflexion plus élevées que les sections en meilleur état apparent. Cette situation

peut s'expliquer par l'hétérogénéité mécanique créée par la juxtaposition de matériaux d'âges et de caractéristiques différentes, générant des réponses structurelles non uniformes sous l'effet des charges roulantes.

Dans l'ensemble, les résultats obtenus confirment que les dégradations de surface ne constituent pas uniquement des défauts visibles du revêtement, mais peuvent également être le reflet d'un affaiblissement plus profond de la structure de chaussée. Leur présence contribue ainsi à l'augmentation et à la dispersion des valeurs de déflexion observées sur le tronçon PK 103 – PK 117.

Ces observations confortent l'hypothèse selon laquelle l'état de surface constitue l'un des principaux facteurs explicatifs de la variabilité des mesures de déflexion enregistrées dans le cadre de cette étude.

IV.3. Analyse de la variabilité par coefficient de variation

Afin de quantifier l'homogénéité des mesures réalisées, les coefficients de variation ont été calculés pour les campagnes avant et après rabotage.

Le coefficient de variation constitue un indicateur de dispersion permettant d'apprécier la régularité du comportement structurel de la chaussée.

La figure 12 montre l'histogramme du coefficient de variation Avant et Apres rabotage.

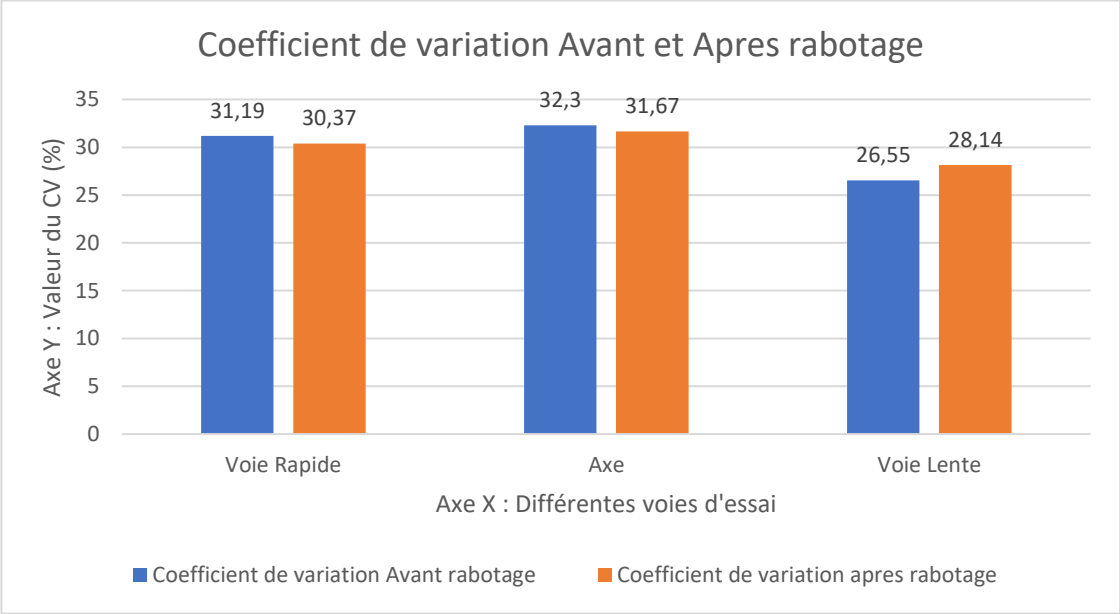


Figure 11:Histogramme du coefficient de variation Avant et Apres rabotage

Les coefficients de variation présentés à la Figure 12 restent élevés pour l'ensemble des voies étudiées,

avec des valeurs comprises entre 26,55% et 32,30%. Ces résultats traduisent une dispersion notable des mesures de déflexion le long du tronçon analysé.

La faible variation des coefficients de variation entre les campagnes avant et après rabotage indique que le niveau de dispersion des mesures reste relativement constant. Cette stabilité suggère une dispersion relativement faible des mesures, ce qui permet d'exploiter les données de déflexion pour l'analyse du comportement structurel de la chaussée et les études de dimensionnement, tout en tenant compte des limites de l'étude.

Tableau 6: Tableau d'interprétation des valeurs du coefficient de variation Source : Elaboration de l'auteur a partir des principes d'analyse statistique du coefficient de variation

CV (%)	**Interpretation**
CV < 15%	Structure homogène
15% ≤CV<25%	Homogénéité moyenne
CV ≥ 25%	Structure hétérogène

L'ensemble des coefficients de variation obtenus étant supérieur à 25%, le tronçon étudié peut être considéré comme structurellement hétérogène.

Conclusion partielle

L'analyse du vieillissement et de l'état de surface a montré que les dégradations observées sur le tronçon PK 103 – PK 117 influencent directement le comportement mécanique de la chaussée. Les comparaisons réalisées entre les campagnes avant et pendant projet mettent en évidence une augmentation globale des déflexions sur plusieurs sections, traduisant une diminution progressive de la capacité portante du revêtement.

L'analyse statistique complémentaire, notamment l'étude du coefficient de variation a permis de mettre en évidence une hétérogénéité structurelle plus marquée dans certaines zones du tronçon. Les résultats

obtenus montrent également que les secteurs présentant des dégradations visuelles importantes correspondent généralement aux zones ou les déflexions sont les plus élevées.

Ces observations confirment que le vieillissement du revêtement constitue l'un des principaux facteurs explicatifs de la variabilité des mesures de déflexion observées sur le tronçon étudié. Elles soulignent également l'intérêt d'associer les observations visuelles aux mesures mécaniques afin d'améliorer la qualité du diagnostic structurel des chaussées.

Le chapitre suivant sera consacré à la discussion et à l'interprétation des résultats obtenus, en les confrontant aux hypothèses de départ et aux références bibliographiques existantes.

