

# ÉTUDE DE L'ÉVOLUTION DU MODULE ÉLASTIQUE DES ENROBÉS EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE À PARTIR DES MESURES DE DÉFLEXION

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU  
MASTER EN INGÉNIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT  
OPTION : GÉNIE CIVIL

-----  
*Présenté et soutenu publiquement le 10 juin 2011 par*

**Aimé Sylvain TANGOU TCHETGNA**

*Travaux dirigés par :*

**Dr. Ismaïla GUEYE**

Enseignant, au 2IE

UTER ISM

**M. Ali SANA**

Chef de Département

Géotechnique Routière au LNBTP

*Jury d'évaluation du stage :*

Président : **Dr. Ismaïla GUEYE**

Membres et correcteurs : **Pr. Jean Hugues THOMASSIN**

**Dr. Raffaële VINAI**

**Dr. Christel BRUNSCHWIG**

**M. Ali SANA**

**Promotion [2010/2011]**

## **CITATIONS**

*« Nul ne pense jamais seul »*

## **DÉDICACE**

Je souhaite exprimer ma gratitude à ma famille et à mes amis pour leur soutien quotidien.

Merci donc à Nkwetcha, Tchoua, Kouatchet, et tout particulièrement à Justin SAWADOGO et toute son équipe pour leur accueil. Vos encouragements et surtout votre amitié et accueil m'ont permis de m'intégrer dans la structure d'accueil où s'est déroulé le stage. Ce travail vous est dédié.

## **REMERCIEMENTS**

Pour leur participation à l'aboutissement de ce rapport, je tiens à remercier sincèrement :

Madame Clémence TRAORE / SOME pour avoir accepté que j'effectue mon stage dans la société LNBTP dont elle en a la charge.

Monsieur Kalsibiri KABORE pour ses conseils tout au long de la période de stage.

Monsieur Bakary HEMA pour m'avoir recommandé auprès de l'entreprise LNBTP.

Monsieur Ismaïla GUEYE Enseignant au 2IE pour avoir accepté le rôle de Directeur de mémoire.

Monsieur Ali SANA pour avoir accepté le rôle d'encadreur.

Madame Christel BRUNSCHWIG pour son aide dans la construction du plan d'expérience et les interprétations.

Messieurs Issaka SALIA, Raffaele VINAÏ, Djim DOUMBE DAMBA, Daouda SANGUISSO et Yacouba BANCE pour leurs suggestions pour la rédaction de ce document.

Tout le corps professoral de 2iE qui a bien voulu nous partagé ses expériences pendant notre formation.

Je tiens également à remercier tout le personnel du Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics pour leur accueil.

## **RÉSUMÉ**

Les effets de la température sur le comportement de l'enrobé sont relativement complexes, car la variation de la température s'effectue à vitesse variable, du fait des différences entre cycles journaliers. L'étude du comportement de l'enrobé en fonction de la température requiert la connaissance du comportement de ses caractéristiques mécaniques face à cette température.

C'est ainsi que pour ce travail, il a été établi à partir des modules élastiques obtenus par des mesures de déflexion et moyennant la méthode du plan d'expérience les modules prédictifs en fonction de la température et des variations spatiales de la grave bitume 0/20 et du béton bitumineux 0/10. Cette étude a été réalisée en trois phases :

Une phase qui a permis d'établir la courbe d'évolution des températures journalières à partir des mesures de température.

Une phase comprenant une première partie dont l'objectif est la mesure des déflexions à l'aide de la poutre de Benkelman. Et une deuxième partie consistant en la transformation par calcul itératif dans le logiciel ALIZÉ des déflexions en modules élastiques.

Enfin une phase dont la finalité est l'établissement d'un modèle mathématique devant prédire l'évolution du module élastique en fonction des paramètres de l'étude pour chaque matériau.

Cette étude montre que :

- ✓ Une augmentation de la température se traduit par une diminution de la rigidité et une augmentation de la déflexion.
- ✓ L'homogénéité de la distribution dimensionnelle des granulats dans la matrice de l'enrobé a une influence sur le module élastique.
- ✓ La valeur maximale du module élastique de l'enrobé est obtenue au centre du domaine expérimental qui correspond pour chaque période de mesure à une température de 31,5°C pour la grave bitume et 33,5°C pour le béton bitumineux.

**Mots Clés :** module élastique- déflexion- plan d'expérience- grave bitume 0/20- béton bitumineux 0/10

## **ABSTRACT**

Effects of temperature on the behavior of coated are relatively complex, because the variation of temperature takes place at variable-speeds, because of differences between daily cycles. The survey of the behavior of coated according to temperature requires knowledge of the behavior of its mechanical features facing this temperature.

This is how for this work it has been established from the elastic modules gathered by measures of deflection and with the help of the experimental designs predictive modules according to the temperature and the spatial variations of the gravel stabilized with bitumen 0/20 and of the asphalt concrete 0/10. This survey includes three phases:

A phase whose goal is to establish the curve of daily temperature evolution from measures of temperature.

A phase comprising a first part whose objective is the measure of deflections with the help of the Benkelman beam. And a second part consisting of the transformation by iterative calculation with ALIZÉ software deflections in elastic modules.

Finally a phase whose finality is the establishment of a mathematical model aiming at predicting the evolution of the elastic module according to parameters of the survey for every material.

This survey shows that:

- ✓ An increase of the temperature results in a reduction of the rigidity and an increase of deflection.
- ✓ The homogeneity of the dimensional distribution of aggregates in the matrix of coated has an influence on the elastic module.
- ✓ Higher elastic module value of coated is obtained in the center of the experimental domain that corresponds for every period of measure to a temperature of 31,5°C for the gravel stabilized with bitumen and 33,5°C for the bituminous concrete.

**Key words:** elastic module- deflection- experimental design- gravel stabilized with bitumen- asphalt concrete

## **LISTE DES ABREVIATIONS**

BBSG 0/10	: Béton Bitumineux Semi Grenu 0/10
CBR	: Californian Bearing Ratio
CRR	: Centre de Recherche Routières
D	: Diamètre du plus gros granulat
DF	: Degré de liberté (degree of freedom)
DGR	: Département Géotechnique Routière
E	: Module élastique
F Fisher	: Facteur de Fisher
Fo	: $F_o = F_{A/E}$ (si calcul de l'ajustement), $F_o = F_{reg/res}$ (si calcul de la régression)
$F_{A/E}$	: facteur d'évaluation de l'ajustement par rapport à l'erreur expérimentale
$F_{reg/res}$	: facteur d'évaluation de la régression par rapport au résidu
GB 0/20	: Grave Bitume 0/20
Ip	: Indice de plasticité
LNBTTP	: Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics
MS	: Carré moyen
MSa	: Carré moyen des écarts d'ajustement
MSE	: Carré moyen des écarts expérimentaux
Msreg	: Carré moyen des régressions
Msres	: Carré moyen des résidus
Mstot	: Carré moyen des écarts totaux
MVR	: Masse Volumique Réel
OPM	: Optimum Proctor Modifié
$R^2$	: Coefficient de détermination
RN01	: Route Nationale n° 1
RN04	: Route Nationale n° 4
SS	: Somme des carrés
Wl	: Limite de liquidité

## TABLE DES MATIÈRES

CITATIONS.....	i
DÉDICACE.....	ii
REMERCIEMENTS .....	iii
RÉSUMÉ.....	iv
ABSTRACT .....	v
LISTE DES ABREVIATIONS .....	vi
TABLE DES MATIÈRES .....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES FIGURES.....	xi
LISTE DES PHOTOS .....	xii
<i>1</i> INTRODUCTION.....	<i>1</i>
<i>2</i> PRÉSENTATION DU DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL.....	<i>3</i>
<i>3</i> MATÉRIELS ET MÉTHODE.....	<i>4</i>
3.1 SITE EXPÉRIMENTAL.....	4
3.1.1 Bref historique.....	4
3.1.2 Localisation .....	4
3.1.3 Ancienne structure.....	5
3.1.4 Nouvelle structure .....	6
3.2 MATÉRIAUX D'ÉTUDE.....	7
3.2.1 Éléments de formulation .....	7
3.2.2 Caractéristiques des enrobés mis en œuvre.....	8
3.3 ÉTUDE EXPÉRIMENTALE.....	9
3.3.1 Les facteurs .....	10
3.3.2 Variable de réponse.....	12

3.3.3	Modèle statistique .....	12
3.4	PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES ET TRAITEMENT DES DONNÉES .....	13
3.4.1	Planning des expériences .....	13
3.4.2	Essais réalisés .....	14
3.4.2.1	<i>Mesure de la température</i> .....	14
3.4.2.2	<i>Mesure de déflexion</i> .....	15
3.4.3	Traitement des données .....	16
3.4.3.1	<i>Températures</i> .....	16
3.4.3.2	<i>Détermination des modules élastiques</i> .....	16
4	RÉSULTATS /INTERPRÉTATIONS .....	18
4.1	RESULTATS .....	18
4.1.1	Température .....	18
4.1.2	Grave bitume .....	19
4.1.2.1	<i>Synthèses des mesures in situ</i> .....	19
4.1.2.2	<i>Détermination des coefficients du modèle <math>\beta_i</math></i> .....	20
4.1.2.3	<i>Validation du modèle</i> .....	21
4.1.3	Béton bitumineux .....	21
4.1.3.1	<i>Synthèses des mesures in situ</i> .....	21
4.1.3.2	<i>Détermination des coefficients du modèle <math>\beta_i</math></i> .....	23
4.1.3.3	<i>Validation du modèle</i> .....	23
4.2	INTERPRÉTATIONS .....	24
4.2.1	Température .....	24
4.2.2	Déflexions .....	24
4.2.3	Grave bitume .....	25
4.2.3.1	<i>Température</i> .....	25
4.2.3.2	<i>Les interactions</i> .....	26

4.2.3.3	<i>Validation du modèle</i> .....	26
4.2.4	Béton bitumineux .....	27
4.2.4.1	<i>Température</i> .....	27
4.2.4.2	<i>Les interactions</i> .....	29
4.2.4.3	<i>Validation du modèle</i> .....	31
4.2.5	Comparaison des valeurs du modèle avec celles du logiciel ALIZÉ (valeurs approchées).....	32
5	CONCLUSION - RECOMMANDATIONS – <i>PERSPECTIVES</i> .....	35
5.1	CONCLUSION .....	35
5.2	RECOMMANDATIONS .....	36
5.3	PERSPECTIVES.....	37
6	BIBLIOGRAPHIE .....	39
7	ANNEXES .....	42

## **LISTE DES TABLEAUX**

<i>Tableau.3-1: Matériaux du sol de plate forme.....</i>	<i>5</i>
<i>Tableau 3-2: Caractéristiques des matériaux du profil 74.....</i>	<i>6</i>
<i>Tableau 3-3: Caractéristiques des matériaux du profil 218.....</i>	<i>6</i>
<i>Tableau 3-4: Formulation de la GB 0/20.....</i>	<i>7</i>
<i>Tableau 3-5: Formulation du BBSG 0/10.....</i>	<i>7</i>
<i>Tableau 3-6: Caractéristiques du granulat.....</i>	<i>8</i>
<i>Tableau 3-7: Caractéristiques du liant.....</i>	<i>8</i>
<i>Tableau 3-8: Caractéristiques des enrobés mis en œuvre.....</i>	<i>9</i>
<i>Tableau 3-9: Points expérimentaux de la grave bitume 0/20.....</i>	<i>11</i>
<i>Tableau 3-10: Points expérimentaux du béton bitumineux 0/10.....</i>	<i>11</i>
<i>Tableau 4-1: Données traitement températures.....</i>	<i>18</i>
<i>Tableau 4-2: Evolution des déflexions sur la grave bitume 0/20.....</i>	<i>19</i>
<i>Tableau 4-3: Correspondance déflexion – module de la grave bitume.....</i>	<i>20</i>
<i>Tableau 4-4: Coefficients de la grave bitume.....</i>	<i>20</i>
<i>Tableau 4-5: Ratios de la grave bitume.....</i>	<i>21</i>
<i>Tableau 4-6: Evolution des déflexions sur le béton bitumineux.....</i>	<i>21</i>
<i>Tableau 4-7: Correspondance déflexion – module du béton bitumineux.....</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 4-8: Coefficients béton bitumineux.....</i>	<i>23</i>
<i>Tableau 4-9: Ratios béton bitumineux.....</i>	<i>23</i>

## **LISTE DES FIGURES**

<i>Figure 3-1: Vue en plan du domaine expérimental.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 3-2: Perspective du domaine expérimental (Plans d'expériences).....</i>	<i>12</i>
<i>Figure.3-3: Représentation des points expérimentaux .....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 4-1: Courbes des températures journalières.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 4-2: Variation des déflexions sur la grave bitume .....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 4-3: Variation des déflexions sur le béton bitumineux.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure 4-4: Courbe iso réponse du module <math>E=f(T)</math> de la GB 0/20.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure 4-5: Dispersion des résultats de mesure par rapport au modèle (GB 0/20).....</i>	<i>27</i>
<i>Figure 4-6: Courbe iso réponse du module <math>E=f(X, T) Y=0</math> du BBSG 0/10.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure 4-7: Courbe iso réponse du module <math>E=f(Y, T) X=0</math> du BBSG 0/10.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure 4-8: Courbe iso réponse du module <math>E=f(X, Y)</math> à <math>T=29^{\circ}\text{C}</math> du BBSG 0/10.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure 4-9: Courbe iso réponse du module <math>E=f(X, Y)</math> à <math>T=38^{\circ}\text{C}</math> du BBSG 0/10.....</i>	<i>31</i>
<i>Figure 4-10: Dispersion des résultats de mesure par rapport au modèle (BBSG 0/10) .....</i>	<i>32</i>
<i>Figure 4-11: Comparaison modèle et valeurs ALIZÉ _ grave bitume.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure 4-12: Comparaison modèle et valeurs ALIZÉ _ béton bitumineux.....</i>	<i>33</i>

## **LISTE DES PHOTOS**

<i>Photo 3-1: Localisation des sites expérimentaux (Source image : Google earth / Tangou).....</i>	<i>5</i>
<i>Photo 3-2: Thermomètre à sonde.....</i>	<i>15</i>
<i>Photo 3-3: Poutre de Benkelman .....</i>	<i>16</i>

## **1 INTRODUCTION**

La détermination des caractéristiques des chaussées a longtemps été un problème pour les Ingénieurs routiers (Saltan et al., 2011) des pays en voie développement à cause du manque de données fiables issues des études. Dans ce contexte, le choix des propriétés mécaniques des matériaux constitutifs des différentes couches de chaussée, notamment le module élastique dans la plupart des pays d'Afrique fait l'objet de bataille de procédures entre les différentes parties prenantes en début d'exécution de projet routier. Pour pallier ce problème, les Ingénieurs Africains se contentent depuis des années d'adapter les spécifications Françaises comme le recommande le guide de dimensionnement des chaussées du CEBTP (1984). L'adaptation des résultats des études établies dans des contextes environnementaux et climatiques différents de ceux des pays tropicaux n'est pas sans conséquence sur le comportement mécanique du matériau bitumineux mis en œuvre car les spécifications techniques des matériaux en vue de leur utilisation en construction routière sont, elles, en relation avec la zonalité géologique.

