

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M. Ing.

PAR
KEVIN BILODEAU

PRÉDICTION DE LA DÉFORMATION PERMANENTE SELON LA MÉTHODOLOGIE
ESSO : DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES POUR DES ENROBÉS BITUMINEUX
QUÉBÉCOIS

MONTREAL, LE 23 SEPTEMBRE 2008

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Daniel Perraton, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Marie-José Nollet, présidente du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Alan Carter, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 12 SEPTEMBRE 2008

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

PRÉDICTION DE LA DÉFORMATION PERMANENTE SELON LA MÉTHODOLOGIE ESSO : DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES POUR DES ENROBÉS BITUMINEUX QUÉBÉCOIS

Kevin Bilodeau

SOMMAIRE

Au Québec, le réseau routier est principalement conçu de chaussées souples, soit une fondation granulaire revêtue d'enrobé bitumineux. Plusieurs défauts de surface sont apparents sur les chaussées souples. L'orniérage est un défaut de surface très présent au Québec. Ce mémoire, traitera de la déformation permanente des enrobés bitumineux, un mécanisme qui affecte l'orniérage.

L'objectif principal est d'établir la loi de déformation permanente de deux enrobés bitumineux communs du Québec selon la méthodologie ESSO. Les deux enrobés utilisés sont un enrobé semi-grenu ESG-10 qui sert généralement de couche de roulement aux véhicules et, un enrobé bitumineux EB-14 servant de couche de base à la couche de roulement.

L'essai utilisé pour caractériser les enrobés à la loi de déformation permanente de la méthodologie ESSO est un essai triaxial. C'est un essai de compression cyclique sous chargement axial répété de forme sinusoïdale avec et sans pression de confinement latéral. La variation des conditions d'essai tel la contrainte verticale, le confinement, la fréquence et la température permettront d'établir les paramètres de la loi de déformation permanente.

Le produit de cette recherche est l'obtention de la loi de déformation permanente pour les enrobés ESG-10 et EB-14. La loi permettra la prédiction de l'orniérage pour une structure de chaussée souple donnée suivant la méthodologie ESSO de prédiction de l'orniérage.

Mots-clés : Enrobé bitumineux, déformation permanente, orniérage, loi de déformation, méthodologie ESSO, triaxial, compression cyclique

PREDICTION OF THE PERMANENT DEFORMATION ACCORDING TO ESSO METHODOLOGY: DETERMINATION OF THE PARAMETERS FOR THE ASPHALT CONCRETES OF QUEBEC

Kevin Bilodeau

ABSTRACT

Quebec's road network is primarily designed with flexible pavements that consist of a granular foundation surfaced with asphalt concrete. Several surface defects are apparent on flexible pavements. Rutting is one of them and is frequently observed on Quebec's pavement. This master will address the permanent deformation of the asphalt, a mechanism that increases rutting.

The main objective is to establish a permanent deformation law for two asphalt materials used in Quebec using the ESSO methodology. The mixtures used are one dense graded asphalt mix: ESG-10 used as surface layer and one coarse graded asphalt mix: EB-14 used as base layer.

The test used to characterize the permanent deformation law of these mixtures is the ESSO methodology that consist of a triaxial test. This is a compression test under axial cyclic loading repeated sinusoidal form with and without confining pressure. The change in test conditions such as: the vertical stress, the confinement, the frequency and the temperature will set the parameters of the permanent deformation law.

The result of this research is the permanent deformation law for two mixes (ESG-10 and EB-14). This law will enable the prediction of rutting for a flexible pavement structure using the ESSO rutting method.

Keywords: Rutting, Asphalt pavement, bituminous material, flexible pavement, permanent deformation law, ESSO methodology

REMERCIEMENTS

Cette recherche a été réalisée au Laboratoire universitaire sur les chaussées, routes et enrobés bitumineux (LUCREB) et est une portion d'un projet de thèse sur la déformation permanente. Je tiens à remercier l'établissement pour avoir fourni les équipements nécessaires à l'avancement de la recherche.