Chapitre V. DISCUSSION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

V.1.Interprétation des résultats

Les campagnes de mesures réalisées sur le tronçon PK 103 – PK 117 ont permis de caractériser l'évolution du comportement structurel de la chaussée à travers trois phases successives d'intervention : avant rabotage, après rabotage et sur la couche de base en GB 0/14. L'analyse des indicateurs statistiques et des profils longitudinaux de déflexion met en évidence une variabilité significative, dont les causes peuvent être identifiées, même en l'absence de données climatiques instrumentées concomitantes.

Avant rabotage, la déflexion moyenne de $53{,}95 \times 10^{-2}mm$ et un écart-type de $14{,}33 \times 10^{-2}mm$ traduisant une portance hétérogène du revêtement existant. Les pics localisés supérieurs au seuil critique de $70 \times 10^{-2}mm$ coïncident spatialement avec les zones de faïençage et de fissuration identifiées lors de l'inspection visuelle, confirmant la relation entre dégradations superficielles et affaiblissement structurel. Cette hétérogénéité reflète les effets cumulés du vieillissement du liant bitumineux, de l'infiltration d'eau dans les couches inférieures et de la concentration du trafic poids lourds sur la voie lente.

Apres rabotage, l'augmentation simultanée de la moyenne ($58{,}84 \times 10^{-2}mm$) et de l'écart-type ($16{,}56 \times 10^{-2}mm$) traduit une augmentation temporaire de la déformabilité de la structure. Elle s'explique toutefois par deux facteurs distincts : d'une part , la réduction de l'épaisseur totale de chaussée met à nu les couches inférieures , dont la sensibilité aux variations climatiques (humidité, température) est plus marquée que celle du revêtement bitumineux ; d'autre part, la contrainte opérationnelle imposée par le MEER , n'autorisant pas le rabotage complet jusqu'à la couche de fondation non traitée (GNT) a maintenu des hétérogénéités locales liées à la rigidité variable des couches intermédiaires résiduelles . Ces deux facteurs combinés expliquent l'accroissement de la dispersion sans que cela remette en cause la cohérence du diagnostic. Sur la couche de base GB 0/14, le retour à une moyenne de $54{,}84 \times 10^{-2}mm$ et la légère réduction de l'écart-type a $15{,}38 \times 10^{-2}mm$ confirment l'efficacité du renforcement. La grave-bitume, mieux homogène et moins sensible aux conditions climatiques que les couches antérieures, rétablit une portance plus uniforme sur l'ensemble du tronçon. Ce résultat valide la pertinence du suivi par essais Benkelman tout au long des phases de réhabilitation.

En synthèse, la variabilité des déflexions enregistrées résulte de la combinaison de trois catégories de

facteurs : climatiques et environnementaux, structurels et liés au vieillissement, méthodologiques et opératoires dont les effets relatifs ont pu être estimés par comparaison inter-campagnes et confrontation a la littérature, en dépit de l'impossibilité d'établir des corrélations quantitatives directes. Cette approche d'identification indirecte constitue, dans les conditions de terrain rencontrées, la démarche la plus rigoureuse techniquement réalisable.

V.2 Comparaison avec la littérature

Selon le CEBTP, les résultats obtenus sont cohérents avec les recommandations , qui souligne que les chaussées souples en climat tropical présentent des variations de déflexion sous l'effet des changements de température, de l'humidité et des caractéristiques des matériaux [11]. Dans notre étude, les valeurs de déflexion les plus élevées ont également été observées sur les sections les plus sensibles aux conditions environnementales, ce qui confirme l'influence de ces paramètres.

De même, PIARC [3] indique que les mesures de déflexion peuvent présenter une dispersion importante en raison de l'hétérogénéité structurelle de la chaussée et des conditions d'essai. Cette observation est en accord avec les résultats obtenus sur le tronçon PK 103–PK 117, où des écarts de déflexion ont été constatés entre plusieurs campagnes de mesure réalisées sur une même section.

Les travaux du SETRA [18] montrent également que les mesures de déflexion réalisées avant et après des opérations de renforcement permettent d'apprécier l'évolution de la capacité portante de la chaussée. De façon similaire, les mesures effectuées sur la couche GB 0/14 dans cette étude mettent en évidence une diminution de la variabilité des déflexions, traduisant une amélioration du comportement structural après les travaux de réhabilitation.

V.3.Limites de l'étude

La principale limite de cette étude tient à l'absence de données climatiques instrumentées, température de surface du revêtement, humidité relative de l'air, conditions de drainage, enregistrées concomitamment aux essais de déflexion. Cette lacune est liée aux conditions de réalisation des campagnes d'auscultation, les données climatiques n'ayant pas été enregistrées simultanément aux mesures de déflexion. Cette absence constitue une limite de la présente étude et restreint l'analyse quantitative de l'influence des paramètres climatiques sur la variabilité des mesures.

Elle n'a pas permis d'établir des corrélations quantitatives directes entre les paramètres environnementaux et les valeurs de déflexion. Les interprétations proposées reposent donc sur l'analyse

comparative des campagnes de mesure, les observations de terrain et les références bibliographiques disponibles. Une seconde limite concerne la contrainte opérationnelle imposée par le MEER, qui n'a pas autorisé le rabotage complet jusqu'à la couche de fondation non traitée (GNT). Cette décision, relevant de la maitrise d'ouvrage, a maintenu des hétérogénéités mécaniques locales dans les couches intermédiaires et a directement influencé la dispersion des mesures après rabotage. Elle a été prise en compte dans l'interprétation des résultats, qui ne s'appuient donc pas sur une hypothèse de structure homogène a cette phase.