Des études ont montré que, le mélange bitumineux est un matériau hétérogène auquel la matrice confère des propriétés viscoélastiques, mais ces caractéristiques sont fortement dépendantes de la température (Bodin et al., 2001). De plus, l'importance de la déflexion d'une route sous charge dépend principalement de la rigidité de sa structure (Van Geem et al., 2009), des conditions du sol support et la rigidité du revêtement dépend en effet de la fréquence de chargement imposée ainsi que de la température du matériau (Grenier and Konrad, 2009). Dans ces conditions, la réception des travaux d'enrobé exécutés par les entreprises se fait généralement dans une atmosphère de tension entre l'entreprise et la mission de contrôle à cause de l'absence de dispositions, dans le cahier de charges, prenant en compte l'influence des conditions atmosphériques sur le matériau mis en place.

Face à la méconnaissance et /ou à une insuffisance d'informations sur l'évolution du module élastique en fonction de la température locale, il se pose un véritable problème de sa prise en compte dans le dimensionnement des structures de chaussée. Par conséquent les effets des écarts thermiques sur le module des enrobés constituent la principale occupation de la présente étude dont les objectifs sont :

- ✓ l'établissement d'une corrélation du module en fonction de la température et une variation spatiale du module ;
- ✓ et la détermination du module élastique optimal de dimensionnement.

La méthodologie d'étude est principalement basée sur :

- ✓ les mesures de température et de déflexion sur chaussée nouvellement construite ;
- ✓ une étude sur le module du BBSG 0/10 et GB 0/20 en fonction des mesures de déflexion ;
- ✓ l'établissement d'une corrélation empirique du module avec la température et des coordonnées spatiales ;
- ✓ des propositions pour le dimensionnement des chaussées.

Le travail présenté dans ce document est scindé en cinq parties comme suit :

- ✓ Introduction ;
- ✓ Une présentation des missions, des attributions et du fonctionnement de la structure d'accueil ;
- ✓ Une description détaillée : de l'historique, de la localisation, des caractéristiques géotechniques des matériaux naturels de l'ancienne et de la nouvelle chaussée des sites expérimentaux, des matériaux étudiés, de la méthodologie, du matériel utilisé et des méthodes de traitement de données ;
- ✓ Une présentation des résultats du traitement des données issues des mesures *in situ* de la température et des déflexions, ainsi que l'analyse des résultats ;
- ✓ Une conclusion sur les principaux résultats, les recommandations et les perspectives de ce travail.

## **2 PRÉSENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL**

Le Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics (L.N.B.T.P) est né du décret n° 68-223/PRES/MTP du 13 septembre 1968 et transformé en société d'état par décret n° 94-420/PRES/MIC/MTPHU du 23 novembre 1994. Il œuvre dans le secteur du bâtiment et travaux publics. Il a son siège à Ouagadougou et dispose d'une délégation régionale à Bobo-Dioulasso. Son accord est requis sur la qualité des matériaux, leur mise en œuvre, et sur tous les problèmes où la nature et le mode d'emploi des matériaux peuvent conditionner la stabilité ou la tenue des ouvrages construits par les organismes publics, les entreprises privées ou publiques. La mission principale est l'étude des matériaux entrant dans la construction. Le LNBTP est un laboratoire où on peut réaliser la recherche fondamentale et appliquée. (Décision N°10-033/LNBTP/CA).

Ses ressources humaines sont constituées de 120 salariés permanents et de temporaires recrutés en cas de besoin. Son chiffre d'affaires est d'environ deux (02) milliards de francs CFA.

Dans la recherche de la satisfaction du client et de la performance de l'entreprise par la qualité, la structure dispose en son sein une division de contrôle interne et un comité qualité et recherche. Concernant sa démarche de responsabilité sociétale, l'entreprise accueille et coordonne l'encadrement des stagiaires à travers le comité qualité et recherche en relation avec les départements techniques.

Le présent stage se passe dans le département de géotechnique routière comprenant un secrétariat, une division études et essais géotechniques de laboratoire chargée de la programmation, de la mise en œuvre des activités d'études géotechniques et des essais de laboratoire conformément aux stipulations contractuelles et méthodes d'essais normalisées spécifiées et une division contrôles géotechniques chargée de la programmation et de la mise en œuvre des activités de contrôles géotechniques conformément aux stipulations contractuelles et méthodes d'essais normalisées spécifiées.

La division études et essais géotechniques de laboratoire (DEEG) comprend cinq (05) sections d'essais.

## **3 MATÉRIELS ET MÉTHODE**

### **3.1 SITE EXPÉRIMENTAL**

#### ***3.1.1 Bref historique***

Il ressort du Rapport final de surveillance des travaux d'entretien périodique et de resurfaçage de la RN01 : Tronçon Ouagadougou – Boromo (2001) [archives de la Direction Générale des Routes] que la section Ouagadougou – Sankoinse (50 km) a été construite en 1978 et est constitué de :

- ✓ un revêtement en enduit superficiel bicouche ;
- ✓ un corps de chaussée constitué de 40 cm en grave latéritique naturelle.

Après l'achèvement des travaux de construction, la chaussée constituée de deux voies s'est rapidement dégradée sur la majeure partie du trajet, puisque aucune mesure significative d'entretien régulier n'avait été prise.

Des travaux de réhabilitation entre fin 1999 et juillet 2000 avaient été exécutés et la chaussée étaient constituée de :

- ✓ une fondation de 20 cm obtenue après recyclage du revêtement et de l'ancienne couche de base ;
- ✓ une couche de base de 15 à 20 cm d'épaisseur en grave latéritique tout-venant ;
- ✓ un revêtement en béton bitumineux de 4 cm afin d'améliorer le confort des usagers.

La construction de la contre allée est un additif au projet.

#### ***3.1.2 Localisation***

La présente étude se déroule sur le chantier du projet «Travaux de construction et de bitumage de l'interconnexion des routes nationales RN01 et RN04» lot 1 (tronçon RN01) long de 7316,47 m. Ce projet est situé à la sortie ouest de la ville de Ouagadougou dans l'arrondissement de Boulmiougou sur la route nationale n°1.

Les sites sont localisés respectivement au profil 218 de la section 1 sur une portion de la contre allée sud pour l'étude de la grave bitume et au profil 74 de la section 3 sur la voie droite de la RN01 (sens Ouagadougou-Bobo Dioulasso) pour l'étude du béton bitumineux

(Photo 3-1). Les sections de route en étude sont larges respectivement de 5 m sur la contre allée sud et de 7 m sur la voie droite de la RN01.



Photo 3-1: Localisation des sites expérimentaux (Source image : Google earth / Tangou)

### **3.1.3 Ancienne structure**

D'après le Rapport d'Etude Géotechnique (2007) dudit projet les sondages sur chaussée ont révélé un corps de chaussée ancien au dessus d'un sol support plus ou moins hétérogène (Tableau 3-1).

Tableau.3-1: Matériaux du sol de plate forme

Profil	Profondeur cm/cm	Désignation géotechnique	CBR %
74	0/20	Grave argileuse latéritique	
	30/50	Grave argileuse latéritique	
	50/90	Argile latéritique peu graveleuse	13,6
218	0/40	Grave argileuse latéritique	
	40/60	Argile sableuse rougeâtre	
	60/100	Argile sableuse grisâtre	15

### 3.1.4 Nouvelle structure

La structure de la nouvelle chaussée est constituée d'une couche de roulement en béton bitumineux, d'une couche de base en grave bitume, d'une couche de fondation en litho-stabilisation (grave latéritique améliorée à 30% avec du concassé 0/31,5), d'une couche de forme en grave latéritique et d'un remblai au dessus d'un sol de plate forme de classe S3 (CBR<15). Les tableaux 3-2 et 3-3 présentent les caractéristiques géotechniques du graveleux latéritique des profils 74 et 218. Certains auteurs ont établi des corrélations entre le module d'élasticité et le CBR. Celle utilisée pour notre étude à savoir  $E = 5 \text{ CBR}$  est celle du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. (Les valeurs ci-dessous proviennent des rapports mensuels de contrôle géotechnique des travaux).

Tableau 3-2: Caractéristiques des matériaux du profil 74

	Epaisseur	Granularité		Limites d'Atterberg		Proctor modifié		CBR	Module = 5CBR	Coefficient de Poisson
	cm	Fines (%)	D (mm)	W <sub>L</sub>	I <sub>p</sub>	W <sub>OPM</sub> (%)	γ <sub>dOPM</sub> (t/m <sup>3</sup> )	95% OPM	MPa	
Plate forme	infini			20	8,5	8	2,15	13,6	68	0,35
Assiette terrassement	20	27,5	50	-	-	9	2,2	40	200	0,35
Couche de forme	20	14,5	50	24	10	8,3	2,22	42	210	0,35
Fondation (lithostab)	20	10	31,5	25	11	7,2	2,23	43	215	0,35

Tableau 3-3: Caractéristiques des matériaux du profil 218

	Epaisseur	Granularité		Limites d'Atterberg		Proctor modifié		CBR	Module = 5CBR	Coefficient de Poisson
	cm	Fines (%)	D (mm)	W <sub>L</sub>	I <sub>p</sub>	W <sub>OPM</sub> (%)	γ <sub>dOPM</sub> (t/m <sup>3</sup> )	95% OPM	MPa	
Plate forme	infini			30	15	9,4	2,02	15	75	0,35
Assiette terrassement	20	22	31,5	30	17	10,3	2,11	37	185	0,35
Couche de forme	20	32,5	31,5	43	22	12,5	2,03	44	220	0,35
Fondation (lithostab)	20	22	31,5	22	7	5,4	2,33	79	395	0,35

## 3.2 MATÉRIAUX D'ÉTUDE

### 3.2.1 Éléments de formulation

Deux matériaux ont été évalués pour notre étude : le béton bitumineux semi grenu 0/10 et la grave bitume 0/20. (Les valeurs ci-dessous proviennent des rapports mensuels de contrôle géotechnique des travaux).

La formulation de la grave bitume du profil 218 est la suivante :

Tableau 3-4: Formulation de la GB 0/20

	<i>Granularité</i>	<i>Dosage en %</i>
Granulats	0/4	50
	4/6	15
	6/10	10
	10/20	25
Liant	Bitume 50/70	4,7

	<i>Caractéristiques mesurées</i>	<i>Valeurs</i>
Essai Marshal	Compacité	93
	Stabilité à 60°C (daN)	1 490
	Fluage 1/10 mm	3,5
	Référence Marshal (MVR) (t/m <sup>3</sup> )	2,48
Essai Duriez	r/R (%)	84

Pour le béton bitumineux 0/10 du profil 74 la formulation retenue est la suivante :

Tableau 3-5: Formulation du BBSG 0/10

	<i>Granularité</i>	<i>Dosage en %</i>
Granulats	0/4	45
	4/6	25
	6/10	30
Liant	Bitume 50/70	5,77

	<i>Caractéristiques mesurées</i>	<i>Valeurs</i>
Essai Marshal	Compacité	98,0
	Stabilité à 60°C (daN)	2 136
	Fluage 1/10 mm	28
	Référence Marshal (t/m <sup>3</sup> )	2,435
Essai Duriez	r/R (%)	85

Les principales caractéristiques du matériau sont présentées ci-dessous :

Tableau 3-6: Caractéristiques du granulat

Caractéristiques	Valeurs
Los Angeles (NF P 18-573)	27
Micro-Deval (NF P 18-572)	9,5
Equivalent de sable (0/4) (NF P 18-598)	53,5
Module de finesse (NF P 18-540)	2,79

Les résultats d'identification du bitume de grade 50/70 sont récapitulés dans le tableau ci-après :

Tableau 3-7: Caractéristiques du liant

Caractéristiques	Unités	BBSG 0/10	GB 0/20
Indice de pénétrabilité (NF T 66-004)	x 0,1 mm	60,50	66,83
Point de ramollissement (NF T 66-008)	°C	48	47
Densité à 25°C (NF T 66-007)		1,03	1,01

Les caractéristiques mécaniques des granulats sont conformes aux spécifications du cahier de charges. Les résultats obtenus permettent de conclure que le bitume identifié est de grade 50/70. Néanmoins la pénétrabilité est forte et le point de ramollissement faible, ce qui indique que ce bitume est mou.

### ***3.2.2 Caractéristiques des enrobés mis en œuvre***

Les différents contrôles effectués à l'aide d'essais normalisés lors de l'exécution des travaux ont permis d'avoir les résultats suivants :

Tableau 3-8: Caractéristiques des enrobés mis en œuvre

Caractéristiques	Valeurs	
	74	218
Profils matériaux	BBSG 0/10	GB 0/20
Épaisseur (cm)	7,91	10
Type de bitume	50/70	50/70
Teneur en bitume	5,42	4,37
Module de richesse	3,28	2,69
% de vide	5,10	10,50
Masse volumique in situ (t/m <sup>3</sup> )	2,31	2,23
Masse volumique apparente (t/m <sup>3</sup> )	2,33	2,33
Stabilité Marshal à 60°C (daN)	2 097,33	2 421
Fluage Marshal 1/10 mm	22,66	20,33
Compacité (%)	94,90	89,50
Coefficient de Poisson	0,35	0,35

Après mise en œuvre, on note que les performances mécaniques des enrobés comparées à celles de la formulation sont insuffisantes. Les compacités de la GB 0/20 et du BB 0/10 sont inférieures aux valeurs obtenues pendant la formulation. L'épaisseur trouvée sur la carotte de la couche du béton bitumineux montre une surépaisseur au lieu des 5 cm prévue parce qu'il fallait rattraper les irrégularités de la surface de la couche de base à certain endroit.

### **3.3 ÉTUDE EXPÉRIMENTALE**

L'étude des propriétés mécaniques des deux enrobés comporte trois phases :

- ✓ Premièrement, une phase dont le but est d'établir la courbe d'évolution des températures journalières. A partir des mesures de température réalisées sur deux périodes à savoir les 09 et 10 mars 2011 sur la grave bitume d'une part et les 23 et 24 mars 2011 sur le béton bitumineux d'autre part, les températures minimales (T<sub>min</sub>) et maximales (T<sub>max</sub>) ont été déterminées.
- ✓ Deuxièmement, une phase comprenant une première partie dont l'objectif est la mesure des déflexions à l'aide de la poutre de Benkelman à certaines heures de la journée. Et une deuxième partie consistant en la transformation par calcul itératif dans le logiciel ALIZE des déflexions en modules élastiques.
- ✓ Enfin une dernière phase dont la finalité est l'établissement d'un modèle mathématique devant prédire l'évolution du module élastique en fonction des paramètres de l'étude pour chaque matériau par la méthode du plan d'expérience.

Cette étude est basée sur la méthode des plans d'expériences (annexe 1) qui est la liste de combinaisons de facteurs pour lesquels la réponse du modèle doit être observée.

L'objectif principal de la méthode est de réduire au minimum le nombre d'essais expérimentaux. Le plan statistique permet de manipuler plusieurs facteurs simultanément durant les essais, de faire varier plusieurs facteurs d'un essai à l'autre, de faire varier chaque facteur avec un petit nombre de modalités et donc de réduire l'erreur expérimentale à sa valeur la plus faible possible.

Trois facteurs à deux niveaux chacun ont été utilisés pour la réalisation de notre étude à savoir les coordonnées spatiales X, Y et la sollicitation thermique T (Figure 3-1).

### **3.3.1 Les facteurs**

La variable X correspond à la largeur du dispositif expérimental mesurée dans le sens transversal de la route. Elle est exprimée en mètre et varie entre -1,25 et +1,25.

La variable Y correspond à la longueur du dispositif expérimental mesurée dans le sens longitudinal de la route. Elle est exprimée en mètre et varie entre -5 et +5.

La variable T correspond à la température mesurée dans la chaussée. Elle est exprimée en degré Celsius et varie entre 27°C et 36°C pour l'étude de la grave bitume et entre 29°C et 38°C pour le béton bitumineux.