Je voudrais remercier mon superviseur de mémoire Daniel Perraton pour son soutien, son aide et son encouragement durant ce projet de recherche. Je suis reconnaissant qu'il m'ait transmis son intérêt pour la recherche ainsi que toutes les connaissances acquises en collaborant avec lui dans divers projet de recherche.

Je tiens à remercier principalement Mathieu Meunier pour son aide et sa collaboration dans ce projet de recherche ainsi que tout le temps qu'il a investi pour l'orienter.

Je remercie tout le personnel du département de génie de la construction pour leur aide et leur soutien, en particulier Messieurs John Lescelleur, Alain Desjardins et Francis Bilodeau.

Finalement, je voudrais souligner le soutien reçu de mes parents, de ma famille et de mes amis qui ont été une grande source de motivation tout au long de mes travaux.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	5
1.1 Introduction aux enrobés bitumineux	5
1.2 Théorie de l'orniérage (types d'ornières)	8
1.2.1 Ornières à grand rayon	8
1.2.2 Ornières à petit rayon.....	8
1.3 Sollicitations induites par le trafic routier dans les enrobés bitumineux.....	9
1.3.1 Les états de contrainte à l'aplomb d'une charge simple.....	9
1.3.2 Charges roulantes et chemins de contraintes.....	11
1.3.3 Nature des sollicitations mécaniques à l'origine des déformations permanentes dans les enrobés bitumineux.....	12
1.4 Origine physique des déformations permanentes (déformation réversible et non réversible).....	13
1.4.1 Nature incrémental des déformations irréversibles.....	13
1.4.2 Rôle du bitume et du squelette granulaire dans l'origine des déformations permanentes	14
1.5 Essais caractérisant la déformation permanente des enrobés bitumineux	15
1.5.1 Les essais de simulation	15
1.5.2 Les essais de caractérisation.....	18
1.6 Méthodes de prédiction de déformation permanente	22
CHAPITRE 2 DESCRIPTION DE LA MÉTHODOLOGIE ESSO DE PRÉDICTION DE LA DÉFORMATION PERMANENTE	25
2.1 Introduction.....	25
2.1.1 Description générale de la méthodologie	26
2.1.2 Description détaillée.....	26
2.1.3 Loi de déformation permanente	28
2.2 Détermination des paramètres A, B, C, D et F.....	30
2.2.1 Définir l'effet des contraintes (A, B et C).....	30
2.2.2 Définir l'effet de la température (D).....	30
2.2.3 Définir l'effet de la fréquence (F).....	31
2.3 Calcul de l'orniérage pour un tronçon routier.....	31
2.3.1 Relation générale de déformation permanente.....	31
2.3.2 Calcul de l'orniérage.....	32
2.3.3 Calcul de la déformation permanente en fonction de l'épaisseur des couches.....	33
2.3.4 Calcul de la déformation au cours d'une journée.....	36
2.4 La loi générale $\dot{\epsilon}$ de la déformation permanente	40
2.5 Effet des conditions d'essais sur la loi de déformation permanente de la méthodologie ESSO.....	41
2.5.1 Effet du confinement (σ_v) sur la loi de déformation permanente de la méthodologie ESSO.....	41
2.5.2 Effet de la température (T) sur la loi de déformation permanente de la méthodologie ESSO.....	43
2.5.3 Effet de la fréquence (f) sur la loi de déformation permanente de la méthodologie ESSO.....	45