Enfin la méthode de mesure manuelle à la poutre de Benkelman demeure sensible aux erreurs d'opérateur et aux irrégularités de surface. Ces biais instrumentaux et opératoires ont été pris en considération dans l'interprétation des résultats présentés au chapitre IV. Ils constituent des facteurs susceptibles d'influencer la dispersion résiduelle observée.

V.4. Propositions d'amélioration du diagnostic

Pour améliorer la fiabilité et la représentativité des mesures de déflexion, plusieurs pistes d'amélioration peuvent être envisagées.

Il est recommandé d'adopter un protocole de mesure intégrant systématiquement l'enregistrement des paramètres climatiques (température de la chaussée, humidité relative de l'air, conditions de drainage) afin de pouvoir appliquer des coefficients de correction aux valeurs mesurées.

Cette démarche permettrait de normaliser les résultats et de limiter l'effet des variations diurnes sur la rigidité apparente du revêtement.

L'étalonnage régulier de la poutre de Benkelman avant chaque série de mesures est également indispensable pour réduire les biais instrumentaux.

L'utilisation d'équipements automatiques tels que le Falling Weight Deflectometer (FWD) ou le Light Weight Deflectometer (LWD) offrirait une meilleure précision, une plus grande répétabilité et un enregistrement numérique instantané des résultats. Par ailleurs, la mise en relation des mesures de déflexion avec des observations visuelles (état de surface, fissures, orniérage) et des essais géotechniques complémentaires renforcerait l'interprétation structurelle de la chaussée.

Une formation récurrente des opérateurs sur la norme et un chef qui contrôle les qualités des mesures.

Enfin, il est souhaitable que les futures campagnes d'essais puissent être réalisées sur des structures

totalement dégagées, après retrait complet des couches dégradées jusqu'à la GNT.

Cette disposition, a la charge du maitre d'ouvrage (MEER), permettrait d'obtenir des valeurs plus représentatives du comportement réel de la fondation et de réduire les écarts observés entre sections adjacentes.

Une telle approche garantirait une meilleure corrélation entre les mesures de déflexion et la performance structurelle de la chaussée.

Conclusion partielle

Pour améliorer la fiabilité et la représentativité des mesures de déflexion, plusieurs pistes d'amélioration peuvent être envisagées.

Il est recommandé d'adopter un protocole de mesure intégrant systématiquement l'enregistrement des paramètres climatiques (température de la chaussée, humidité relative de l'air, conditions de drainage) afin de pouvoir appliquer des coefficients de correction aux valeurs mesurées.

Cette démarche permettrait de normaliser les résultats et de limiter l'effet des variations diurnes sur la rigidité apparente du revêtement.

L'étalonnage régulier de la poutre de Benkelman avant chaque série de mesures est également indispensable pour réduire les biais instrumentaux.

L'utilisation d'équipements automatiques tels que le Falling Weight Deflectometer (FWD) ou le Light Weight Deflectometer (LWD) offrirait une meilleure précision, une plus grande répétabilité et un enregistrement numérique instantané des résultats. Par ailleurs, la mise en relation des mesures de déflexion avec des observations visuelles (état de surface, fissures, orniérage) et des essais géotechniques complémentaires renforcerait l'interprétation structurelle de la chaussée.

Enfin, il est souhaitable que les futures campagnes d'essais puissent être réalisées sur des structures totalement dégagées, après retrait complet des couches dégradées jusqu'à la GNT.

Cette disposition, a la charge du maitre d'ouvrage (MEER), permettrait d'obtenir des valeurs plus représentatives du comportement réel de la fondation et de réduire les écarts observés entre sections adjacentes.

Une telle approche garantirait une meilleure corrélation entre les mesures de déflexion et la performance structurelle de la chaussée.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale

La présente étude, menée sur le tronçon PK 103 – PK 117 de l'Autoroute du Nord dans le cadre du programme de réhabilitation conduit par le BNETD pour le compte du MEER, avait pour objectif d'analyser la variabilité des mesures de déflexion obtenues à la poutre de Benkelman et d'en identifier les facteurs explicatifs, en vue d'améliorer la fiabilité du diagnostic structurel des chaussées.

L'analyse comparative des mesures réalisées avant-projet et au cours des différentes phases du chantier (avant rabotage, après rabotage et sur la couche de base GB 0/14) a permis de mettre en évidence une variabilité significative des valeurs de déflexion le long du tronçon, se traduisant par des écarts notables entre PK adjacents et entre campagnes successives. Cette variabilité semble résulter de la combinaison de plusieurs facteurs structurels, environnementaux et opératoires, ce qui montre que les mesures de déflexion doivent être interprétées en tenant compte du contexte des essais.

Trois catégories de facteurs apparaissent comme susceptibles de contribuer à la variabilité observée :

- Les conditions climatiques, température et humidité ambiantes qui modifient la rigidité des matériaux bitumineux et la portance des couches non traitées, et dont l'influence potentielle a été discutée à partir de la comparaison des campagnes de mesure, des observations de terrain et des données bibliographiques, en l'absence de mesures climatiques instrumentées;
- L'état de surface et le vieillissement du revêtement, qui induisent des discontinuités structurelles locales mises en relation avec les profils de déflexion à partir des observations visuelles réalisées sur le terrain;
- Les facteurs méthodologiques et opératoires, positionnement de la poutre, conditions d'exécution, contrainte de rabotage partiel imposée par le maître d'ouvrage qui contribuent à la dispersion résiduelle des valeurs.

Un résultat notable de cette étude est la démonstration que des mesures Benkelman réalisées sans enregistrement concomitant des paramètres climatiques ne permettent pas d'isoler les effets environnementaux des effets structurels. Ce constat, appuyé par la littérature internationale, constitue en lui-même une contribution technique utile pour la pratique de l'auscultation routière en Côte d'Ivoire, où ce type de protocole intégré reste peu répandu.