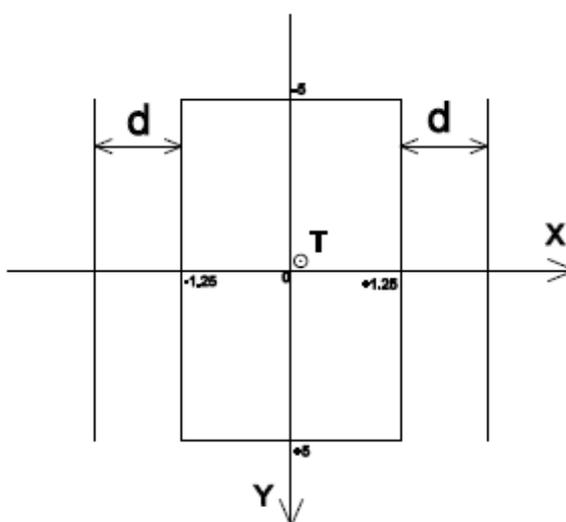


Figure 3-1: Vue en plan du domaine expérimental

Tous les facteurs sont quantitatifs et seule la variable température (T) est non contrôlée. Elle est évaluée dans un premier temps à différentes périodes de la journée. Une fois, le minimum et le maximum déterminés, la température pourra être fixée et les mesures de déflexion seront réalisées aux heures de la journée correspondantes.

La largeur de la route n'étant pas infinie l'expérience se déroule sur un rectangle de 10 m de long mesuré dans le sens longitudinal de la chaussée (Y) et de 2,5 m de large mesuré dans le sens transversal de la route (X). La largeur de 2,5 m a été retenue pour maintenir les points expérimentaux suffisamment éloignés des bords de chaussée où la perte de chaleur est importante. La distance d mesurée dans le sens transversal entre le rectangle et le bord route est 2,25 m au profil 74 et 1,25 m au profil 218.

Etant donné que la température a un minimum et un maximum journalier, la température minimale a été choisie en tenant compte de l'heure effective du début des travaux dans l'entreprise (9 heures). Les températures maximales des matériaux ayant été enregistrées à 14h au mois de mars qui fait partie des mois de chaleur au Burkina Faso, le niveau supérieur du domaine expérimental sera choisi délibérément à une température légèrement inférieure à cette température maximale, celle-ci ne pouvant être constamment atteinte à toute période de l'année (environ  $-2^{\circ}\text{C}$  par rapport à la température maximale).

Après évaluation des contraintes imposées, les points expérimentaux sont les suivants :

### **Grave bitume**

Tableau 3-9: Points expérimentaux de la grave bitume 0/20

Facteur	Variables réelles			Variables codées		
	Niveau inférieur	Niveau central	Niveau supérieur	Niveau inférieur	Niveau central	Niveau supérieur
Température T	27	31,5	36	-1	0	1
Coordonnée X	-1,25	0	1,25	-1	0	1
Coordonnée Y	-5	0	5	-1	0	1

### **Béton bitumineux**

Tableau 3-10: Points expérimentaux du béton bitumineux 0/10

	Variables réelles	Variables codées
--	-------------------	------------------

Facteurs	Niveau inférieur	Niveau central	Niveau supérieur	Niveau inférieur	Niveau central	Niveau supérieur
Température T	29	33,5	38	-1	0	1
Coordonnée X	-1,25	0	1,25	-1	0	1
Coordonnée Y	-5	0	5	-1	0	1

En définitive le domaine expérimental est un cube et les points expérimentaux sont les sommets du cube (Figure 3-2).

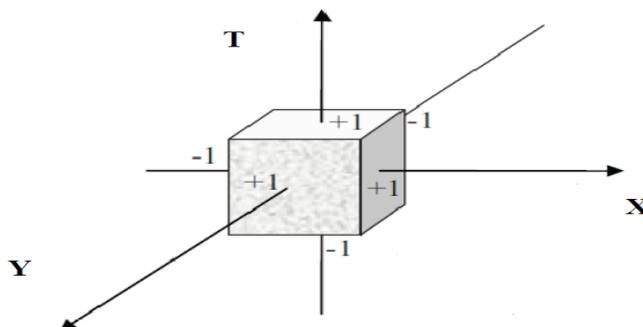


Figure 3-2: Perspective du domaine expérimental (Plans d'expériences)

### 3.3.2 Variable de réponse

La variable de réponse utilisée pour la construction de notre modèle est le module élastique E de l'enrobé obtenu à chaque point expérimental par transformation de la déflexion en module. Elle est exprimée en méga Pascal.

### 3.3.3 Modèle statistique

Pour notre étude, nous avons construit un plan factoriel complet du premier ordre en nous basant sur les modèles de Box (2005) et les extraits de cours de LAMURE avec huit essais aux sommets du domaine expérimental et six essais répétitifs au centre du domaine pour exprimer la réponse E en fonction des paramètres X, Y, T et des coefficients  $\beta$ .

La matrice des effets en fonction des variables codées de la grave bitume est représentée en annexe 2 et celle du béton bitumineux en annexe 3.

L'écriture du modèle est de la forme :

$$E = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 Y + \beta_3 T + \beta_{12} XY + \beta_{13} XT + \beta_{23} YT + \beta_{123} XYT \quad (1)$$

## **3.4 PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES ET TRAITEMENT DES DONNÉES**

### ***3.4.1 Planning des expériences***

Les mesures de température ont eu lieu les 09 et 10 mars 2011 pour l'étude de la grave bitume et les 23 et 24 mars 2011 pour le béton bitume.

Six jours ont été nécessaires pour réaliser les six essais au centre parce qu'ils ne peuvent être réalisés en même temps. Les mesures sur la grave bitume se sont déroulées du 11 au 17 mars 2011 et sur le béton bitume du 26 mars au 05 avril 2011. Les essais aux sommets du rectangle et au centre (voir figure 3-3) ont commencé le même jour à des heures correspondantes aux températures ci-dessous mentionnées. Le programme des essais au cours d'une journée est le suivant :

#### **✓ *Grave bitume***

- 27°C : mesurée à 10 h 30 mn : première série de mesure de déflexion aux sommets 1, 2, 3 et 4 du rectangle.
- 31,5°C : mesurée à 11 h 38 mn : mesure de déflexion au centre 0 du rectangle.
- 36°C : mesurée à 13 h 30 mn : deuxième série de mesure de déflexion aux sommets 5, 6, 7, et 8 du rectangle.

#### **✓ *Béton bitumineux***

- 29°C : mesurée à 10 h 15 mn : première série de mesure de déflexion aux sommets 1, 2, 3, et 4 du rectangle.
- 33,5°C : mesurée à 11 h 22 mn : mesure de déflexion au centre 0 du rectangle.
- 38°C mesurée à 13 h 00 mn : deuxième série de mesure de déflexion aux sommets 5, 6, 7, et 8 du rectangle.

Les essais aux sommets du rectangle se sont déroulés pendant quatre jours et ceux au centre pendant six jours.

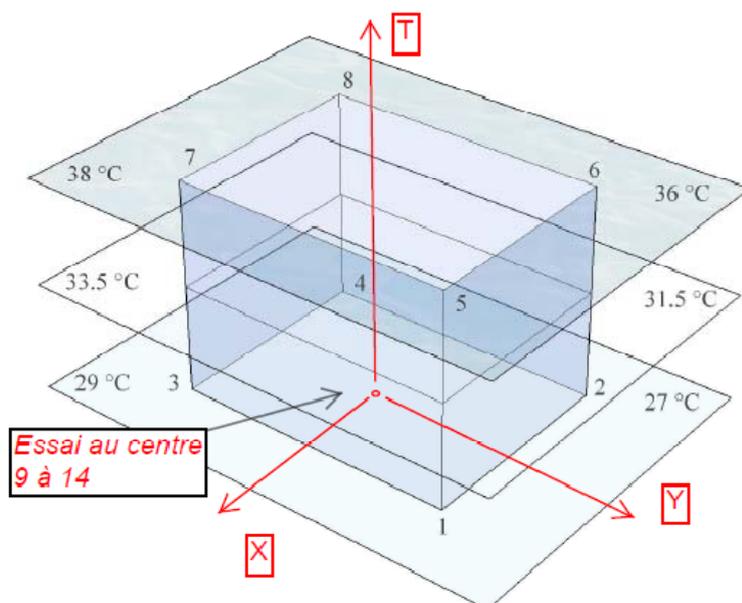


Figure.3-3: Représentation des points expérimentaux

### 3.4.2 Essais réalisés

Les essais se déroulent en deux temps. On réalise d'abord la mesure de la température pendant deux jours pour avoir la courbe d'évolution journalière de celle-ci. Ensuite, dans le but de déterminer un module fiable, il est nécessaire d'effectuer plusieurs mesures de déflexion à différentes positions le long d'une chaussée ayant des épaisseurs uniformes (Uzan et al., 1989). Ces mesures sont effectuées à des heures déterminées de la journée qui correspondent aux températures préalablement fixées pour l'étude à des points spécifiques du domaine expérimental. Les données obtenues des mesures *in situ* sont utilisées pour valider ou développer des modèles théoriques (Arraigada, Partl, Angelone, & Martinez, in press).

#### 3.4.2.1 Mesure de la température

Cet essai est fait selon la norme NF P 98 – 150.

Les mesures de température se sont déroulées en deux périodes à savoir les 09 et 10 mars 2011 pour l'étude de la grave bitume et les 23 et 24 mars 2011 pour le béton bitumineux

L'essai consiste à mesurer la température de l'enrobé en plongeant un thermomètre à sonde dans des orifices de 10 cm et 5 cm de profondeur réalisés respectivement sur les revêtements en grave bitume et en béton bitumineux. L'unité de mesure est le degré Celsius (°C)



Photo 3-2: Thermomètre à sonde

### **3.4.2.2 Mesure de déflexion**

Cet essai est fait selon les normes NF P 98 – 200 - 1 et NF P 98 – 200 - 2.

1- Définition : La déflexion est la déformation verticale en un point d'une chaussée, engendrée par le passage d'une charge. L'unité de mesure est le centième de millimètre.

2- Principe : La mesure consiste à fixer ou à poser au point de la chaussée à mesurer un capteur destiné à mesurer un déplacement vertical en ce point. On approche progressivement du capteur une charge roulante qui, à un moment donné, passe à proximité immédiate de celui-ci, puis s'en éloigne. La charge mobile induit un bassin de déflexion. La surface de cette zone et sa profondeur (amplitude) sont fonction du type et de l'état de la structure ainsi que de la valeur de la charge.

3- Moyens nécessaires : 1 poutre de Benkelman, 1 camion chargé à 13 tonnes à l'essieu arrière dont les pneus sont gonflés à 7 bars.



Photo 3-3: Poutre de Benkelman

### **3.4.3 Traitement des données**

#### **3.4.3.1 Températures**

Les données de température ont été analysées avec le tableur Excel (Liengme, 2008). La comparaison des relevés de température mesurés *in situ* pendant deux jours a été faite en utilisant un test de student par paire. La comparaison entre « t-student expérimental » et « t-student critique » permettant de rejeter l'hypothèse nulle à savoir les températures mesurées durant deux jours sont identiques.

#### **3.4.3.2 Détermination des modules élastiques**

Sur la base des déflexions mesurées *in situ*, les modules élastiques correspondant aux points de mesure de chaque enrobé ont été calculés avec le logiciel ALIZÉ. Pour atteindre cet objectif, le calcul inverse nécessitait les paramètres d'entrée suivant :

- ✓ l'épaisseur des différentes couches ;
- ✓ les modules élastiques des couches inférieures ;
- ✓ leur coefficient de Poisson (voir tableaux 3-2, 3-3 et 3-8) ;
- ✓ les conditions d'adhérence entre les couches (considéré collées les unes aux autres) ;
- ✓ les caractéristiques de la charge appliquée (jumelage standard français) ;
- ✓ une valeur approchée du module élastique de l'enrobé (pour lancer le calcul itératif).

Les valeurs approchées de module correspondant à une température donnée utilisées pour chaque matériau sont ceux du logiciel ALIZÉ. A partir du logiciel ALIZÉ, on recherche par

approximation successive la valeur du module de l'enrobé dont l'épaisseur de la couche, et la déflexion avec les mêmes conditions de chargement que celle calculée sont connues (Gorski, 2000). Comparaison des valeurs de déflexions mesurées et calculées. Les coefficients du modèle et les surfaces de réponse sont obtenus à l'aide d'une régression multiple exécutée dans Excel.

Le modèle mathématique est considéré satisfaisant si les trois conditions suivantes sont vérifiées :

$F_{reg/res}$  doit être environ 4 fois supérieur au facteur de Fisher  $F(\alpha, p-1, N-p)$  ;

$F_{A/E}$  doit être faible par rapport au facteur de Fisher  $F(\alpha, n-p, N-n)$  ;

Le coefficient de détermination  $R^2 = \frac{\sum REG2}{\sum TOT2}$  doit être proche de 1. Avec :

$\alpha$  : seuil du risque (5%) ;

$p$  : nombre de coefficients du plan (8) ;

$N$  : nombre total d'essais (14) ;

$n$  : nombre de points du plan (9) ;

$\sum REG2$  : Somme des carrés de régression ;

$\sum TOT2$  : Somme des carrés totaux.

Le logiciel ALIZÉ utilisé dans notre étude présente des insuffisances liées aux caractéristiques des matériaux et aux conditions de collage des interfaces.

En effets les caractéristiques mécaniques des matériaux du logiciel ne correspondent pas aux réalités climatiques des pays tropicaux. Les interfaces supposées parfaitement collées ne le sont réellement pas. Sur chantier après répandage du liant de la couche d'accrochage généralement fait à la lance, on constate que la couche de liant n'est jamais uniforme sur la chaussée.