CHAPITRE 3	CAMPAGNE EXPÉRIMENTALE	48
3.1	Programme d'essai	48
3.2	Essai de déformation permanente (compression cyclique)	48
3.2.1	Procédure expérimentale	50
3.2.2	Traitement des fichiers bruts	51
3.2.3	Les paramètres ESSO	56
3.2.4	Présentation des résultats	58
CHAPITRE 4	DESCRIPTION DES MATÉRIAUX UTILISÉS, DES PROCÉDURES D'ESSAIS ET DE PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES	60
4.1	Matériaux utilisés	60
4.1.1	Gros granulats (particules dont la dimension est supérieure à 5 millimètres)	61
4.1.2	Granulats fins (particules dont la dimension moyenne est inférieure à 5 millimètres)	62
4.1.3	Bitume	63
4.2	Formulation des enrobés utilisés	63
4.2.1	Confection des éprouvettes	65
4.2.2	Caractéristiques des éprouvettes	68
CHAPITRE 5	RÉSULTATS DES ESSAIS DE DÉFORMATION PERMANENTE	72
5.1	Courbes d'essais regroupées selon la fréquence et la contrainte verticale	72
5.2	Synthèse des résultats	76
CHAPITRE 6	ANALYSE DES RÉSULTATS	78
6.1	Calcul des constantes A, B, C, D et F de la loi d'ESSO pour l'enrobé ESG-10	78
6.2	Calcul des constantes A, B, C, D et F de la loi d'ESSO pour l'enrobé EB-14	95
6.3	Indépendance des constantes B, D et F	97
6.3.1	Indépendance de la constante B	98
6.3.2	Indépendance de la constante D	101
6.3.3	Indépendance de la constante F	102
6.4	Simulation de calcul $\dot{\epsilon}_{\text{mesurée}}$ versus $\dot{\epsilon}_{\text{calculée}}$	103
6.4.1	Indice de qualité : IQ	104
6.4.2	$\dot{\epsilon}_{\text{mesurée}}$ versus les différents $\dot{\epsilon}_{\text{calculée}}$	104
6.4.3	Comparaison des indices de qualité	107
CONCLUSION		114
RECOMMANDATIONS		116
ANNEXE I	MÉTHODE DES MOINDRES CARRÉS D'APPROXIMATION	118
ANNEXE II	MÉTHODE INTÉGRALE D'APPROXIMATION	120
ANNEXE III	MÉTHODE D'ÉCHANTILLONNAGE DE MASSE D'ENROBÉS BITUMINEUX À L'USINE D'ENROBAGE	124
ANNEXE IV	ATTESTATION DE CONFORMITÉ DU BITUME	126
ANNEXE V	COURBES DES RÉSULTATS OBTENUS POUR L'ENROBÉ ESG-10 ET TABLEAU DE RÉSULTATS POUR TOUS LES ESSAIS	128

ANNEXE VI	COURBES DES RÉSULTATS OBTENUS POUR L'ENROBÉ EB-14 ET TABLEAU DE RÉSULTATS POUR TOUS LES ESSAIS	133
ANNEXE VII	DÉTAIL DU CALCUL DES CONSTANTES DE L'ENROBÉ EB-14	138
BIBLIOGRAPHIE	149

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau 1.1	Répartition du réseau routier québécois	1
Tableau 1.2	Modèles couramment utilisés pour décrire le comportement à l'orniérage de type fluage des enrobés	23
Tableau 3.1	Conditions d'essais pour chaque enrobé testé	49
Tableau 4.1	Caractéristiques des gros granulats utilisés pour la confection des enrobés ESG-10 et EB-14	62
Tableau 4.2	Caractéristiques des granulats fins utilisés pour la confection des enrobés ESG-10 et EB-14	63
Tableau 4.3	Formulation des enrobés ESG-10 et EB-14	65
Tableau 4.5	Dates de compaction et dates de carottage des éprouvettes d'enrobés EB-14 et ESG-10	68
Tableau 4.6	Caractéristiques physiques et dates de l'essai des éprouvettes d'enrobés EB-14	70
Tableau 4.7	Caractéristiques physiques et dates de l'essai des éprouvettes d'enrobés ESG-10	71
Tableau 5.1	Synthèse des résultats aux essais de déformation permanente pour l'enrobé ESG-10	76
Tableau 5.2	Synthèse des résultats aux essais de déformation permanente pour l'enrobé EB-14	77
Tableau 6.1	Synthèse des constantes calculées (A et B) de l'enrobé ESG-10 avec les constantes correspondantes calculées par Aussedat.....	80
Tableau 6.2	Synthèse des constantes calculées (A, B et C) de l'enrobé ESG-10 avec les constantes correspondantes calculées par Aussedat.....	82
Tableau 6.3	Synthèse des constantes D calculées selon la fréquence pour l'enrobé ESG-10	87
Tableau 6.4	Synthèse des constantes (A, B, C et D) de l'enrobé ESG-10 et celles obtenues par Aussedat.....	88
Tableau 6.5	Synthèse des constantes F calculées selon la température pour l'enrobé ESG-10	94
Tableau 6.6	Synthèse des constantes calculées pour l'enrobé ESG-10	95