Sur le plan des résultats structurels, l'évolution cohérente des indicateurs statistiques entre les trois

campagnes, augmentation transitoire de la variabilité après rabotage, les mesures réalisées sur la couche de base en GB 0/14 présentent des valeurs de déflexion compatibles avec une meilleure réponse mécanique de la structure suivie par essais de déflexion tout au long des phases de réhabilitation et confirme l'efficacité du renforcement mis en œuvre.

L'analyse statistique réalisée à partir du coefficient de variation a permis de mettre en évidence une dispersion importante des mesures de déflexion sur l'ensemble du tronçon étudié. Les valeurs obtenues traduisent une valeur obtenue traduisent une hétérogénéité structurelle marquée entre les différentes sections auscultées. Ces résultats confirment l'intérêt du coefficient de variation comme outil d'appréciation de la variabilité des mesures et comme indicateur complémentaire dans l'interprétation du diagnostic structurel.

En définitive, cette étude plaide pour une approche intégrée du diagnostic des chaussées, combinant mesures de déflexion, enregistrement systématique des conditions climatiques, observations visuelles et essais géotechniques complémentaires. Les recommandations formulées : intégration de capteurs climatiques embarqués, étalonnage régulier de la poutre, recours progressif au FWD, formation des équipes de terrain constituent des orientations concrètes et réalistes pour améliorer la qualité des diagnostics structurels et optimiser la gestion du patrimoine routier ivoirien.

Perspectives

A la lumière des résultats et des limites rencontrées, plusieurs recommandations peuvent être formulées pour renforcer la qualité des futures campagnes d'auscultation et améliorer la performance des chaussées :

- Mettre en place un relevé systématiquement des paramètres climatiques (températures du revêtement, humidité relative, conditions météorologiques) lors des campagnes de déflexion afin de faciliter l'interprétation des résultats et de réduire les incertitudes liées aux conditions environnementales ;
- Procéder à l'étalonnage régulier de la poutre Benkelman avant chaque série d'essais et à la vérification du comparateur pour réduire les biais instrumentaux ;
- Mettre en œuvre des équipements automatiques tels que le Falling Weight Deflectometer (FWD) ou le Light Weight Deflectometer (LWD) pour améliorer la précision et la répétabilité des mesures ;
- Associer les mesures de déflexion a des observations visuelles détaillées (fissures, orniérage,

affaissements) et a des essais complémentaires (géotechniques et thermiques) pour une interprétation plus complète du comportement de la chaussée ;

- Prévoir, pour les prochaines campagnes, le rabotage complet jusqu'à la couche de fondation non traitée (GNT) ; afin d'obtenir des valeurs représentatives de la structure globale.
- Enfin, renforcer la formation des équipes techniques sur la manipulation de la poutre Benkelman et l'interprétation statistique des résultats, pour assurer la fiabilité et la durabilité des interventions futures.

Ces recommandations visent à améliorer la qualité du diagnostic structurel et à optimiser les stratégies de maintenance des infrastructures routières. Leur mise en œuvre contribuerait à une meilleure planification des travaux d'entretien et a une gestion durable du patrimoine routier ivoirien.

Ce travail ouvre ainsi la voie à des perspectives de recherche plus larges, notamment sur l'intégration des mesures statistiques et la modélisation numérique du comportement des chaussées, en vue de développer des outils prédictifs plus performants pour la gestion des infrastructures routières en Côte d'Ivoire.

Bibliographie

[1] SETRA-LCPC, «Auscultation des chausées routieres - Méthodes et interprétation .,» 1994.

[2] H. Y.H., «Pavement Analysis and Design , 2nd Edition,» 2004.

[3] P. R. A.), «Evaluating the performance of Automated Pavement Cracking Measurement Equipment . Technical Report 2012R10EN,» Paris, 2012.

[4] AASHTO, «Guide for Design of pavement structures,» 1993.

[5] CEBTP, «Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux,» 1984.

[6] LCPC-SETRA, «Conception et dimensionnement des structures de chaussée,Laboratoire Central des Ponts et chaussées (LCPC) et Service d'Etudes techniques des Routes et Autoroutes (SETRA),» Paris, 1994.

[7] CEBTP, «Guide Pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux,» 1984.

[8] LCPC-SETRA, «Catalogue des dégradations de surface des chaussées,» 1998.

[9] PIARC, «Road Pavement Maintenance Guidelines .,» 2014.

[10] AFNOR, «NF P 98-200-2-Mesure de la déflexion a la poutre Benkelman,» 1992.

[11] CEBTP, «Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux,» 1984.

[12] SHELL, «Shell pavement Design Manual,» 2003.

[13] LCPC, «Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) , Relevé des dégradations de surface des chaussées , Méthode d'essai LCPC n° 38-2, version 2.0 ,,» PARIS, 1997.

[14] LCPC, «Catalogue des dégradations de surface des chaussées , Méthode d'essai LPC n°52,» PARIS, 1998.

[15] U. P., «Modelling Flexible Pavement Response and performance,» 1998.

[16] D. P, «Statistique théorique et appliquée,» 2012.

[17] S. G. ., «Probabilités , analyse des données et statistique,» 2011.

[18] SETRA, «Les renforcements de chaussées - Diagnostic et conception , collection« Les Outils », Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie,,» Paris, 2013.

[19] TRRL, «Road Note 31 - Benkelman Beam Testing procedure,» 1993.

[20] I. M. Rahman M.T., «Effect of température on pavement deflection measurements,» 2008.

[21] K. H.G.R, «Pavement Management for developping countries,» 2000.