## 4 RÉSULTATS / INTERPRÉTATIONS

### 4.1 RESULTATS

#### 4.1.1 Température

Les données issues du test de Student des relevés des températures des annexes 4 et 5 sont regroupées dans le tableau ci-après :

Tableau 4-1: Données traitement températures

N° mesure	Dates de mesure	Ecart-type	Ecart-type relatif (%)	Température moyenne	t <sub>0</sub> (expérimental)	t <sub>stat</sub> 95%	Intervalle de confiance à 95%	P-value (%)
N1 (GB 0/20)	09/03/2011	6,40	20,68	30,90	0,06	2,03	0,66	47,50
N2 (GB 0/20)	10/03/2011	6,44	20,91	30,80				
N3(BBSG 0/10)	23/03/2011	6,88	20,76	33,20	0,02	2,03	0,70	49,05
N4 (BBSG 0/10)	24/03/2011	6,67	20,16	33,10				

Les courbes d'évolution des températures journalières en plus des données issues de l'annexe 6 sont représentées sur le graphique ci-dessous :

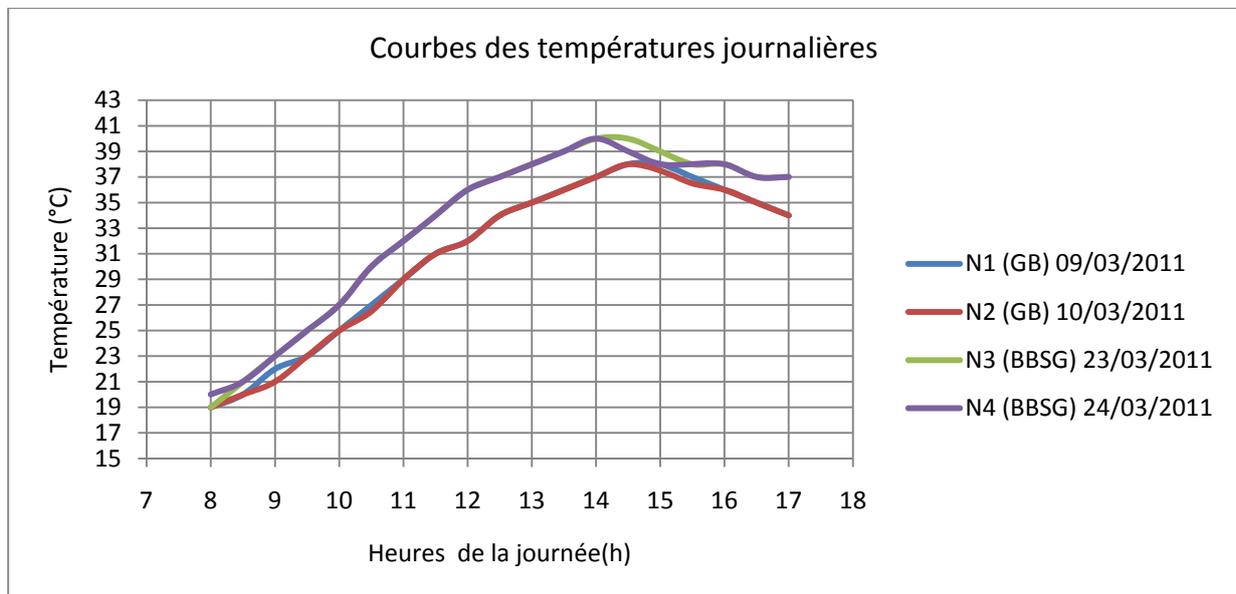


Figure 4-1: Courbes des températures journalières

## 4.1.2 Grave bitume

### 4.1.2.1 Synthèses des mesures in situ

Les déflexions mesurées sur la couche de grave bitume du profil 218 sont présentées en annexe 6 et le tableau 4-2 ci-dessous synthétise l'évolution des déflexions entre points homologues sur la grave bitume.

Tableau 4-2: Evolution des déflexions sur la grave bitume 0/20

Grave bitume	N° point	Températures (°C)	Déflexions moyennes (1/100 mm)	Variations (%)
Points homologues	1	27	55	5,45
	5	36	58	
	2	27	55	5,45
	6	36	58	
	3	27	55	5,45
	7	36	58	
	4	27	54	9,26
	8	36	59	

La figure 4-2 ci-dessous présente la variation des déflexions mesurées sur la grave bitume aux températures de 27°C et 36°C.

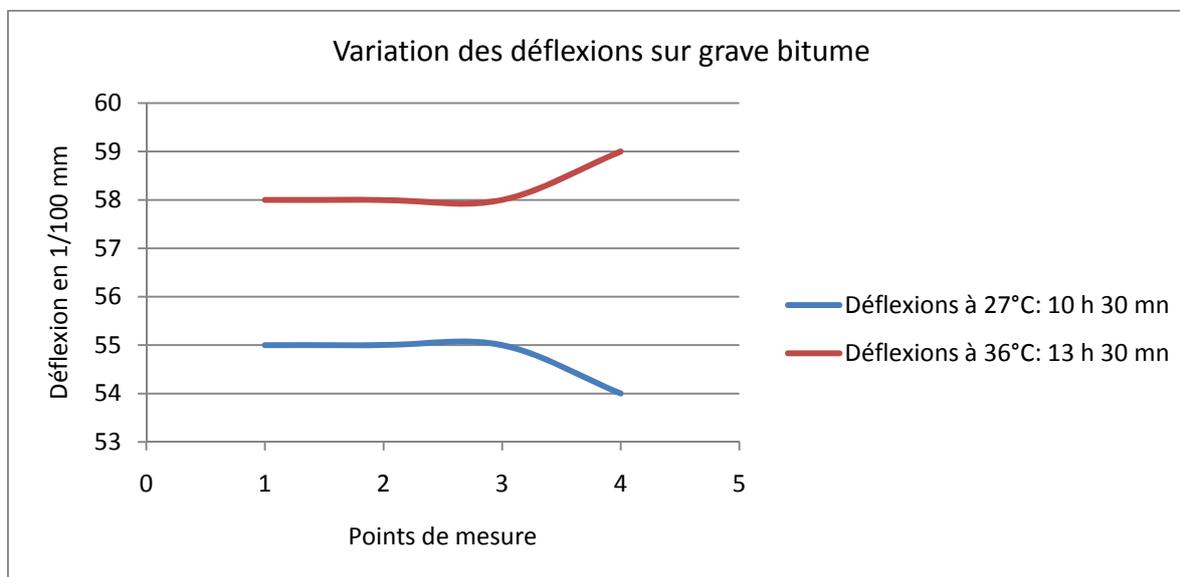


Figure 4-2: Variation des déflexions sur la grave bitume

Le tableau 4-3 ci-dessous représente les correspondances déflexion – module de la grave bitume. Les effets du plan d'expérience sont synthétisés en annexe 7 où figurent les bassins de déflexion et les modules élastiques obtenus par calcul dans le logiciel ALIZÉ.

Tableau 4-3: Correspondance déflexion – module de la grave bitume

N° essai	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Déflexion (1/100 mm)	55	55	55	54	58	58	58	59	56	56	56	56	57	57
E (MPa)	3905	3905	3905	4862	1830	1830	1830	1369	3139	3139	3139	3139	2461	2461

#### 4.1.2.2 Détermination des coefficients du modèle $\beta_i$

Les coefficients du modèle sont obtenus à l'aide d'une régression multiple exécutée dans Excel. Les coefficients  $\beta_i$ , leur incertitude et les valeurs significatives sont représentés ci-dessous :

Tableau 4-4: Coefficients de la grave bitume

Valeurs		Incertitudes		P-value (%)
$\beta_0$	2 914	$\sigma (\beta_0)$	78	0,00
$\beta_1$	62	$\sigma (\beta_1)$	104	100,00
$\beta_2$	62	$\sigma (\beta_2)$	104	100,00
$\beta_3$	-1 215	$\sigma (\beta_3)$	103	0,00
$\beta_{12}$	62	$\sigma (\beta_{12})$	104	100,00
$\beta_{13}$	-177	$\sigma (\beta_{13})$	104	11,07
$\beta_{23}$	-177	$\sigma (\beta_{23})$	104	11,07
$\beta_{123}$	-177	$\sigma (\beta_{123})$	104	11,07

Les coefficients retenus sont ceux dont la valeur est supérieure à l'incertitude et la probabilité critique (P-value) inférieure à 5%. Le modèle complet réduit avec les effets principaux et les interactions s'écrit :

$$E_{GB} = 2\,914(\pm 78) - 1\,215(\pm 103)T \quad (2)$$

### 4.1.2.3 Validation du modèle

Les ratios  $F_{reg/res}$ ,  $F_{A/E}$ , et  $R^2$  du modèle ont été calculés et les résultats sont synthétisés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4-5: Ratios de la grave bitume

SS	612 912,0	286 264,4	514 821,5	12 750 242,0	13 265 063,4
DF	5	1	6	7	13
	MSE	MSa	MSres	MSreg	MStot
MS= $\sigma^2$	122 582,4	286 264,4	85 803,6	1 821 463,1	1 020 389,5
Fo		2,3		21,2	
F Fisher		6,6		4,2	
$R^2$		0,9612			

### 4.1.3 Béton bitumineux

#### 4.1.3.1 Synthèses des mesures in situ

Les résultats de la campagne de mesure des déflexions sur la couche de béton bitumineux du profil 74 sont présentés en annexe 8 et le tableau 4-6 ci-dessous récapitule l'évolution des déflexions entre points homologues sur le béton bitumineux.

Tableau 4-6: Evolution des déflexions sur le béton bitumineux

Béton bitumineux	N° point	Températures (°C)	Déflexions moyennes (1/100 mm)	Variations (%)
Points homologues	1	29	55	7,27
	5	38	59	
	2	29	55	7,27
	6	38	59	
	3	29	55	7,27
	7	38	59	
	4	29	54	11,11
	8	38	60	

La figure 4-3 ci-dessous présente la variation des déflexions mesurées sur le béton bitumineux aux températures de 29°C et 38°C.

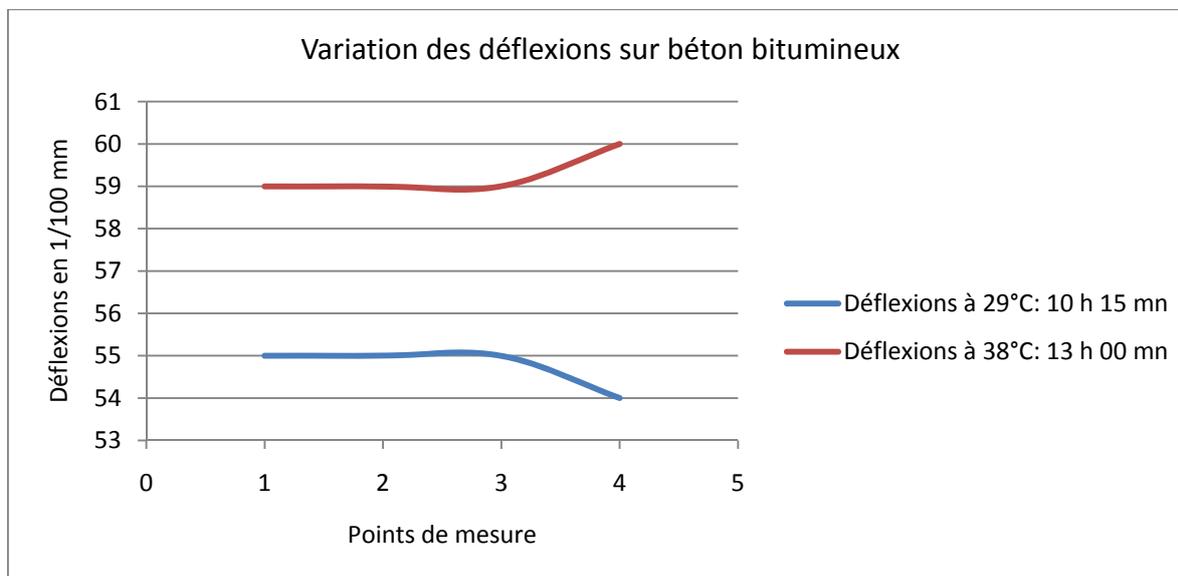


Figure 4-3: Variation des déflexions sur le béton bitumineux

Les correspondances déflexion – module du béton bitumineux sont représentées dans le tableau 4-7 ci-dessous et l'ensemble des résultats présentés en annexe 9 où figurent les bassins de déflexion et les modules élastiques obtenus par calcul dans le logiciel ALIZÉ.

Tableau 4-7: Correspondance déflexion – module du béton bitumineux

N° essai	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Déflexion (1/100 mm)	55	55	55	54	59	59	59	60	56,5	56,5	57	57	57	57
E (MPa)	1632	1632	1632	1380	1380	1380	1380	1050	1614	1614	1456	1456	1456	1456

#### 4.1.3.2 Détermination des coefficients du modèle $\beta_i$

Les coefficients du modèle sont obtenus à l'aide d'une régression multiple exécutée dans Excel. Les coefficients  $\beta_i$ , leur incertitude et les valeurs significatives sont représentés ci-dessous :

Tableau 4-8: Coefficients béton bitumineux

Valeurs		Incertitudes		P-value (%)
$\beta_0$	1 510	$\sigma(\beta_0)$	17	0,00
$\beta_1$	12	$\sigma(\beta_1)$	23	100,00
$\beta_2$	12	$\sigma(\beta_2)$	23	100,00
$\beta_3$	-222	$\sigma(\beta_3)$	23	0,00
$\beta_{12}$	12	$\sigma(\beta_{12})$	23	100,00
$\beta_{13}$	-94	$\sigma(\beta_{13})$	23	0,12
$\beta_{23}$	-94	$\sigma(\beta_{23})$	23	0,12
$\beta_{123}$	-94	$\sigma(\beta_{123})$	23	0,12

Nous ne retenons que les effets dont le coefficient est supérieur à son incertitude et la probabilité critique (P-value) inférieure à 5% comme significatif. Le modèle complet réduit avec les effets principaux et les interactions s'écrit :

$$E_{BB} = 1\,510(\pm 17) - 222(\pm 23)T - 94(\pm 23)XT - 94(\pm 23)YT - 94(\pm 23)XYT \quad (3)$$

#### 4.1.3.3 Validation du modèle

Les ratios  $F_{\text{reg/res}}$ ,  $F_{A/E}$ , et  $R^2$  du modèle ont été calculés et les résultats sont synthétisés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4-9: Ratios béton bitumineux

SS	33 285,3	9 916,2	25 297,7	612 858,0	638 155,7
DF	5	1	6	7	13
	MSE	MSa	MSres	MSreg	MStot
MS= $\sigma^2$	6 657,1	9 916,2	4 216,3	87 551,1	49 088,9
Fo		1,5		20,8	
F Fisher		6,6		4,2	
$R^2$		0,9604			

## **4.2 INTERPRÉTATIONS**

### **4.2.1 Température**

La figure 4-1 montre les courbes d'évolution des températures journalières relevées avant le début de l'étude de chaque matériau. Les couples de courbes (N1, N2) et (N3, N4) représentent respectivement les températures mesurées pour l'étude de la grave bitume et le béton bitumineux. Les températures maximales observées durant ces périodes sont respectivement 38°C et 40°C pour chacun des enrobés suscités. La différence de température pour les mêmes heures de la journée pour les deux périodes de mesure est d'environ 2°C. Puisque les températures n'ont pas été mesurées à la même date on attribue cette différence non pas aux matériaux mais à la température ambiante. Les données représentées dans le tableau 4-1 montrent que pour chaque couple de courbes (N1, N2) et (N3, N4), la valeur de « *t<sub>o</sub> expérimental* » est inférieure à « *t<sub>stat95%</sub>* » ce qui prouve que l'hypothèse nulle : « *les températures mesurées durant deux jours sont identiques* » ne peut être rejetée. Les températures correspondantes à chaque couple de courbes sont identiques. Une dispersion de l'ordre de 20% est observée pour chaque série de mesure. La température minimale pour les deux périodes de mesure est de 19°C. Les températures de début de mesure des déflexions sont fixées à 27°C (10h 30mn) pour la grave bitume et à 29°C (10h 15mn) pour le béton bitumineux. Les températures moyennes de chaque série de mesure sont du même ordre de grandeur que les températures au centre du domaine expérimental du matériau correspondant (grave bitume : 31,5°C, béton bitumineux : 33,5°C). Après dépouillement des températures relevées à la station météorologique de l'aéroport de Ouagadougou entre les années 1979 et 2008, il ressort que la température maximale observée dans cette période (40,2 °C) est du même ordre de grandeur que la température maximale relevée lors de la campagne pour l'étude. La température maximale du domaine expérimental de chaque enrobé est inférieure à la température moyenne maximale du mois de mars (38,6°C) entre 1979 et 2008. La température moyenne maximale annuelle relevée entre 1979 et 2008 est 35,2 °C (Annexe 10).

### **4.2.2 Déflexions**

L'analyse des données des tableaux des annexes 6 et 8 montre que les déflexions mesurées sur un même point pendant 4 jours au sommet du domaine expérimental et pendant six jours en son centre varient peu. Pour chacun des couples de points homologues (1 ; 5), (2 ; 6), (3 ; 7), et (4 ; 8) de la figure 3-3, les résultats des tableaux 4-2 et 4-6 montrent que les déflexions mesurées au niveau bas du domaine expérimental sont inférieures à celles mesurées au niveau

haut pour chacun des matériaux étudiés (Voir figures 4-2 et 4-3). Ces résultats concordent avec les travaux de Van Geem et *al* (2009) qui ont montré que la déflexion sous une même charge sur un même revêtement (bitumineux) varie avec la température. En somme, quand la température augmente la déflexion augmente. Les augmentations de déflexion entre les points homologues sont : 5,45% et 9,26% pour la grave bitume d'une part, 7,27% et 11,11% pour le béton bitumineux d'autre part. Aucune déflexion mesurée n'est supérieure à 60/100<sup>e</sup> mm.