Tableau 6.7	Synthèse des constantes calculées pour l'enrobé ESG-10 et EB-14	97
Tableau 6.8	Synthèse des constantes B utilisées pour l'indépendance des constantes.....	98
Tableau 6.9	Fonctions de correction des constantes D utilisées pour les enrobés ESG-10 et EB-14	102
Tableau 6.10	Fonctions de correction de la constante F pour les deux enrobés testés.....	103
Tableau 6.11	Pente $\dot{\epsilon}$ mesurée et calculée à partir des lois de déformation permanente correspondantes de l'enrobé ESG-10.....	105
Tableau 6.12	Pente $\dot{\epsilon}$ mesurée et calculée à partir des lois de déformation permanente correspondantes de l'enrobé EB-14	106
Tableau 6.13	Constantes de chaque loi utilisée dans le calcul des indices de qualité	107
Tableau 6.14	Pente $\dot{\epsilon}$ mesurée et calculée à partir des lois de déformation permanente correspondantes de l'enrobé ESG-10.....	108
Tableau 6.15	Pente $\dot{\epsilon}$ mesurée et calculée à partir des lois de déformation permanente correspondantes de l'enrobé EB-14	109
Tableau 6.16	Synthèse des constantes à priori et optimisée des enrobés ESG-10 et EB-14 ainsi que celles d'Aussedat.....	113

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Classes de comportement du bitume en fonction de la déformation et de la température.	6
Figure 1.2	Courbes isothermes de la norme du module en fonction de la fréquence et la courbe maîtresse approximée par le modèle 2S2P1D.	7
Figure 1.3	Regroupement des trois types d'orniérage pour les chaussées souples.	9
Figure 1.4	Illustration des états de contraintes dans les couches bitumineuses d'une chaussée, à l'aplomb d'une roue simple.	10
Figure 1.5	Chemin de contraintes à différentes profondeurs dans une chaussée en béton bitumineux.	12
Figure 1.6	Principe des essais triaxiaux à chargement répété sur graves non traitées. Exemple de résultats pour $q/p=2$	15
Figure 1.7	Les simulateurs les plus connus.	16
Figure 1.8	Manège de fatigue et différentes configurations de la charge.	18
Figure 1.9	Déformation en fonction du nombre de cycles avec les trois phases de la déformation permanente.	21
Figure 2.1	Courbe ϵ_p de déformation permanente sous chargements cycliques.	28
Figure 2.2	Contraintes, température et taux de déformation permanente types dans la couche 2 d'enrobé bitumineux.	33
Figure 2.3	Variation de la température moyenne de la couche 2 d'un enrobé bitumineux au cours d'une journée.	35
Figure 2.4	Variation du taux d'ornière de la couche 2 d'enrobé bitumineux au cours d'une journée.	35
Figure 2.5	Détail du cumul de l'orniérage partie A.	38
Figure 2.6	Détail du cumul de l'orniérage partie B.	38
Figure 2.7	Pente de la déformation $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_v	40