Table des annexes

Annexe 1 : Fiche de déflexion ii

Annexe 2 : Calcul des déflexions vii

Annexe 1 : Fiche de déflexion

1. Campagne de déflexion Avant Rabotage

Avant rabotage			
Déflexion (1/100 mm)			
PK(m)	Voie Rapide	Axe	Voie Lente
103+000	40	48	26
103+020	36	42	20
103+040	32	36	56
103+060	36	30	48
103+080	40	30	54
103+100	42	32	14
103+120	48	46	32
103+140	54	54	48
103+160	52	44	44
103+180	50	30	48
103+200	52	34	46
103+220	48	38	20
103+240	50	46	38
103+260	48	34	50
103+280	54	60	44
103+300	44	32	30
103+320	50	30	44
103+340	40	30	50
103+360	30	32	40
103+380	38	32	34
103+400	58	42	48
103+420	56	44	48
103+440	56	38	56
103+460	54	48	56
103+480	48	42	46
103+500	66	42	36
103+520	72	46	38
103+540	66	46	54
103+560	58	48	60
103+580	54	42	56
103+600	38	42	34
103+620	42	38	48
103+640	56	42	54
103+660	64	54	66
103+680	54	40	56
103+700	54	36	34
103+720	56	42	40
103+740	72	50	36

103+760	62	46	48

2. Campagne de déflexion Apres rabotage

Apres.Rabotage			
Déflexion (1/100 mm)			
PK(m)	Gauche	Axe	Droite
103+000	42	60	46
103+020	34	56	60
103+040	42	54	64
103+060	34	56	62
103+080	40	50	58
103+100	36	56	38
103+120	42	52	58
103+140	48	56	56
103+160	36	46	56
103+180	46	58	60
103+200	54	50	52
103+220	46	58	54
103+240	52	50	54
103+260	50	62	56
103+280	50	54	46
103+300	52	60	50
103+320	50	48	34
103+340	38	52	60
103+360	36	40	26
103+380	46	70	56
103+400	30	72	44
103+420	40	30	30
103+440	44	20	50
103+460	46	52	54
103+480	38	24	44
103+500	50	42	46
103+520	46	62	36
103+540	62	46	48
103+560	46	66	72
103+580	50	62	54
103+600	40	40	64
103+620	28	46	48
103+640	40	48	62
103+660	54	44	60
103+680	54	22	64
103+700	46	64	68
103+720	36	20	44

103+740	46	52	54

3. Campagne de déflexion sur GB 0/14

Sur GB 0/14			
Déflexion (1/100 mm)			
PK(m)	**Voie rapide**	**Axe**	**Voie lente**
103+000	56	24	64
103+020	40	44	64
103+040	48	40	56
103+060	44	32	58
103+080	42	36	46
103+100	36	50	48
103+120	40	44	52
103+140	40	32	36
103+160	42	60	56
103+180	48	62	56
103+200	52	64	60
103+220	57	38	44
103+240	40	42	52
103+260	26	24	52
103+280	46	38	52
103+300	50	42	54
103+320	58	40	24
103+340	36	44	52
103+360	52	34	64
103+380	32	34	50
103+400	46	36	66
103+420	40	36	58
103+440	36	44	48
103+460	40	32	42
103+480	54	44	56
103+500	60	52	24
103+520	34	50	60
103+540	99	48	70
103+560	38	50	46
103+580	46	62	54
103+600	62	26	40
103+620	44	76	62
103+640	56	64	66
103+660	48	66	58
103+680	48	40	44
103+700	4	62	60
103+720	52	40	74
103+740	60	56	58
103+760	60	56	64

4. Comparaison des déflexions Avant-projet et pendant projet

	AVANT PROJET (1/100 mm)		PENDANT PROJET (1/100 mm)		Différence de valeurs	
PK	Voie lente	Voie Rapide	Voie lente	Voie rapide	Voie lente	Voie rapide
103+000	31	28	26	40	5	12
103+020	31	24	20	36	11	12
103+040	35	30	56	32	21	2
103+060	31	34	48	36	17	2
103+080	25	19	54	40	29	21
103+100	33	26	14	42	19	16
103+120	34	25	32	48	2	23
103+140	34	30	48	54	14	24
103+160	36	15	44	52	8	37
103+180	30	22	48	50	18	28
103+200	28	23	46	52	18	29
103+220	35	27	20	48	15	21
103+240	35	30	38	50	3	20
103+260	35	37	50	48	15	11
103+280	36	26	44	54	8	28
103+300	38	32	30	44	18	12
103+320	30	37	44	50	14	13
103+340	35	42	50	40	15	2
103+360	26	33	40	30	14	3
103+380	25	36	34	38	9	2

L'analyse comparative met en évidence des écarts significatifs entre les deux campagnes de mesure. Sur certains points kilométriques, les valeurs de déflexion augmentent sensiblement pendant les travaux, traduisant une augmentation de la déformabilité apparente de la structure. Ces variations observées entre deux campagnes réalisées sur une même infrastructure apparaissant relativement contrastées et ne suivent pas une évolution uniforme sur l'ensemble du tronçon.