### **4.2.3 Grave bitume**

Les résultats issus de l'analyse des variances de l'étude de la grave bitume sont regroupés dans les tableaux 4-3, 4-4 et 4-5. Sur la base du risque  $\alpha$  de 5%, seuls les effets des facteurs ayant une probabilité critique inférieure à 5% ont un effet sur le module E de cet enrobé bitumineux. Le modèle complet réduit avec les effets principaux et les interactions s'écrit :

$$E_{GB} = 2\,914(\pm 78) - 1\,215(\pm 103)T \quad (2)$$

Seule la température a un effet significatif sur le module. Le module de la grave bitume est indépendant des coordonnées spatiales de la mesure. L'analyse des termes influents inclue : la température et les interactions.

#### **4.2.3.1 Température**

Seule la température a un effet significatif sur le module de la grave bitume. Pour une température donnée, le module est constant en tout point de la chaussée dans le domaine expérimental. La relation entre le module et la température est linéaire avec un coefficient négatif, ce qui signifie que lorsque la température diminue la rigidité de l'enrobé augmente. Ce résultat est en accord avec les précédentes recherches (Di Benedetto, 1998). Cette évolution du module est possible parce que l'enrobé est un matériau thermo susceptible, caractéristique liée à la présence du liant dont les propriétés mécaniques dépendent fortement de la température. De plus sur la figure 4-4, la surface de réponse décroît linéairement en fonction de la température. Pour des basses températures, la rigidité est élevée et inversement à haute température, la rigidité chute fortement. Pour ces hautes températures, l'enrobé présente une augmentation des déformations permanentes (Huet, 1963, Dongmo-Engeland, 2005). Sur l'ensemble du domaine expérimental lorsque la température augmente de 1°C, les diminutions de module varient de 5,88% à 12,51%. Ces valeurs élevées sont dues à un défaut de compactage et au grade du bitume. La compacité après mise en œuvre est de 89,5% (correspondant à 96% de la compacité donnée par la formulation). Ces résultats sont en

accord avec les travaux de Grimaux (1977) qui ont montré que la diminution de la stabilité avec la compacité est très nette.

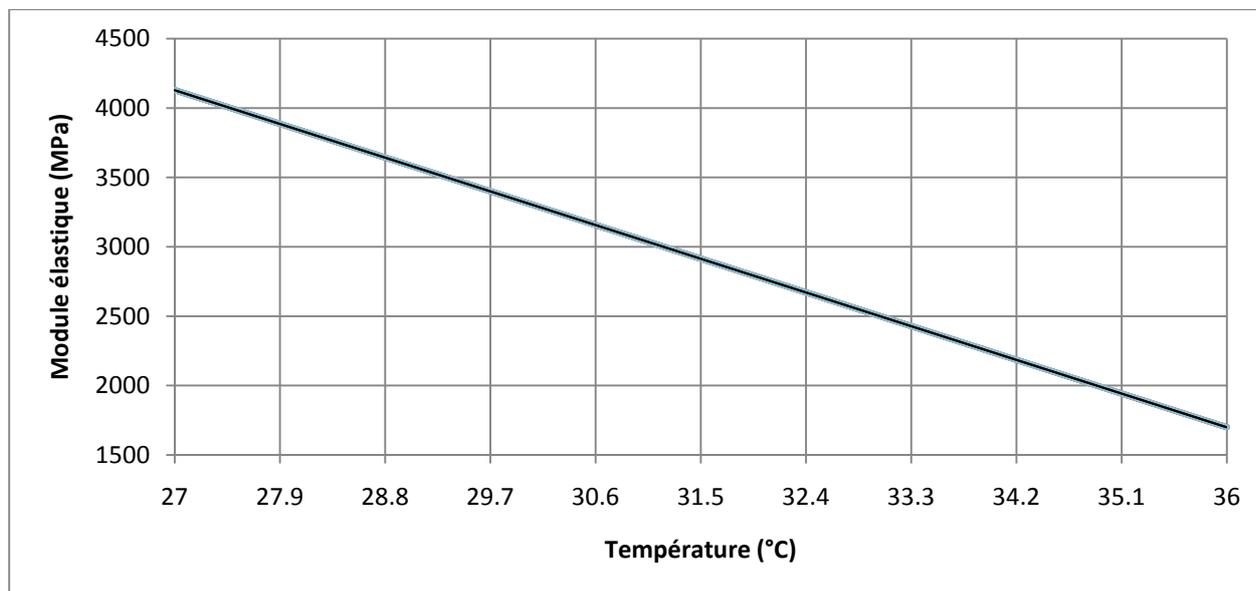


Figure 4-4: Courbe iso réponse du module  $E=f(T)$  de la GB 0/20

#### **4.2.3.2 Les interactions**

La non apparition des coordonnées spatiales X et Y dans l'équation du modèle serait due à l'homogénéité de la distribution dimensionnelle des granulats dans la matrice de l'enrobe dans le domaine expérimental.

#### **4.2.3.3 Validation du modèle**

De l'analyse des résultats du tableau 4-5 il ressort que :

Le ratio  $F_{A/E} = 2,335$  est inférieur au facteur de Fisher  $F_{(0,05; 1,5)} = 6,607$ , ce qui signifie que l'ajustement du modèle par rapport à l'expérience est correct et que la régression est adéquate.

La valeur du ratio  $F_{Reg/Res} = 21,228$  est plus de 4 fois supérieur au facteur de Fisher  $F_{(0,05; 7,6)} = 4,206$ . L'ensemble des facteurs testés est statistiquement significatif au seuil  $\alpha$  de 5%.

Le coefficient de détermination  $R^2$  est supérieur à 95% ce qui signifie que le modèle exprime plus de 96% de la variabilité totale (figure 4-5 ci-dessous).

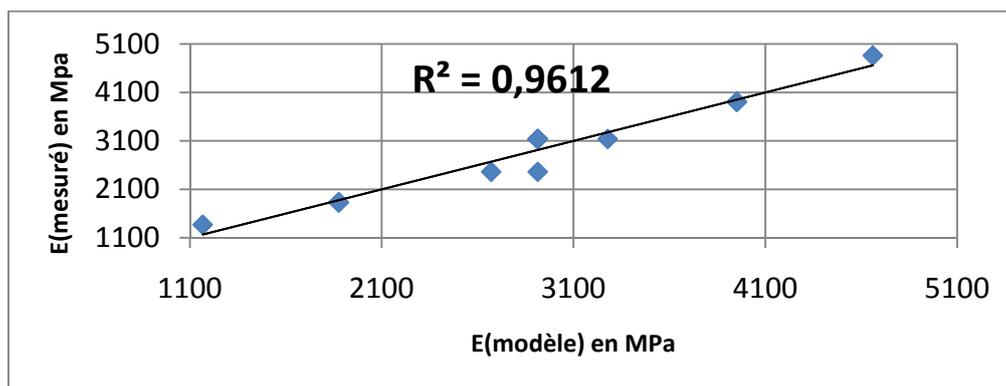


Figure 4-5: Dispersion des résultats de mesure par rapport au modèle (GB 0/20)

On remarque une dispersion homogène rapprochée de la droite de référence qui représente le modèle établi.

Sur la base de ces trois conditions, le modèle du 1<sup>er</sup> degré représenté par l'équation (2) est déclaré valide sur le domaine expérimental.

#### **4.2.4 Béton bitumineux**

Les résultats issus de l'analyse des variances de l'étude du béton bitumineux sont regroupés dans les tableaux 4-7, 4-8 et 4-9. Sur la base du risque  $\alpha$  de 5%, seuls les effets des facteurs ayant une probabilité critique inférieure à 0,05 ont un effet sur le module E de l'enrobé. Le modèle complet réduit avec les effets principaux et les interactions s'écrit :

$$E_{BB} = 1\,510(\pm 17) - 222(\pm 23)T - 94(\pm 23)XT - 94(\pm 23)YT - 94(\pm 23)XYT \quad (3)$$

Ce modèle est relativement plus complexe que celui de la grave bitume. Tous les termes contenant la température sont significatifs. Les coordonnées spatiales n'agissent pas indépendamment sur le module. L'analyse des termes influents inclue : la température et les interactions.

##### **4.2.4.1 Température**

La température est le facteur le plus important affectant le module. La relation entre le module et la température est linéaire avec un coefficient négatif, ce qui signifie que lorsque la température augmente la rigidité de l'enrobé diminue. Ce résultat est en accord avec les précédentes recherches (Grenier and Konrad, 2009). Cette évolution du module est possible parce que l'enrobé est un matériau thermo susceptible, caractéristique liée à la présence du liant dont les propriétés mécaniques dépendent fortement de la température. Les surfaces de

réponse des figures 4-6 et 4-7 ci-dessous présentent deux pentes décroissantes selon l'axe des températures (28.4 MPa/ °C en X = -1,25 et 70.3 MPa/ °C en X =1.25). Pour des basses températures, la rigidité est élevée et inversement à haute température, la rigidité chute fortement. Pour ces chutes de rigidité, l'enrobé présente une déformation importante, condition propice à l'orniérage, (Huet, 1963, Dongmo-Engeland, 2005). Une augmentation de température de 1°C conduit à une diminution de module de l'ordre de 1,68%. Cette faible variation est due au fait que les 5,1% de vides rentrent dans la gamme prescrite par le cahier de charges. Monismith (1985) a démontré qu'une teneur en vide de l'ordre de 4 à 6% pour un béton bitumineux constitue un optimum. Pour une température donnée le module n'est pas constant sur le domaine expérimental.

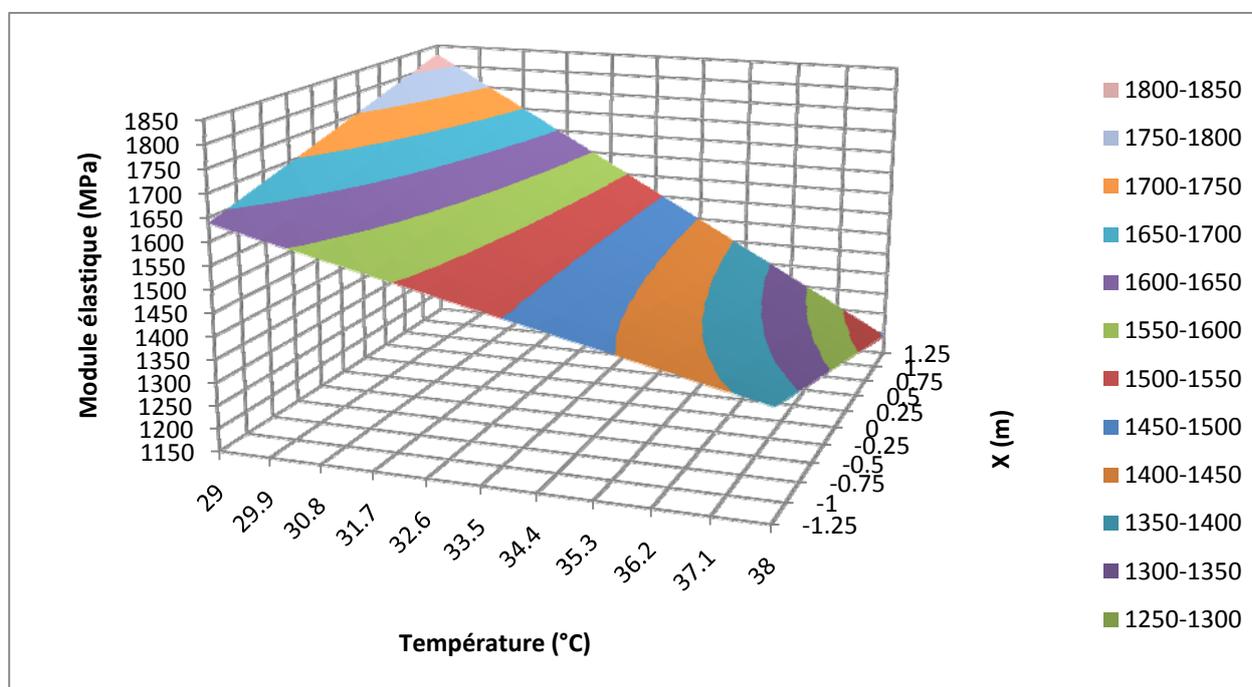


Figure 4-6: Courbe iso réponse du module  $E=f(X, T) Y=0$  du BBSG 0/10

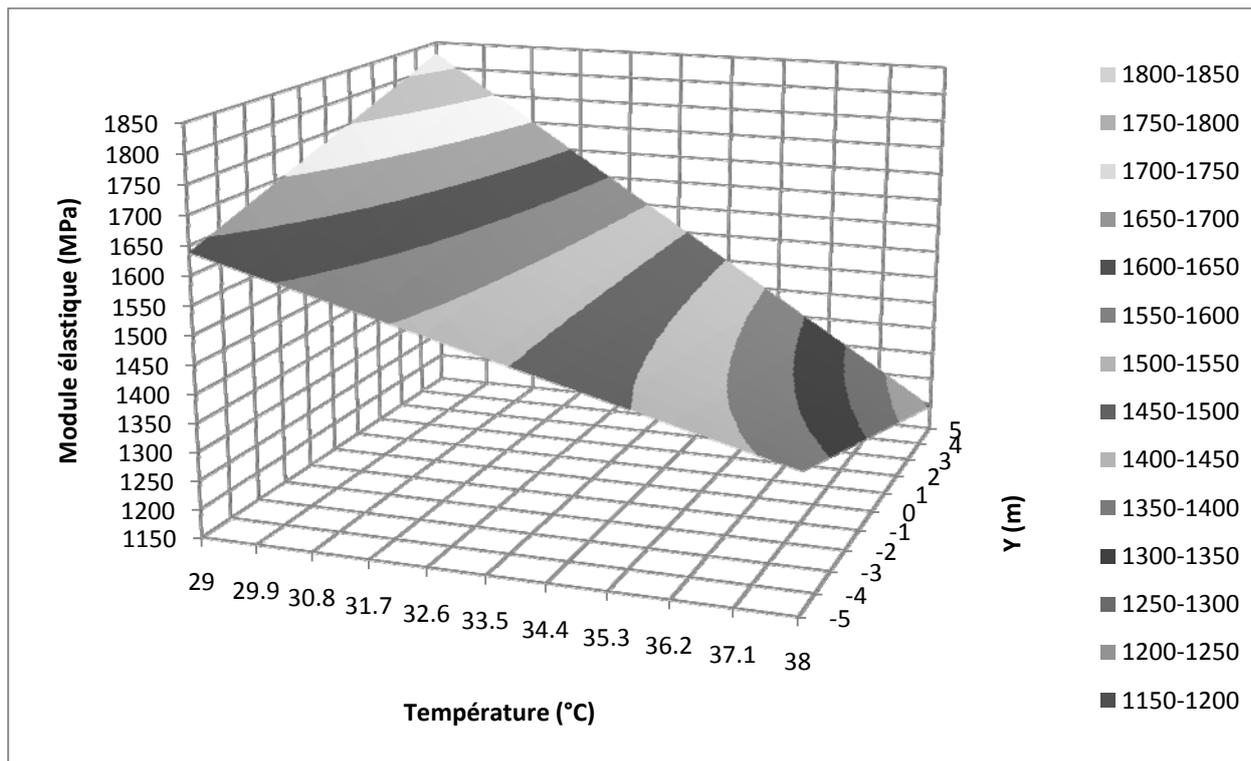


Figure 4-7: Courbe iso réponse du module  $E=f(Y, T)$   $X=0$  du BBSG 0/10

#### 4.2.4.2 Les interactions

Les interactions XT, YT et XYT ont la même importance. L'effet des facteurs X et Y dépend fortement de la température. L'apparition des coordonnées X et Y dans l'équation du modèle serait due à la non homogénéité de la distribution dimensionnelle des granulats dans la matrice de l'enrobé de la zone de mesure, à la variation des épaisseurs de la couche de roulement.