Figure 2.8	Pente de la déformation $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_v pour trois σ_H différents.....	42
Figure 2.9	Courbe de $a_0^{\sigma_H}$ en fonction de $\Delta \sigma_H$	42
Figure 2.10	Courbe de $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_v pour trois températures différentes.....	44
Figure 2.11	Courbe de $a_0^{\Delta T}$ en fonction du Δ de température.....	45
Figure 2.12	Courbe de $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_v pour trois fréquences différentes.....	46
Figure 2.13	Courbe de a_0^f en fonction de la fréquence.....	46
Figure 3.1	Schématisation des éprouvettes pour l'essai de compression cyclique et localisation des extensomètres.....	51
Figure 3.2	Différents cas de chargement attendu lors de l'application du signal de contrainte imposé.....	52
Figure 3.3	Exemple de signal discret de la contrainte avec son approximation par un signal continue.....	53
Figure 3.4	Exemple de données de déformation sur deux cycles pour un essai type.....	55
Figure 3.5	Exemple de données de β_{EN} pour un essai donné.....	57
Figure 3.6	Exemple de données de la relation de la déformation moyenne totale initiale β_{EN} et le nombre de cycles pour un essai donné.....	58
Figure 5.1	Courbes de résultats aux essais de déformation permanente pour l'enrobé ESG-10.....	74
Figure 5.2	Courbes de résultats aux essais de déformation permanente pour l'enrobé EB-14.....	75
Figure 6.1	Pente de la deuxième phase de la déformation permanente $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_v pour l'enrobé ESG-10 ($\sigma_H = 0$, $T = 30^\circ\text{C}$ et $f_r = 10\text{Hz}$).....	79
Figure 6.2	Pente de la déformation $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_v pour l'enrobé ESG-10 à pour trois confinements différents ($T = 30^\circ\text{C}$; $f_r = 10\text{Hz}$).....	81
Figure 6.3	Courbe de $a_0^{\sigma_H}$ en fonction de σ_H pour l'enrobé ESG-10 ($T = 30^\circ\text{C}$; $f_r = 10\text{Hz}$).....	81

Figure 6.4	Pente de la déformation $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_V pour trois températures différentes ($\sigma_H = 0$; $f_r = 10\text{Hz}$; ESG-10).	83
Figure 6.5	Courbe de $a_0^{\Delta T}$ en fonction de ΔT ($\sigma_H = 0$; $f_r = 10\text{Hz}$; ESG-10).....	84
Figure 6.6	Pente de la déformation $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_V pour trois températures différentes ($\sigma_H = 0$; $f_r = 5\text{Hz}$; ESG-10).	85
Figure 6.7	Courbe de $a_0^{\Delta T}$ en fonction de ΔT ($\sigma_H = 0$; $f_r = 5\text{Hz}$; ESG-10).....	85
Figure 6.8	Pente de la déformation $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_V pour trois températures différentes ($\sigma_H = 0$; $f_r = 1\text{Hz}$; ESG-10).	86
Figure 6.9	Courbe de $a_0^{\Delta T}$ en fonction de ΔT ($\sigma_H = 0$; $f_r = 1\text{Hz}$; ESG-10).....	87
Figure 6.10	Pente de la déformation $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_V pour trois fréquences différentes ($\sigma_H = 0$, $T = 30^\circ\text{C}$; ESG-10).	89
Figure 6.11	Courbe de a_0^f en fonction de f_r ($\sigma_H = 0$, $T = 30^\circ\text{C}$).....	90
Figure 6.12	Pente de la déformation $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_V pour trois fréquences différentes ($\sigma_H = 0$, $T = 40^\circ\text{C}$, ESG-10).	91
Figure 6.13	Courbe de a_0^f en fonction de f_r ($\sigma_H = 0$, $T = 40^\circ\text{C}$, ESG-10).....	92
Figure 6.14	Pente de la déformation $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_V pour trois fréquences différentes ($\sigma_H = 0$, $T = 50^\circ\text{C}$, ESG-10).	93
Figure 6.15	Courbe de a_0^f en fonction de f_r ($\sigma_H = 0$, $T = 50^\circ\text{C}$, ESG-10).....	94
Figure 6.16	Cheminement du calcul des constantes principales de la loi de déformation permanente de l'enrobé EB-14.....	96
Figure 6.17	Tendance de B en fonction de la fréquence.....	99
Figure 6.18	Tendance de B en fonction de la température.....	100
Figure 6.19	Tendance de D en fonction de la fréquence.....	101
Figure 6.20	Tendance de F en fonction de la température.....	102
Figure 6.21	Comparaison des indices de qualité de chaque essai réalisé pour l'enrobé ESG-10.....	110