Annexe 2 : Calcul des déflexions

1. Calcul de déflexion Caractéristique sur Avant Rabotage

1.1. Calcul de déflexion caractéristique pour la voie rapide

Déflexion (1/100 mm) pour la voie rapide						
PK(m)	Déflexion moyenne(Dm)	Nbre de mesures	Variance	Nb de mesure-1	écart-type	Déflexion caractéristique
103+000-103+500	47,00	26	75,60	25	8,69	64,39
103+520-104+000	53,68	25	94,56	24	9,72	73,13
104+020-104+500	49,28	25	109,29	24	10,45	70,19
104+520-105+000	49,20	25	64,33	24	8,02	65,24
105+020-105+500	34,60	25	121,17	24	11,01	56,62
105+520-106+000	46,96	25	101,37	24	10,07	67,10
106+020-106+500	59,52	25	240,76	24	15,52	90,55
106+520-107+000	52,08	25	141,83	24	11,91	75,90
107+020-107+500	46,16	25	133,64	24	11,56	69,28
107+520-108+000	39,04	25	111,71	24	10,57	60,18
108+020-108+500	40,40	25	38,33	24	6,19	52,78
108+520-109+000	37,28	25	91,29	24	9,55	56,39
109+020-109+500	38,88	25	28,36	24	5,33	49,53
109+520-110+000	33,00	18	32,59	17	5,71	44,42
110+020-110+500	30,00	1	0,00	0	0,00	30,00
110+520-111+000	31,68	25	66,23	24	8,14	47,96
111+020-111+500	34,40	25	49,33	24	7,02	48,45
111+520-112+000	34,56	25	52,84	24	7,27	49,10
112+020-112+500	45,76	25	43,44	24	6,59	58,94
112+520-113+000	40,80	25	94,33	24	9,71	60,23
113+020-113+500	47,52	25	193,43	24	13,91	75,34
113+520-114+000	47,78	18	241,36	17	15,54	78,85
114+020-	59,29	14	139,45	13	11,81	82,90

114+500						
114+520-115+000	68,13	15	97,98	14	9,90	87,93
115+020-115+500	61,52	25	216,43	24	14,71	90,94
115+520-116+000	62,24	25	153,44	24	12,39	87,01
116+020-116+500	59,52	25	39,09	24	6,25	72,02
116+520-117+000	72,08	25	170,49	24	13,06	98,19
Dm globale/Varianc	47,49		219,45		14,81	**77,11**

1.2. Calcul de déflexion caractéristique pour l'axe

Déflexion (1/100 mm) pour l'axe						
PK(m)	Déflexion moyenne(Dm)	Nbre de mesures	Variance	Nb de mesure-1	écart-type	Déflexion caractéristique
103+000-103+500	39,08	26	66,95	25	8,18	55,44
103+520-104+000	40,16	25	59,31	24	7,70	55,56
104+020-104+500	36,00	25	41,33	24	6,43	48,86
104+520-105+000	40,72	25	61,96	24	7,87	56,46
105+020-105+500	33,04	25	339,37	24	18,42	69,88
105+520-106+000	51,12	25	108,03	24	10,39	71,91
106+020-106+500	44,04	25	216,21	24	14,70	73,45
106+520-107+000	47,36	25	241,57	24	15,54	78,45
107+020-107+500	46,40	25	211,33	24	14,54	75,47
107+520-108+000	39,44	25	156,17	24	12,50	64,43
108+020-108+500	43,36	25	160,24	24	12,66	68,68
108+520-109+000	44,64	25	97,57	24	9,88	64,40
109+020-109+500	46,24	25	145,44	24	12,06	70,36
109+520-110+000	57,67	18	138,00	17	11,75	81,16
110+020-110+500	72,00	1	0,00	0	0,00	72,00
110+520-111+000	58,40	25	90,33	24	9,50	77,41
111+020-111+500	55,12	25	230,36	24	15,18	85,48
111+520-112+000	55,44	25	119,17	24	10,92	77,27

112+020-112+500	67,04	25	108,04	24	10,39	87,83
112+520-113+000	58,88	25	60,36	24	7,77	74,42
113+020-113+500	51,84	25	102,31	24	10,11	72,07
113+520-114+000	55,78	18	97,36	17	9,87	75,51
114+020-114+500	51,57	14	72,11	13	8,49	68,55
114+520-115+000	73,07	15	176,50	14	13,29	99,64
115+020-115+500	76,80	25	195,67	24	13,99	104,78
115+520-116+000	73,20	25	200,00	24	14,14	101,48
116+020-116+500	67,84	25	144,64	24	12,03	91,89
116+520-117+000	72,16	25	176,64	24	13,29	98,74
Dm globale/Varian	52,46		287,07		16,94	**86,35**

1.3. Déflexion caractéristique pour la voie lente

	Déflexion (1/100 mm) pour la voie lente					
PK(m)	Déflexion moyenne(Dm)	Nbre de mesures	Variance	Nb de mesure-1	écart-type	Déflexion caractéristique
103+000-103+500	41,38	26	137,85	25	11,74	64,87
103+520-104+000	46,56	25	90,51	24	9,51	65,59
104+020-104+500	42,48	25	85,09	24	9,22	60,93
104+520-105+000	46,96	25	72,37	24	8,51	63,97
105+020-105+500	49,76	25	57,11	24	7,56	64,87
105+520-106+000	51,36	25	138,91	24	11,79	74,93
106+020-106+500	52,92	25	226,99	24	15,07	83,05
106+520-107+000	53,20	25	121,00	24	11,00	75,20
107+020-107+500	52,24	25	187,44	24	13,69	79,62
107+520-108+000	51,52	25	173,09	24	13,16	77,83
108+020-108+500	56,64	25	175,57	24	13,25	83,14
108+520-109+000	59,04	25	226,71	24	15,06	89,15
109+020-	53,60	25	84,67	24	9,20	72,00

109+500						
109+520-110+000	51,78	18	79,95	17	8,94	69,66
110+020-110+500	24,00	1	0,00	0	0,00	24,00
110+520-111+000	47,28	25	255,96	24	16,00	79,28
111+020-111+500	67,44	25	127,51	24	11,29	90,02
111+520-112+000	56,64	25	163,24	24	12,78	82,19
112+020-112+500	49,04	25	111,71	24	10,57	70,18
112+520-113+000	49,76	25	138,44	24	11,77	73,29
113+020-113+500	54,40	25	150,00	24	12,25	78,89
113+520-114+000	47,44	18	46,97	17	6,85	61,15
114+020-114+500	84,71	14	48,99	13	7,00	98,71
114+520-115+000	68,40	15	193,83	14	13,92	96,24
115+020-115+500	66,64	25	172,91	24	13,15	92,94
115+520-116+000	59,36	25	227,24	24	15,07	89,51
116+020-116+500	51,44	25	162,84	24	12,76	76,96
116+520-117+000	63,28	25	134,63	24	11,60	86,49
Dm globale/Varian	53,95		205,23		14,33	**82,60**