Ces interactions peuvent être observées sur les surfaces de réponse des figures 4-6 (avec  $Y = 0$ ), 4-7 (avec  $X = 0$ ), 4-8 (avec  $T = 29\text{ °C}$ ) et 4-9 (avec  $T = 38\text{ °C}$ ) ci-dessous.

Les figures 4-6 et 4-7 ci-dessus serviront à l'interprétation des interactions XT et YT. Les modules les plus élevés sont obtenus aux valeurs basses de températures et respectivement pour des valeurs de X élevées (figure 4-6) et de Y élevées (figure 4-7).

La surface de réponse de la figure 4-6 est une juxtaposition de deux demi plans inclinés. Les deux demi plan décroissent dans la même sens suivant l'axe des températures ( $28.4\text{ MPa/ °C}$  en  $X = -1,25$  et  $70.3\text{ MPa/ °C}$  en  $X = 1,25$ ). Par contre suivant l'axe de coordonnées X les deux demi plans ont même pente mais de signe opposé. Le demi plan limité par les points de coordonnées  $(-1,25 ; 29)$ ,  $(-1,25 ; 33,5)$ ,  $(1,25 ; 29)$  et  $(1,25 ; 33,5)$  a une pente de  $75,4$

MPa/m et celui limité par les points de coordonnées (-1,25 ; 33,5), (-1,25 ; 38), (1,25 ; 33,5) et (1,25 ; 38) a une pente de -75,4 MPa/m. Les point de coordonnées (X ; 33,5) ont un module E =1510 MPa. Ces points ne sont pas influencés par la température et les coordonnées spatiales. Les points stables aux basses températures le deviennent moins aux hautes températures. L'évolution du module sur le domaine expérimental s'inverse au cours d'une journée lorsqu'on dépasse la température de 33,5 °C. (Ces interprétations sont valables pour la figure 4-7 en remplaçant : X par Y, -1,25 par -5 et 1,25 par 5)

A la température de 29 °C, la surface de réponse de la figure 4-8 ci-dessous est une parabololoïde en forme de demi-pyramide de concavité tournée vers le bas. L'axe de symétrie de la parabololoïde est une courbe de pente croissante qui passe par les points de coordonnées (-1,25 ; -5 ; 1638) et (1,25 ; 5 ; 2015). Le module est reparti en arc de cercle concentrique. Les points de la base de cette demi pyramide ont un module E = 1638 MPa. Le module le plus élevé E = 2015 MPa est obtenu pour des valeurs de X et Y élevées.

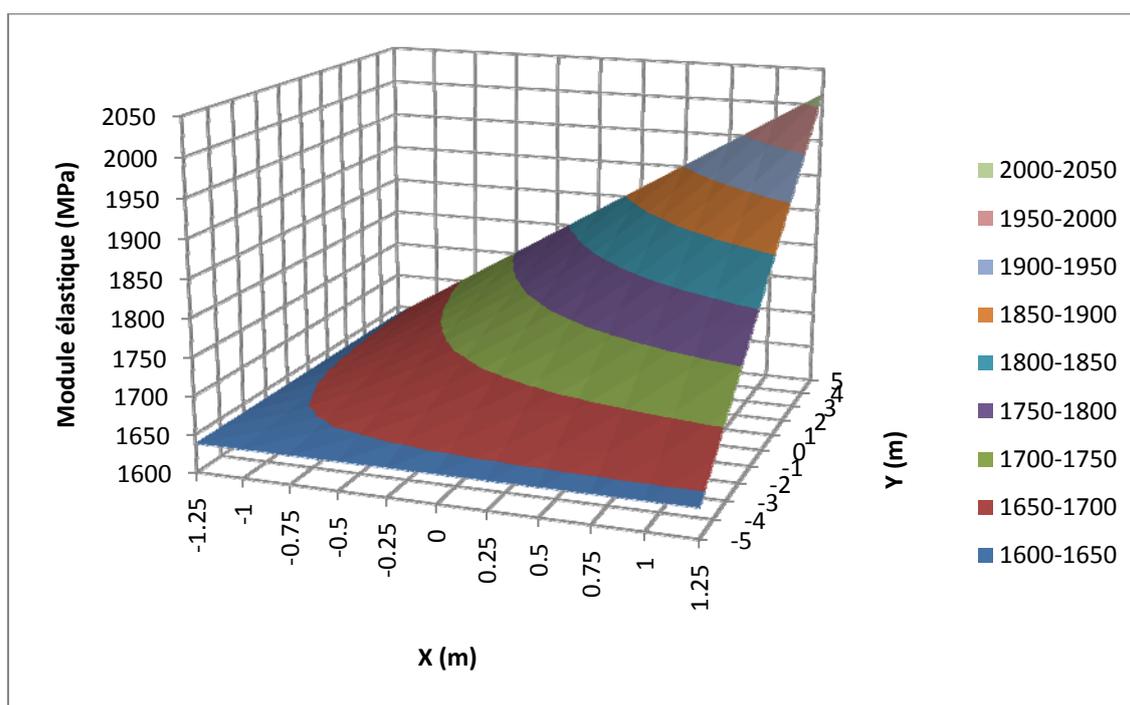


Figure 4-8: Courbe iso réponse du module  $E=f(X, Y)$  à  $T=29^{\circ}\text{C}$  du BBSG 0/10

A la température de 38 °C, la surface de réponse de la figure 4-9 ci-dessous est une parabololoïde dont la concavité est tournée vers le haut. L'axe de symétrie de la parabololoïde est une courbe de pente décroissante qui passe par les points de coordonnées (-1,25 ; -5 ; 1383) et (1,25 ; 5 ; 1006). Le module le plus élevé (1383 MPa) est obtenu pour des valeurs de X faibles et relativement indépendant des valeurs prises par Y.

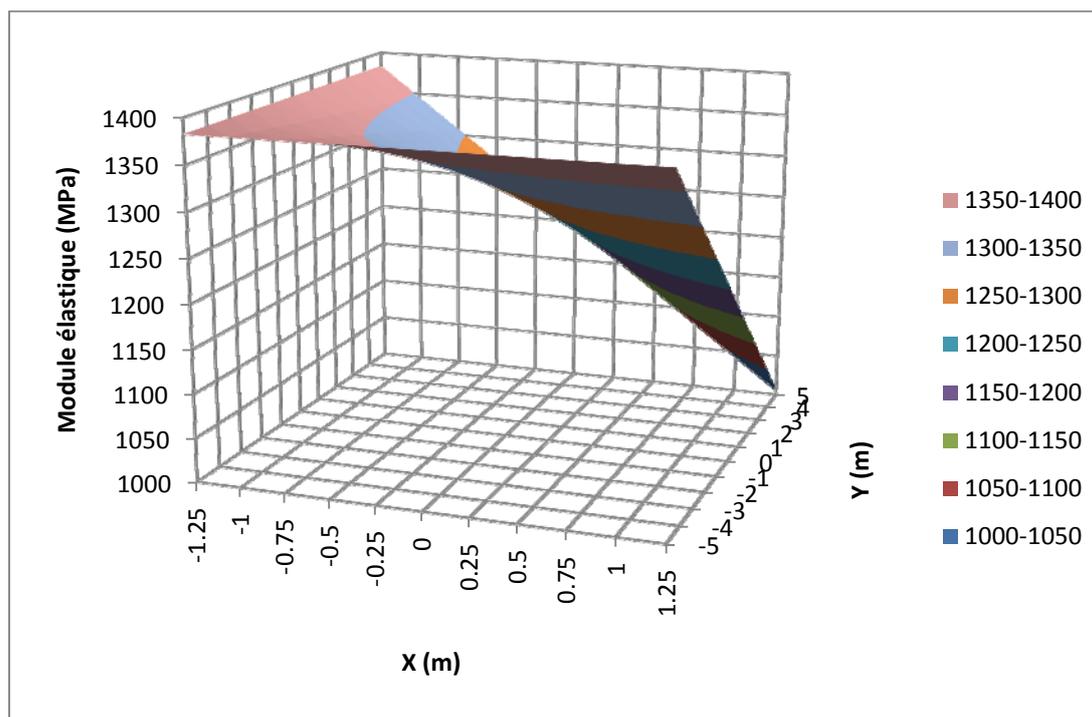


Figure 4-9: Courbe iso réponse du module  $E=f(X, Y)$  à  $T=38^{\circ}\text{C}$  du BBSG 0/10

La surface de réponse de la figure 4-9 peut être considérée comme une image de la surface de réponse de la figure 4-8 par rapport à un plan fictif qui passerait à la base de celle-ci. La différence de module entre les points de coordonnées  $(X ; -5)$  et  $(-1,25 ; Y)$  des figures 4-8 et 4-9 est  $\Delta E_1 = 255 \text{ MPa}$ . Celle entre les points de coordonnée  $(1,25 ; 5)$  de ces mêmes figures est  $\Delta E_2 = 1009 \text{ MPa}$ . Dans des zones où la matrice de l'enrobé est relativement homogène le module de l'enrobé subit peu les caprices de la température et du même coup limite l'influence des coordonnées spatiales.

#### 4.2.4.3 Validation du modèle

De l'analyse des résultats du tableau 4-9 il ressort que :

Le ratio  $F_{A/E} = 1,489$  est inférieur au facteur de Fisher  $F_{(0,05 ; 1,5)} = 6,607$  ce qui signifie que l'ajustement du modèle par rapport à l'expérience est correct et que la régression est adéquate.

La valeur du ratio  $F_{\text{Reg/Res}} = 20,765$  est plus de 4 fois supérieure au facteur de Fisher  $F_{(0,05 ; 7,6)} = 4,206$ . L'ensemble des facteurs testés est statistiquement significatif au seuil  $\alpha$  de 5%.

Le coefficient de détermination  $R^2$  est supérieur à 95% ce qui signifie que le modèle exprime 96% de la variabilité totale (figure 4-10).

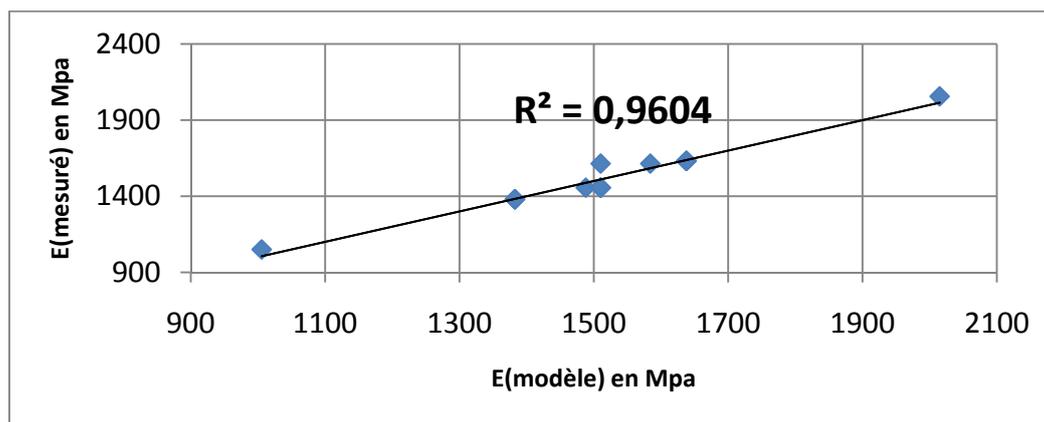


Figure 4-10: Dispersion des résultats de mesure par rapport au modèle (BBSG 0/10)

On peut remarquer une dispersion homogène rapprochée de la droite de référence qui représente le modèle établi.

Sur la base de ces trois conditions, le modèle représenté par l'équation (3) est valide sur le domaine expérimental.

#### 4.2.5 Comparaison des valeurs du modèle avec celles du logiciel ALIZÉ (valeurs approchées)

Les figures 4-11 et 4-12 ci-dessous comparent les modules obtenus par les modèles établis et ceux du logiciel ALIZÉ (valeurs approchées) pour chaque matériau dans son domaine expérimental.

##### Grave bitume

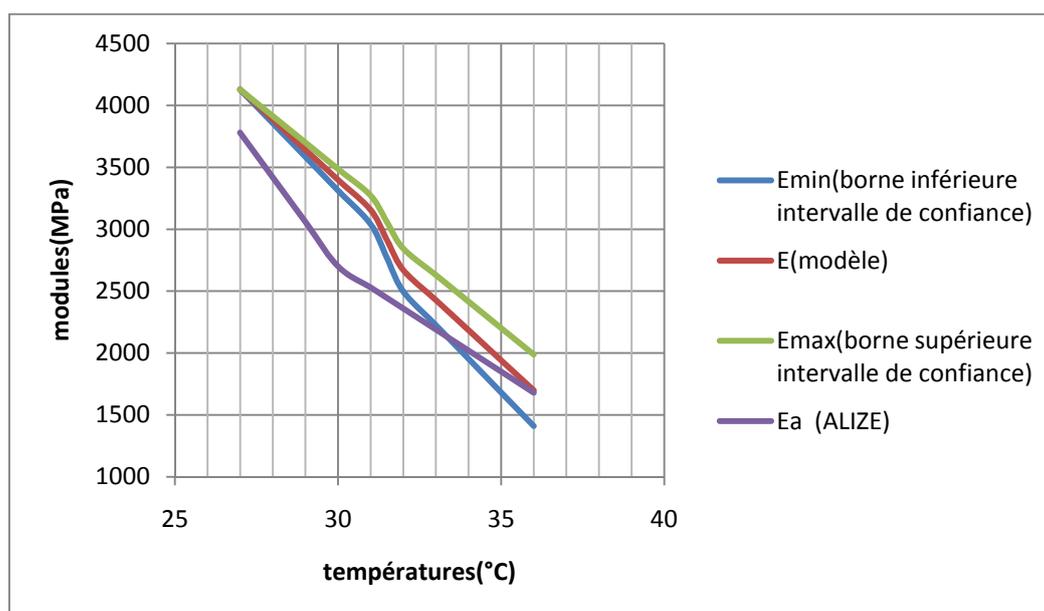


Figure 4-11: Comparaison modèle et valeurs ALIZÉ \_ grave bitume

## Béton bitumineux

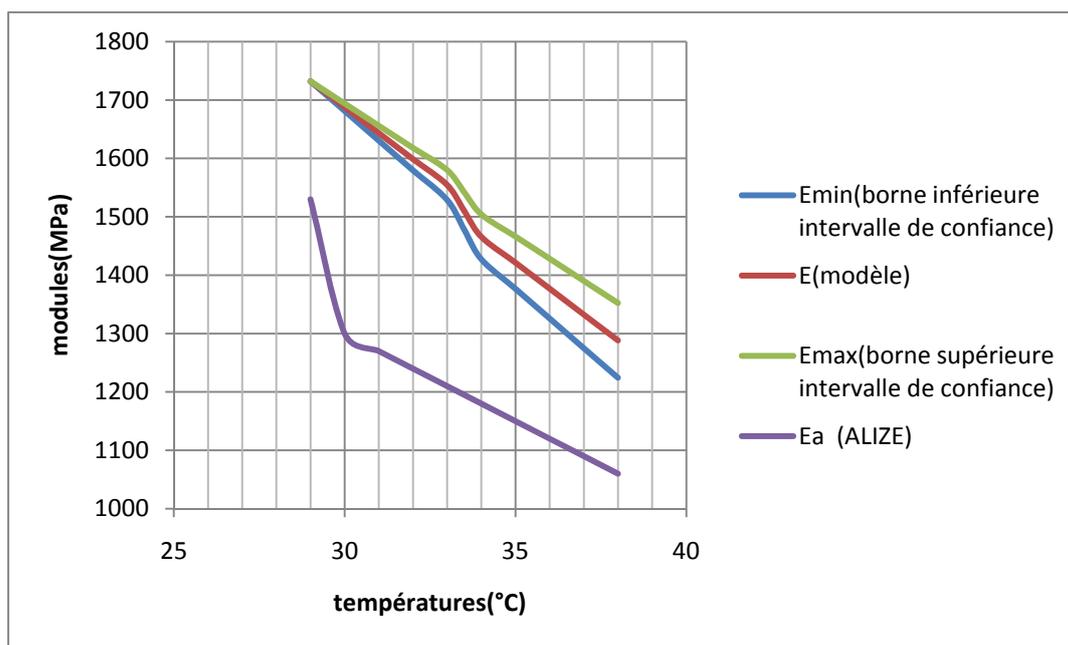


Figure 4-12: Comparaison modèle et valeurs ALIZÉ \_ béton bitumineux

Ces comparaisons indiquent que les modules élastiques du logiciel ALIZÉ sont faibles par rapport à ceux fournis par les modèles dans cette étude. Ces variations vont de 1,13% à 25,91% pour la grave bitume et de 13,21% à 29,82% pour le béton bitumineux. Ces différences seraient inhérentes :