Figure 6.22	Comparaison des indices de qualité de chaque essai réalisé pour l'enrobé EB-14 (tous les essais).....	111
-------------	---	-----

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AFNOR	Association française de normalisation
APA	<i>Asphalt Pavement Analyzer</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BNQ	Bureau de Normalisation du Québec
EB	Enrobé Bitumineux
ÉCAS	Équivalent de Charge Axiale Simple
ESG	Enrobé Semi-Grenu
FBE	Film de Bitume Effectif
FME	Film de Mastic Effectif
GB	Grave bitume
GNM	Dimension de Grosseur Nominale Maximale qui correspond au tamis de degré supérieur au 1 ^{er} tamis qui retient plus de 10% de particules. (<i>NMAS : Nominal Maximum Aggregate Size - S_n</i> : Grosseur nominale maximale du squelette granulaire)
HDWT	Hamburg Wheel Tracking Device
LA	Los Angeles
LC	Laboratoire des Chaussées
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LUCREB	Laboratoire Universitaire sur les Chaussées Routes et Enrobés Bitumineux
MTQ	Ministère des Transports du Québec
MTS	Mechanical Testing System
<i>N.C.A.T.</i>	<i>National Center for Asphalt Technology</i>
NQ	Normes du Québec

N/A	Non applicable
N/D	Non disponible
NF	Norme Française
n/m	Non mesurable
PCG	Presse à Cisaillement Giratoire
PG	Grade de performance d'un bitume (" <i>Performance Grade</i> ")
SAAQ	Société de l'assurance automobile du Québec
TSRST	Thermal Stress Restrained Speciment Test (test de retrait thermique empêché)
V.A.M	Vides dans les agrégats minéraux
VBA	Visual basic application
V.C.B	Vides comblés par le bitume
WTT	Wheel tracking tester

LISTE DES SIMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

α	Surface spécifique (mm^{-1})
α_c	Pente du signal de déformation
β_c	Constante du signal de déformation
β_{cN}	Constante du signal de déformation au cycle N
β_σ	Constante du signal
ϵ_0	Déformation initiale
ϵ_T	Déformation totale
ϵ_{rev}	Déformation réversible
$\epsilon_{perm}, \epsilon_p$	Déformation permanente
$\dot{\epsilon}$ calculée	Pente de la deuxième phase de la déformation permanente calculée
$\dot{\epsilon}$ mesurée	Pente de la deuxième phase de la déformation permanente mesurée
ΔT	Variation de température ($^{\circ}\text{C}$)
$\Delta\sigma_H$	Variation de la contrainte de confinement
σ_V	Contrainte verticale
σ_H	Contrainte de confinement
φ	Angle de phase
φ_σ	Angle de phase du signal de contrainte
φ_c	Angle de phase du signal de déformation
$^{\circ}$	Degré
$^{\circ}\text{C}$	Degré Celcius
\emptyset	Diamètre
ω	Pulsation
γ_s^{GROS}	Masse volumique sèche du gros granulat (kg/m^3)