2. Calcul des déflexions caractéristiques pour Apres rabotage

2.1. Calcul des déflexions caractéristiques de la voie rapide

Déflexion (1/100 mm) pour la voie rapide						
PK(m)	Déflexion moyenne(Dm)	Nbre de mesures	Variance	Nb de mesure-1	écart-type	Déflexion caractéristique
103+000-103+500	43,15	26	43,58	25	6,60	56,36
103+520-104+000	40,88	25	92,03	24	9,59	60,07
104+020-104+500	47,92	25	104,83	24	10,24	68,40
104+520-105+000	45,08	25	169,33	24	13,01	71,11
105+020-105+500	55,24	25	366,44	24	19,14	93,53
105+520-106+000	41,76	25	107,77	24	10,38	62,52
106+020-	50,72	25	249,96	24	15,81	82,34

106+500						
106+520-107+000	54,56	25	207,51	24	14,41	83,37
107+020-107+500	53,60	25	163,67	24	12,79	79,19
107+520-108+000	44,24	25	82,44	24	9,08	62,40
108+020-108+500	49,52	25	97,09	24	9,85	69,23
108+520-109+000	44,56	25	216,84	24	14,73	74,01
109+020-109+500	31,28	25	58,29	24	7,64	46,55
109+520-110+000	28,11	18	29,40	17	5,42	38,96
110+020-110+500	32,00	1	0,00	0	0,00	32,00
110+520-111+000	33,36	25	62,57	24	7,91	49,18
111+020-111+500	35,68	25	80,56	24	8,98	53,63
111+520-112+000	36,88	25	82,03	24	9,06	54,99
112+020-112+500	50,08	25	89,83	24	9,48	69,04
112+520-113+000	42,56	25	105,17	24	10,26	63,07
113+020-113+500	37,84	25	64,31	24	8,02	53,88
113+520-114+000	39,44	18	36,14	17	6,01	51,47
114+020-114+500	41,57	14	108,42	13	10,41	62,40
114+520-115+000	52,00	15	126,29	14	11,24	74,48
115+020-115+500	54,08	25	265,49	24	16,29	86,67
115+520-116+000	57,36	25	173,24	24	13,16	83,68
116+020-116+500	56,24	25	99,11	24	9,96	76,15
116+520-117+000	59,68	25	138,56	24	11,77	83,22
Dm globale/Varianc	45,65		192,23		13,86	**73,38**

2.2. Calcul de déflexion pour l'axe

PK(m)	Déflexion moyenne(Dm)	Nbre de mesures	Variance	Nb de mesure-1	écart-type	Déflexion caractéristique
103+000-103+500	51,08	26	146,95	25	12,12	75,32
103+520-104+000	47,52	25	313,09	24	17,69	82,91
104+020-104+500	50,80	25	305,33	24	17,47	85,75
104+520-105+000	54,64	25	253,74	24	15,93	86,50

105+020-105+500	64,52	25	137,34	24	11,72	87,96
105+520-106+000	56,40	25	156,33	24	12,50	81,41
106+020-106+500	62,00	25	457,67	24	21,39	104,79
106+520-107+000	56,00	25	215,33	24	14,67	85,35
107+020-107+500	51,68	25	95,89	24	9,79	71,27
107+520-108+000	56,72	25	289,63	24	17,02	90,76
108+020-108+500	52,80	25	182,00	24	13,49	79,78
108+520-109+000	54,12	25	165,86	24	12,88	79,88
109+020-109+500	32,96	25	81,37	24	9,02	51,00
109+520-110+000	32,44	18	96,26	17	9,81	52,07
110+020-110+500	58,00	1	0,00	0	0,00	58,00
110+520-111+000	59,84	25	203,64	24	14,27	88,38
111+020-111+500	63,08	25	147,16	24	12,13	87,34
111+520-112+000	58,56	25	230,84	24	15,19	88,95
112+020-112+500	62,40	25	228,67	24	15,12	92,64
112+520-113+000	66,64	25	212,57	24	14,58	95,80
113+020-113+500	55,52	25	301,76	24	17,37	90,26
113+520-114+000	47,22	18	141,24	17	11,88	70,99
114+020-114+500	55,57	14	270,88	13	16,46	88,49
114+520-115+000	71,60	15	150,40	14	12,26	96,13
115+020-115+500	86,72	25	294,96	24	17,17	121,07
115+520-116+000	80,40	25	198,67	24	14,09	108,59
116+020-116+500	80,64	25	181,24	24	13,46	107,57
116+520-117+000	71,68	25	122,89	24	11,09	93,85
Dm globale/Varian	58,90		347,91		18,65	**96,20**