- ✓ **Aux méthodes d'expérimentation.** En général, le calcul inverse est un processus laborieux, exigeant un haut degré d'habileté et les résultats sont connus pour être très dépendants de l'expérimentateur. De plus ceci est dû à un certain nombre de raisons, incluant le manque de consensus standard abordant tous les aspects du calcul inverse (Saltan et al., 2011). Le calcul inverse des propriétés des couches de chaussée manque de précision en dépit de l'existence de plusieurs programmes employant différentes procédures de calcul et algorithmes (Alkasawneh, 2007).
- ✓ **Aux conditions climatiques.** En effet les roches utilisées pour la confection des enrobés dont les caractéristiques sont utilisées dans la logiciel ALIZÉ sont soumis au cycle de gel-dégel et sont moins denses que les roches qu'on rencontre sur le continent Africain.
- ✓ **À la nature du bitume utilisé.** Le bitume utilisé pour la présente étude est de grade 50/70 alors que celui utilisé pour la formulation dont les caractéristiques sont utilisées dans le logiciel ALIZÉ sont inconnues.

Sur la figure 4-9 les modules du logiciel ALIZÉ diffèrent peu de ceux du modèle pour les températures comprises entre 34°C et 36°C et rentrent dans l'intervalle de confiance à 95% du modèle de la grave bitume.

## 5 CONCLUSION - RECOMMANDATIONS – PERSPECTIVES

### 5.1 CONCLUSION

La présente étude a traité du comportement de la rigidité des enrobés en fonction des conditions thermiques à partir des mesures des déformations verticales de la chaussée. Cette étude a permis d'établir une corrélation du module en fonction de la température voire une variation spatiale du module et de déterminer la température optimale locale de dimensionnement.

Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur la méthode des plans d'expériences dont les résultats montrent bien l'intérêt qu'elle apporte en matière d'organisation de l'expérimentation et d'interprétation des résultats issus d'expériences. Nous avons combiné les modules obtenus des mesures de déflexion réalisées *in situ* sur le domaine expérimental ce qui nous a permis de mettre en évidence les effets des facteurs étudiés et leurs influences sur la réponse du modèle.

Les modèles prédictifs obtenus dans cette étude pour la grave bitume et le béton bitumineux sont les suivants :

$$\checkmark E_{GB} = 2\,914(\pm 78) - 1\,215(\pm 103)T$$

$$\checkmark E_{BB} = 1\,510(\pm 17) - 222(\pm 23)T - 94(\pm 23)XT - 94(\pm 23)YT - 94(\pm 23)XYT$$

Cette étude a permis de montrer que :

- ✓ Une augmentation de la température se traduit par une diminution de la rigidité et une augmentation de la déflexion.
- ✓ L'homogénéité de la distribution dimensionnelle des granulats dans la matrice de l'enrobé a une influence sur la rigidité. Plus le matériau est homogène comme dans le cas de la grave bitume moins l'endroit de la prise de mesure est important.
- ✓ La valeur maximale du module élastique de l'enrobé est obtenue au centre du domaine expérimental qui correspond pour chaque période de mesure à une température de 31,5°C pour la grave bitume et 33,5°C pour le béton bitumineux.

## **5.2 RECOMMANDATIONS**

Il serait souhaitable au regard du fait que la température a un effet significatif sur la déflexion et la rigidité de :

- ✓ Normaliser la température de mesure des déflexions dans le domaine expérimental avec des objectifs précis :
  - Si les objectifs sont un module maximal et une déflexion faible, les mesures de déflexion ne doivent se faire qu'à des périodes de la journée où la température est inférieure ou égale respectivement à 31,5°C sur la grave bitume et 33,5 °C sur le béton bitumineux. A ces températures l'entreprise est sûre de la réception de ces travaux.
  - Si on veut savoir jusqu'où peut aller la chaussée en terme de module, il est préférable de n'effectuer les mesures de déflexion qu'à des périodes de la journée où la température est supérieure respectivement à 31,5 °C sur la grave bitume et 33,5 °C sur le béton bitumineux. Si la compacité respecte les spécifications, les déformations maximales obtenues ne sont pas dues à la qualité des matériaux mais à la perte des propriétés portantes sous l'effet de la chaleur.

Cependant la normalisation de la température de mesure des déflexions devra être règlementée pour ne pas engendrer de nouveaux problèmes. En visant un module maximal et une faible déflexion le nombre d'heures de travail journalier pour les mesures et les travaux qui s'y rattachent sont réduits et impacte négativement sur le respect du délai contractuel. Alors qu'en cherchant à connaître les déformations maximales, il y a un risque de n'avoir que les valeurs de déflexions supérieures à celles fixées par le cahier de charges et entraînerait la non réception des travaux.

- ✓ Choisir le bitume adapté aux conditions climatiques pour réaliser les travaux : Le point de ramollissement du bitume de grade 50/70 utilisé pour ce projet varie entre 46 et 54°C. La température peut avoisiner ou atteindre ne serait ce que la borne inférieure de cette plage au courant du mois d'avril. Les conséquences de l'atteinte de ce point sont : le ramollissement du bitume (orniérage, fluage), décollement progressif des interfaces, augmentation des asphaltènes par départ des composants volatils, la fragilisation, sensibilité accrue aux chocs thermiques, risque de fissures et de faïençage et la chute de portance des enrobés. Au vu de tout ceci un bitume plus dur ne

serait ce que le bitume de grade 35/50 dont le point de ramollissement varie entre 50 et 58°C est plus indiqué pour la réalisation des travaux dans le contexte du Burkina Faso pour éviter une dégradation rapide de la chaussée et la diminution de durée de vie projetée. La tendance actuelle est à l'utilisation du bitume de grade 35/50 pour la formulation du béton bitumineux.

- ✓ Choisir une température de dimensionnement adaptée à la zone climatique :
  - A court terme, pour un dimensionnement optimal dans le domaine expérimental, les valeurs des modules élastiques obtenues au centre à savoir 31,5 °C pour la GB 0/20 et 33,5 °C pour le BBSG 0/10 sont plus indiquées. Les valeurs obtenues aux températures élevées conduiraient à un surdimensionnement du revêtement bitumineux, exposera la chaussée à des risques d'orniérages et un coût de projet exorbitant alors que celles obtenues aux basses températures sous dimensionneraient la structure et une dégradation rapide de la chaussée.
  - A long terme, la température moyenne maximale annuelle (35 °C) obtenue entre 1979 et 2008 à la station météorologique de l'aéroport de Ouagadougou peut être adoptée pour le dimensionnement des chaussées dans des zones qui ont les mêmes conditions climatiques que la région de Ouagadougou. Les températures sont à l'instar de la pluviométrie marquées par de forte variabilité spatiale et temporelle. La fluctuation des températures dans le temps et dans l'espace est étroitement liée à l'ensoleillement donc pour les autres zones climatiques il faudrait utiliser les températures moyennes maximales mensuelles correspondantes pour le dimensionnement des chaussées car la durée de vie est une fonction de la température, de la déformation et du temps de repos (Domec, 2005).

### **5.3 PERSPECTIVES**

Notre étude a servi à établir des modèles qui sont cependant valides uniquement dans le domaine expérimental de notre travail.

Les perspectives envisageables de notre travail de mémoire s'élaborent selon les points suivants :

- ✓ Du point de vue expérimental, il serait intéressant de réaliser les mesures *in situ* sur des planches d'essai situées dans une zone où les effets parasites liés au passage des véhicules qui affectent les mesures seront nuls.

- ✓ En ce qui concerne la modélisation, la principale voie d'amélioration sera la généralisation de ces modèles prédictifs par extension du domaine d'étude.
- ✓ Pour mieux appréhender l'influence de la température sur le module des enrobés, il serait préférable d'augmenter le nombre de mesures, d'augmenter la durée de l'étude, de faire varier les conditions de chargement et les formulations des matériaux.

## 6 BIBLIOGRAPHIE

### OUVRAGES

1. AFNOR. (1999). **Norme expérimentale : spécifications des bitumes routiers**. Paris. AFNOR.
2. ALKASAWNEH, Wael. (2007). **Backcalculation of pavement moduli using genetic algorithms**. PhD thesis. The Graduate Faculty of The University of Akron, USA: 275 p.
3. ARCHIVES, D. G. R. (2001). "**Rapport final de surveillance des travaux d'entretien périodique et de resurfacement de la RN01 : Tronçon Ouagadougou – Boromo**".
4. BENOIST, D ; TOURBIER, Y ; GERMAIN-TOURBIER S. (1994). **Plan d'expériences construction et analyse**, Edition Technique & Documentation-Lavoisier.
5. BODIN, Didier ; CHABOT, Armelle ; DE LA ROCHE, Chantal ; PIAU, Jean Michel ; PIJAUDIER-CABOT, Gilles. (2001). **Essais de fatigue sur enrobés bitumineux et perspectives de modélisation par la mécanique de l'endommagement**. Xv<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique. Nancy, France. 6 p.
6. BOUDAUD, Z. (1997). **Les plans d'expériences**. Séminaire. Université de M'sila.
7. BOX, George. E. P; HUNTER, J. Stuart; HUNTER, William.G. (2005). **Statistics for experimenters: design, innovation, and discovery**. Second Edition. Wiley-Interscience New York. USA. 639 p
8. CEBTP, (1984). **Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux**, République française, Ministère des relations extérieures, coopération et développement. France. 157 p
9. GRENIER, Simon ; KONRAD, Jean-Marie (2009). "**Détermination des propriétés viscoélastiques d'un enrobé bitumineux à l'aide des essais FWD**."Canada. 26 p
10. GRIMAU, J.P; K. and R. HIERNAUX (1977). **Utilisation de l'orniereur type LCPC**. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, (n° spécial v) : p. 165-172.
11. HUET, C. (1963). **Etude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés**. Faculté des sciences. Paris. Thèse de Docteur-Ingénieur : 69 p.
12. LIENGME, Bernard. V. (2008). **A Guide to Microsoft Excel 2007 for Scientists and**

**Engineers**, Academic Press: 326 p.

13. LNBTP (2010). "**Décision N°10-033/LNBTP/CA Portant Attributions, Organisation et Fonctionnement du LNBTP.**"
14. LNBTP. (2011). "**Rapport mensuel de contrôle géotechnique des travaux.**" 1-16.
15. MONISMITH, C.L., J.A. Epps, and F.N. Finn. (1985). **Improved asphalt mix design.** Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologist. Vol. 54: p. 347-406
16. PILLET, M. (1994). **Introduction aux plans d'expériences par la méthode Taguchi**, Editions d'Organisation.
17. SALTAN, Mehmet ; TERZI, Serda ; UĞUR KÜÇÜKSILLE, Ecir. (2011). "**Back calculation of pavement layer module and Poisson's ratio using data mining.**" Expert Systems with Applications **38**(3): Sparta, Turkey: 2600-2608.
18. SIER (1993). Informations et techniques n° 6.
19. TECHNI-CONSULT. (2007). **Rapport d'Etude Géotechnique.**
20. VAN GEEM, Carl; PILATE, Olivier; DAVID, Olivier. (2009). "**Un cas pratique : L'évaluation en fonction des performances attendues, d'un projet de réhabilitation d'un parking et de la voirie d'une station service autoroutière.**» : 10 p.

#### **ARTICLES DE PERIODIQUE**

21. ARRAIGADA, S; PARTL, M. N, ANGELONE, S. M; & MARTINEZ, F. (in press). **Evaluation of accelerometers to determine pavement deflections under traffic loads.** Materials and Structures. Doi: 10.1617/s11527-008-9423-5.
22. DI BENEDETTO, H. (1998). "**Modélisation : écart entre état des connaissances et applications.**"in Journée LAVOC, Genève, Suisse.
23. GORSKI, M. (2000). "**Détermination des modules des couches de chaussées bitumineuses à partir des mesures de portance et d'épaisseur (Curviamètre et radar).**" In : Bulletin du CRR (1<sup>er</sup> trimestre 2000, n°42). Belgique : 12 p.
24. UZAN, J; LYTTON, R.L, & GERMANN, F.P. (1989). "**General procedure for backcalculating layer moduli.** in Nondestructive testing of pavements and backcalculation of moduli: p. 217-218.

## WEBOGRAPHIE

25. DOMEQ, Vincent. **Endommagement par fatigue des enrobés bitumineux en condition de trafic simulé et de température**. Thèse : Université de Bordeaux I, 2005 [16/12/2005]. <[http://media.lcpc.fr/ext/pdf/theses/rou/throu\\_domec.pdf](http://media.lcpc.fr/ext/pdf/theses/rou/throu_domec.pdf) > consulté le 17 décembre 2010
26. DONGMO-ENGELAND, Berthe-Julienne. **Caractérisation des déformations d'orniérage des chaussées bitumineuses** [En ligne] Thèse : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005 [17/01/2006] < <https://docinsa.insa-lyon.fr/these/pont.php?id=dongmo-engeland> > consulté le 05 octobre 2010.
27. LAMURE, Alain. **Méthodologie des plans d'expériences** < [www.inp-toulouse.fr/tice/pdf/04Extrait\\_Methodologie\\_Experimentale.pdf](http://www.inp-toulouse.fr/tice/pdf/04Extrait_Methodologie_Experimentale.pdf) > consulté le 25 novembre 2010.