γ_{eau}	Masse volumique de l'eau (kg/m ³)
Ω	Orniérage
%	Pourcentage
%/Mc	Pourcent par million de cycles
a_0^f	Valeur initial de la loi de puissance du calcul de la constante F
$a_0^{\Delta T}$	Valeur initial de la loi de puissance du calcul de la constante D
$a_0^{\sigma_H}$	Valeur initial de la loi de puissance du calcul de la constante C
a_c	Amplitude du signal de déformation
a_σ	Amplitude du signal de contrainte
a_T	coefficient de translation
A	Constante de la loi de déformation permanente due à l'effet de contrainte
B	Constante de la loi de déformation permanente due à l'effet de contrainte
C	Constante de la loi de déformation permanente due à l'effet du confinement
cm	Centimètre
cm ³	Centimètre cube
D	Constante de la loi de déformation permanente due à la température
D_b	Densité du bitume
D_{ga}	Densité apparente
D_{gb}	Densité brute d'un granulat
D_{ge}	Densité effective d'un granulat
D_{mb}	Densité brute de l'enrobé compacté
D_{mm}	Densité maximale d'un enrobé
E^*	Module complexe

E1	Module complexe partie réelle
E2	Module complexe partie imaginaire
$ E^* $	Module dynamique (Norme du module complexe)
f_r	Fréquence
F	Constante de la loi de déformation permanente due à la fréquence
g	Gramme
G	Proportion de gros granulat
G^*	Module complexe de cisaillement
H.R.	Humidité Relative
Hz	Hertz
kg	Kilogramme
km/h	Kilomètre par heure
kN	KiloNewton
kPa	KiloPascal
mm	Millimètre
Mc	Million de cycles
MD	Micro-Deval
Mg	Méga Gramme (10^6)
MPa	Méga Pascal
N	Newton Nombre de cycles Nombre de passage d'essieux
n	Nombre d'échantillon
$N_{(6\%)}$	Nombre de cycle pour atteindre 6% de déformation suivant la droite de la deuxième phase

n_g	Nombre de giration
Pa	Pascal
P_b	Pourcentage de bitume dans l'enrobé
P_{ba}	Pourcentage de bitume absorbé par les granulats
P_{bi}	Pourcentage de bitume initial dans l'enrobé
pH	Potentiel hydrogène
s	Écart type
t	Temps
T, θ	Température
TM	Tonne métrique
Tg	Température de transition vitreuse
μm	Micromètre
V	Vitesse
v_{be}	Volume de bitume effectif
\bar{x}	Moyenne

INTRODUCTION

Entre les années 1965 et 1975, la valeur du parc autoroutier québécois a doublé, passant ainsi de 8 milliards \$ à 16 milliards \$. De 1977 à 1995, la valeur du réseau est demeurée stable approximativement à 18 milliards \$. Ces valeurs sont actualisées en dollars de 1995. Près de la moitié du réseau routier fut construit il y a environ 40 à 50 ans.

Le réseau routier québécois contient plus de 183 milliers de kilomètres de différents types de chaussée répartis selon la classification fonctionnelle décrite au Tableau 1.1. Parmi ces types de chaussée, il y a les chaussées non revêtues (sans liant), les chaussées rigides (liant hydraulique), les chaussées souples (liant hydrocarboné) et finalement les chaussées mixtes (béton de ciment recouvert d'enrobé bitumineux).

Tableau 1.1

Répartition du réseau routier québécois

Type de routes	Kilomètres
Autoroutes	4 853
Routes nationales	9 640
Routes régionales	5 597
Routes collectrices	7 737
Routes locales	40 076
Rues	50 000
Routes d'accès aux entreprises	65 426
Total	183 329

Source : Ce tableau est tiré d'un recueil de données statistiques du MTQ, *Les transports au Québec*, p. 24. (MTQ 200)

Depuis sa mise en service, divers défauts de surface se sont développés en particulier sur les chaussées souples. Parmi ces défauts, les plus communs sont la fissuration longitudinale

et transversale, l'orniérage et la fissuration par fatigue. Les variations de température, le passage de véhicules lourds et les conditions climatiques sont les principales causes de ces défauts sur les chaussées souples.