2.3. Calcul de déflexion pour la voie lente

PK(m)	Déflexion moyenne(Dm)	Nbre de mesures	Variance	Nb de mesure-1	écart-type	Déflexion caractéristique
103+000-103+500	50,54	26	98,10	25	9,90	70,35
103+520-104+000	50,48	25	154,09	24	12,41	75,31
104+020-104+500	51,52	25	113,76	24	10,67	72,85
104+520-105+000	58,08	25	491,74	24	22,18	102,43
105+020-105+500	63,92	25	70,91	24	8,42	80,76
105+520-106+000	55,60	25	126,67	24	11,25	78,11
106+020-106+500	71,12	25	260,03	24	16,13	103,37
106+520-107+000	71,68	25	304,23	24	17,44	106,56
107+020-107+500	63,72	25	243,13	24	15,59	94,91
107+520-108+000	61,04	25	185,04	24	13,60	88,25
108+020-108+500	65,12	25	414,03	24	20,35	105,82
108+520-109+000	67,92	25	322,49	24	17,96	103,84
109+020-109+500	48,16	25	64,97	24	8,06	64,28
109+520-110+000	43,78	18	116,18	17	10,78	65,34
110+020-110+500	54,00	1	0,00	0	0,00	54,00
110+520-111+000	53,60	25	100,67	24	10,03	73,67
111+020-111+500	57,28	25	204,96	24	14,32	85,91
111+520-112+000	47,44	25	175,51	24	13,25	73,94
112+020-112+500	44,96	25	86,37	24	9,29	63,55
112+520-113+000	42,08	25	116,16	24	10,78	63,64
113+020-113+500	70,88	25	161,03	24	12,69	96,26
113+520-114+000	68,72	18	334,92	17	18,30	105,32
114+020-114+500	67,57	14	59,19	13	7,69	82,96
114+520-115+000	63,33	15	162,10	14	12,73	88,80
115+020-115+500	66,80	25	195,33	24	13,98	94,75
115+520-116+000	63,32	25	351,73	24	18,75	100,83
116+020-	58,56	25	204,51	24	14,30	87,16

116+500						
116+520-117+000	66,16	25	326,97	24	18,08	102,32
Dm globale/Varian	58,84		274,22		16,56	**91,96**

3. Calcul de déflexion sur la GB

3.1. Calcul de déflexion pour la voie rapide

Déflexion (1/100 mm) pour la voie rapide						
PK(m)	Déflexion moyenne(Dm)	Nbre de mesures	Variance	Nb de mesure-1	écart-type	Déflexion caractéristique
103+000-103+500	44,65	26	72,88	25	8,54	61,73
103+520-104+000	46,04	25	263,71	24	16,24	78,52
104+020-104+500	42,32	25	83,23	24	9,12	60,57
104+520-105+000	41,36	25	58,24	24	7,63	56,62
105+020-105+500	43,60	25	38,00	24	6,16	55,93
105+520-106+000	47,84	25	56,31	24	7,50	62,85
106+020-106+500	54,24	25	99,77	24	9,99	74,22
106+520-107+000	57,60	25	149,00	24	12,21	82,01
107+020-107+500	48,88	25	123,69	24	11,12	71,12
107+520-108+000	42,72	25	108,29	24	10,41	63,53
108+020-108+500	56,32	25	154,23	24	12,42	81,16
108+520-109+000	39,60	25	175,33	24	13,24	66,08
109+020-109+500	39,76	25	73,44	24	8,57	56,90
109+520-110+000	35,11	18	34,46	17	5,87	46,85
110+020-110+500	28,00	1	0,00	0	0,00	28,00
110+520-111+000	34,80	25	51,00	24	7,14	49,08
111+020-111+500	35,12	25	54,69	24	7,40	49,91
111+520-112+000	35,12	25	51,69	24	7,19	49,50
112+020-112+500	42,16	25	68,31	24	8,26	58,69
112+520-113+000	51,12	25	72,03	24	8,49	68,09
113+020-113+500	48,48	25	121,09	24	11,00	70,49
113+520-114+000	54,22	18	36,18	17	6,02	66,25
114+020-114+500	60,57	14	159,03	13	12,61	85,79
114+520-	67,73	15	162,78	14	12,76	93,25

115+000						
115+020-115+500	64,64	25	246,57	24	15,70	96,05
115+520-116+000	68,32	25	222,23	24	14,91	98,13
116+020-116+500	64,88	25	127,36	24	11,29	87,45
116+520-117+000	55,44	25	346,59	24	18,62	92,67
Dm globale/Varianc	48,55		213,20		14,60	**77,75**

3.2. Calcul de déflexion pour l'axe

PK(m)	Déflexion moyenne(Dm)	Nbre de mesures	Variance	Nb de mesure-1	écart-type	Déflexion caractéristique
103+000-103+500	41,08	26	103,75	25	10,19	61,45
103+520-104+000	48,00	25	226,00	24	15,03	78,07
104+020-104+500	45,76	25	216,44	24	14,71	75,18
104+520-105+000	45,20	25	104,00	24	10,20	65,60
105+020-105+500	42,40	25	119,67	24	10,94	64,28
105+520-106+000	48,00	25	48,33	24	6,95	61,90
106+020-106+500	44,32	25	80,56	24	8,98	62,27
106+520-107+000	52,08	25	133,16	24	11,54	75,16
107+020-107+500	49,20	25	148,00	24	12,17	73,53
107+520-108+000	41,04	25	87,37	24	9,35	59,73
108+020-108+500	52,40	25	142,67	24	11,94	76,29
108+520-109+000	62,72	25	211,29	24	14,54	91,79
109+020-109+500	53,20	25	40,67	24	6,38	65,95
109+520-110+000	59,56	18	43,56	17	6,60	72,75
110+020-110+500	58,00	1	0,00	0	0,00	58,00
110+520-111+000	63,60	25	52,00	24	7,21	78,02
111+020-111+500	60,00	25	156,67	24	12,52	85,03
111+520-112+000	54,72	25	57,96	24	7,61	69,95
112+020-112+500	60,08	25	113,16	24	10,64	81,36
112+520-113+000	60,56	25	184,17	24	13,57	87,70
113+020-	62,24	25	249,77	24	15,80	93,85

113+500						
113+520-114+000	60,67	18	107,76	17	10,38	81,43
114+020-114+500	71,57	14	125,03	13	11,18	93,94
114+520-115+000	78,00	15	222,29	14	14,91	107,82
115+020-115+500	79,20	25	388,00	24	19,70	118,60
115+520-116+000	83,36	25	237,57	24	15,41	114,19
116+020-116+500	67,76	25	264,11	24	16,25	100,26
116+520-117+000	52,44	25	484,76	24	22,02	96,47
Dm globale/Varian	56,34		284,10		16,86	**90,05**