## **7 ANNEXES**

<i>ANNEXE 1: Plans d'expériences .....</i>	<i>43</i>
<i>ANNEXE 2: Matrice des effets de la grave bitume 0/20 .....</i>	<i>47</i>
<i>ANNEXE 3: Matrice des effets du béton bitumineux 0/10 .....</i>	<i>48</i>
<i>ANNEXE 4: Relevée de température sur la grave bitume 0/20 .....</i>	<i>49</i>
<i>ANNEXE 5: Relevée de température sur le béton bitumineux 0/10 .....</i>	<i>50</i>
<i>ANNEXE 6: Déflexion sur la grave bitume 0/20 .....</i>	<i>51</i>
<i>ANNEXE 7: Tableau général effets et résultats de la grave bitume .....</i>	<i>52</i>
<i>ANNEXE 8: Déflexion sur le béton bitumineux 0/10 .....</i>	<i>53</i>
<i>ANNEXE 9: Tableau général des effets et résultats du béton bitumineux .....</i>	<i>54</i>
<i>ANNEXE 10: Températures moyennes minimales et maximales mensuelles entre 1979 et 2008 .....</i>	<i>55</i>

## **ANNEXE 1: Plans d'expériences**

*Cette annexe est une synthèse des documents précis ayant servi à la réflexion.*

### ***Le Plan d'expériences***

Un plan d'expériences est la liste de combinaisons de facteurs pour lesquelles la réponse du modèle doit être observée. Il se présente sous la forme d'un tableau dans lequel :

- Chaque colonne identifie les niveaux d'un facteur,
- Chaque ligne une combinaison de facteurs.

Il existe plusieurs sortes de plans d'expériences :

- Le plan uniformément répété obtenu en reproduisant un même nombre de fois les combinaisons. Il permet une analyse statistique des résultats et il est notamment utile à l'évaluation de la précision d'un système de mesure.
- Le plan factoriel : les niveaux de tous les facteurs sont codés. C'est un plan dans lequel toutes les combinaisons distinctes de niveaux des facteurs sont présentes.
- Le plan orthogonal : un plan d'expérience est orthogonal vis-à-vis d'un modèle donné si pour chaque couple d'actions disjointes du modèle, tous ses couples de niveaux possibles sont présents un même nombre de fois dans le plan d'expérience.

L'intérêt de l'orthogonalité est de minimiser les incertitudes sur l'estimation des coefficients du modèle. La méthode de calcul des effets au sens des moindres carrés est extrêmement simplifiée pour un plan orthogonal,

### ***DÉFINITIONS***

Ces définitions sont extraites des ouvrages de Maurice Pillet (1994) et Daniel Benoist et al. (1994)

#### ***Facteur***

Un facteur est une variable, ou un état, qui agit sur le système étudié. Un facteur peut être de type continu (température, mesure d'une longueur) ou discret (marque de l'outil, robinet fermé ou ouvert)

### ***Réponse***

La réponse d'un système est la grandeur que l'on mesure pour connaître l'effet des facteurs sur le système. La réponse peut être de type quantitatif (poids d'une pièce, dispersion sur trente pièces) ou qualitatif (impression à chaud et froid, présence ou non de coulure). Les réponses quantitatives sont en général plus faciles à traiter.

### ***Facteur significatif***

Un facteur significatif est un facteur qui, lorsqu'il est modifié, engendre une variation évaluable par le système de mesure de la réponse du système.

### ***Niveaux d'un facteur***

Les niveaux d'un facteur indiquent les valeurs que prend ce facteur au cours des essais.

### ***Plan factoriel complet***

On appelle plan factoriel complet le plan d'expérience regroupant toutes les combinaisons possibles entre les niveaux des facteurs. Son nombre de combinaisons est le produit des nombres de niveaux des facteurs. Le plan factoriel complet  $X^k$  ce qui signifie que cette expérimentation concerne un système comportant  $k$  facteurs à  $X$  niveaux. Le nombre de combinaison nécessaire dans ce cas est  $X^k$ .

### ***Matrice d'expérience***

La matrice d'expériences définit les conditions d'essais. On y présente en colonne la moyenne, les effets principaux et les effets d'interaction.

## ***MÉTHODOLOGIE***

### ***Les plans d'expérience***

Dans la quête de compréhension du comportement des matériaux par rapport aux sollicitations extérieurs et d'interprétations plus adaptées, le chercheur contemporain ne peut se dispenser d'expériences. Pour obtenir des résultats fiables et précis le travail doit être bien organisé. Les expériences et essais doivent être planifiés de manière efficiente pour obtenir de meilleurs résultats le plus rapidement et à moindre coût.

Nous présentons succinctement quelques éléments utiles à la compréhension de notre étude. Des compléments, la présentation des différents types de plan, des définitions de termes spécifiques ainsi que quelques règles de construction sont données en annexes.

## ***Historique***

La méthode des plans d'expériences date du début du XX<sup>ème</sup> siècle avec les travaux de FISHER en 1925. Il mit sur pied une technique qui prend en charge et organise la variation simultanée de tous les facteurs au cours d'une expérience. La méthode ne prendra son essor qu'après les travaux du Japonais G. TAGUCHI (BOUDAUD, 1997). Son apport a été la création des tables standards permettant des études courantes.

## ***Avantages et conditions d'application des plans d'expériences***

L'objectif principal est de réduire au minimum le nombre d'essais expérimentaux. Le plan statistique permet de manipuler plusieurs facteurs simultanément durant les essais, de faire varier plusieurs facteurs d'un essai à l'autre, de faire varier chaque facteur avec un petit nombre de modalités et permet de réduire l'erreur expérimentale à sa valeur la plus faible possible. L'application de la méthode des plans d'expériences suppose que les deux conditions suivantes sont vérifiées (SIER, 1993) :

- 1) La valeur prise par chaque facteur doit être connue sans erreur, mais un travail expérimental est toujours entaché d'erreur. La satisfaction de cette condition passe par la minimisation de l'erreur induite sur la valeur de cette variable devant la variation de cette variable lorsqu'elle change de valeur.
- 2) La variable de réponse doit être homoscedable. C'est-à-dire que l'erreur de mesure doit être la même sur tout le domaine expérimental. Ainsi l'expérimentateur doit garder les mêmes gestes, le même matériel et la même cadence lors de toute la campagne d'expérimentation.

## ***DISTINCTION ENTRE LA MÉTHODE EXPÉRIMENTALE TRADITIONNELLE ET LA MÉTHODE DES PLANS D'EXPÉRIENCES***

Il existe différentes manières de planifier une expérimentation. La méthode traditionnelle fait varier un seul élément à la fois parmi d'autres qui restent fixes. Cette méthode sur laquelle sont basées tant de recherches, ne permet que d'étudier l'évolution du système par rapport à la variation de cet élément seul et est incapable de détecter toutes interactions entre facteurs. L'intérêt de la stratégie traditionnelle est qu'elle réduit grandement la variabilité des autres facteurs et améliore la précision en conséquence.

La méthode des plans d'expériences a révolutionné le planning des expériences, l'idée est qu'au lieu de faire varier un seul élément à la fois, tous les facteurs varieront en même temps

sur les bases de données statistiques qui nous garantissent précision et optimalité. Elle met en évidence l'interaction entre facteurs. Une objection peut être faite sur cette théorie car elle occulte un aspect important de la précision de la mesure expérimentale. La précision est toujours réduite à la seule variabilité de la réponse. La variabilité des facteurs eux-mêmes n'est pas prise en compte.

### **LES ETAPES DE LA MÉTHODE**

#### 1) Formaliser le problème

C'est une étape cruciale dans la démarche de planification. Pratiquement tous les ouvrages qui traitent du sujet y font référence. Elle permet de recenser l'ensemble des facteurs qui interviennent dans la mesure. Elle peut permettre de simplifier le modèle complet en éliminant par exemple des interactions improbables.

#### 2) Choix des facteurs influents et les interactions

La démarche classique lorsque l'on aborde un phénomène mal connu se déroule en deux temps. On effectue d'abord un criblage des facteurs sous forme d'un plan complet à 2 niveaux par facteur. Le plan complet comprend toutes les combinaisons possibles des facteurs. On peut alors affiner le modèle en sélectionnant les interactions les plus significatives.

#### 3) Construire le plan

On classe ensuite les paramètres dans l'ordre de facilité de réglage décroissant. Il existe des recueils (Taguchi, Box,...) (biblio) qui proposent des tableaux de plans d'expériences optimaux vis-à-vis de ces indications et du modèle choisi. Chaque ligne du tableau représente une expérience avec les niveaux de chaque facteur.

#### 4) Préparation et conduite de l'expérience

L'étape suivante consiste en la réalisation des essais. Analyse statistique des résultats, interprétation et validation du modèle.

Cette cinquième étape fait l'objet de la quatrième partie

**ANNEXE 2: Matrice des effets de la grave bitume 0/20**

N° essai	centre	X	Y	T	X*Y	X*T	Y*T	X*Y*T
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1
8	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	0	0	0	0	0	0	0
10	1	0	0	0	0	0	0	0
11	1	0	0	-0,3	0	0	0	0
12	1	0	0	0	0	0	0	0
13	1	0	0	0,2	0	0	0	0
14	1	0	0	0	0	0	0	0

**ANNEXE 3: Matrice des effets du béton bitumineux 0/10**

N° essai	centre	X	Y	T	X*Y	X*T	Y*T	X*Y*T
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1
8	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	0	0	0	0	0	0	0
10	1	0	0	-0.33	0	0	0	0
11	1	0	0	0	0	0	0	0
12	1	0	0	0	0	0	0	0
13	1	0	0	0.1	0	0	0	0
14	1	0	0	0	0	0	0	0

**ANNEXE 4: Relevée de température sur la grave bitume 0/20**

<b>FICHE DE RELEVÉE DES TEMPÉRATURES</b>			
<b>CHANTIER</b>	<b>Travaux de construction et de bitumage de l'interconnexion des routes nationales RN01 et RN04</b>		
<b>MATÉRIAU ÉTUDIÉ</b>	<i>Grave bitume 0/20</i>		
<b>DATES</b>	<i>09 et 10 mars 2011</i>		
<b>OPÉRATEUR</b>	<i>TANGOUCHE TCHETGNA</i>		
<b>LOCALISATION</b>			
	<b>PK ou PROFIL:</b>	218	
<b>MOIS</b>	<i>mars</i>		
<b>MATÉRIEL UTILISÉ</b>	<i>thermomètre à sonde</i>		
<b>HEURE (h)</b>	<b>TEMPÉRATURE ( °C)</b>		<b>OBSERVATIONS</b>
	<b>09/03/2011</b>	<b>10/03/2011</b>	
7h 00			
7h 30			
8h 00	19	19	
8h 30	20	20	
9h 00	22	21	
9h 30	23	23	
10h 00	25	25	
10h 30	27	26.5	
11h 00	29	29	
11h 30	31	31	
12h 00	32	32	
12h 30	34	34	
13h 00	35	35	
13h 30	36	36	
14h 00	37	37	
14h 30	38	38	
15h 00	38	37.5	
15h 30	37	36.5	
16h 00	36	36	
16h 30	35	35	
17h 00	34	34	
17h 30			
18h 00			

**ANNEXE 5: Relevée de température sur le béton bitumineux 0/10**

<b>FICHE DE RELEVÉE DES TEMPÉRATURES</b>			
<b>CHANTIER</b>	<b>Travaux de construction et de bitumage de l'interconnexion des routes nationales RN01 et RN04</b>		
<b>MATÉRIAU ÉTUDIÉ</b>	<i>Béton bitumineux 0/10</i>		
<b>DATES</b>	23 et 24 mars 2011		
<b>OPÉRATEUR</b>	TANGOU TCHETGNA		
<b>LOCALISATION</b>			
	<i>PK ou PROFIL:</i>	74	
<b>MOIS</b>	<i>mars</i>		
<b>MATÉRIEL UTILISÉ</b>	thermomètre à sonde		
<b>HEURE (h)</b>	<b>TEMPÉRATURE ( °C)</b>		<b>OBSERVATIONS</b>
	<b>23/03/2011</b>	<b>24/03/2011</b>	
7h 00			
7h 30			
8h 00	19	20	
8h 30	21	21	
9h 00	23	23	
9h 30	25	25	
10h 00	27	27	
10h 30	30	30	
11h 00	32	32	
11h 30	34	34	
12h 00	36	36	
12h 30	37	37	
13h 00	38	38	
13h 30	39	39	
14h 00	40	40	
14h 30	40	39	
15h 00	39	38	
15h 30	38	38	
16h 00	38	38	
16h 30	37	37	
17h 00	37	37	
17h 30			
18h 00			

**ANNEXE 6: Déflexion sur la grave bitume 0/20**

Grave bitume 0/20	N° essai	Déflexions (1/100 mm)						moyenne déflexion (1/100 mm)
		1 jour	2 jour	3jour	4 jour	5 jour	6 jour	
Essais au sommet	1	56	54	54	56			55
	2	56	56	54	54			55
	3	54	54	56	56			55
	4	54	52	54	56			54
	5	58	56	60	58			58
	6	58	58	58	58			58
	7	56	60	58	58			58
	8	58	60	60	58			59
Essais au centre	9	54						56
		56						
		58						
		56						
	10	54						56
		54						
		58						
		58						
	11	56						56
		56						
		58						
		54						
	12	58						56
		54						
		56						
		56						
13	56						57	
	56							
	58							
	58							
14	56						57	
	58							
	58							
	56							

**ANNEXE 7: Tableau général effets et résultats de la grave bitume**

N° essai	Centre	X	Y	T	X*Y	X*T	Y*T	X*Y*T	Déflexion (1/100 mm)	E (MPa)
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	55	3 905
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	55	3 905
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	55	3 905
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	54	4 862
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	58	1 830
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	58	1 830
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	58	1 830
8	1	1	1	1	1	1	1	1	59	1 369
9	1	0	0	0	0	0	0	0	56	3 139
10	1	0	0	0	0	0	0	0	56	3 139
11	1	0	0	-0,3	0	0	0	0	56	3 139
12	1	0	0	0	0	0	0	0	56	3 139
13	1	0	0	0,2	0	0	0	0	57	2 461
14	1	0	0	0	0	0	0	0	57	2 461

**ANNEXE 8: Déflexion sur le béton bitumineux 0/10**

Béton bitumineux 0/10	N° essai	Déflexions (1/100 mm)						moyenne déflexion (1/100 mm)
		1 jour	2 jour	3jour	4 jour	5 jour	6 jour	
Essais au sommet	1	54	56	54	56			55
	2	54	58	54	54			55
	3	52	58	56	54			55
	4	52	56	54	54			54
	5	58	60	60	58			59
	6	58	60	60	58			59
	7	58	60	58	60			59
	8	60	60	60	60			60
Essais au centre	9	56						56.5
		56						
		58						
		56						
	10	54						56.5
		58						
		58						
		56						
	11	57						57
		57						
		57						
		57						
	12	58						57
		56						
		58						
		56						
13	58						57	
	58							
	56							
	56							
14	56						57	
	58							
	58							
	56							

**ANNEXE 9: Tableau général des effets et résultats du béton bitumineux**

N° essai	Centre	X	Y	T	X*Y	X*T	Y*T	X*Y*T	Déflexion (1/100 mm)	E (MPa)
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	55	1 632
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	55	1 632
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	55	1 632
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	54	1 380
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	59	1 380
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	59	1 380
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	59	1 380
8	1	1	1	1	1	1	1	1	60	1 050
9	1	0	0	0	0	0	0	0	56,5	1 614
10	1	0	0	-0,33	0	0	0	0	56,5	1 614
11	1	0	0	0	0	0	0	0	57	1 456
12	1	0	0	0	0	0	0	0	57	1 456
13	1	0	0	0,1	0	0	0	0	57	1 456
14	1	0	0	0	0	0	0	0	57	1 456

## ANNEXE 10: Températures moyennes minimales et maximales mensuelles entre 1979 et 2008