Plusieurs chercheurs se sont penchés sur les types de défauts retrouvés dans les chaussées. Un problème très fréquent est la fissuration observée sur la chaussée. Ce problème est entre autres créé par les écarts de température générant ainsi des contraintes dans les couches bitumineuses. Les écarts de température peuvent être journaliers sur l'ensemble du réseau ou différentiels sur une portion du réseau. Il y a également des problèmes dans les matériaux bitumineux lorsqu'il y a de la fatigue ou de l'orniérage dans les couches bitumineuses.

Les conditions climatiques rigoureuses qui prévalent au Québec durant une année aggravent l'ampleur des défauts apparents dans les chaussées. Les grands écarts de température observés au cours d'une journée ou durant l'année rendent encore plus difficile le maintien du bon état du réseau routier québécois.

Ces différents défauts sont le fruit de la sollicitation induite par la circulation et les variations de température. La température est un phénomène incontournable. Par contre, en ce qui concerne la circulation, on remarque que le nombre de véhicules sur les routes ne cesse d'augmenter. Et contrairement à la croyance populaire, de 2000 à 2003, ce n'est pas le nombre de camions (baisse de 0,2 %) qui a augmenté mais plutôt le nombre d'automobiles (augmentation de 5,5 %) (SAAQ 2005-1). Le nombre de camions (masse de 4,5 tonnes et plus) enregistrés au Canada a atteint 660 450 unités versus 17,8 millions d'unités pour les voitures (< 4,5 tonnes) en 2003 comparativement à 661 446 camions et 16,8 millions de voitures pour l'année 2000. Par contre, le kilométrage par unité montre que les camions effectuent au moins quatre fois la distance que chaque automobile effectue annuellement. Cette dernière donnée est particulièrement critique sachant que le passage d'un véhicule lourd standard (ÉCAS) est équivalent en terme d'endommagement à plus de 40 000 voitures.

Par contre, malgré cette légère baisse du nombre de camions sur les chaussées, le tonnage véhiculé par les transporteurs au Québec a crû de 158 % avec une augmentation des tonnes-kilomètres sensiblement du même ordre (SAAQ 2005-2).

Par ailleurs, il est important de noter que le pourcentage d'accidents relié au transport routier au Québec a augmenté de 0,8% en 2004 par rapport à 2003 pour atteindre un total de 142 877 accidents (56 535 victimes d'accidents) (SAAQ 2005-2).

De plus, le taux d'accidents mortels a également augmenté de 3,9% pour cette même période (total de 647 décès). De ce nombre, au moins 30% des accidents est directement relié aux conditions de la chaussée (ornières et uni de surface). Les indemnités et les contributions versées aux services de santé reliées aux accidents de la route totalisaient, pour l'année 2004 seulement, un total de 975 645 000 \$. (SAAQ 2005-1)

Au Québec, le réseau routier géré par le Ministère des Transport du Québec (MTQ) est plus ou moins 29 000 km et les sommes d'argent investies dans ce dernier sont largement insuffisantes pour le maintenir en bon état, puisque le ratio de dollars investi par kilomètre ($\pm 30\ 300$ \$/km) demeure relativement peu élevé. (MTQ 2005)

L'orniérage est un défaut de surface qui ne fait qu'augmenter le risque d'accident sur le réseau routier. En effet, la présence d'ornière sur la chaussée une journée de pluie retient l'eau et peut causer l'aquaplanage des véhicules qui y circulent.

Cette étude traitera de la déformation permanente des enrobés bitumineux : l'orniérage des chaussées souples. L'orniérage est relié à la déformation permanente de l'enrobé en surface de la chaussée suite au passage répété des véhicules. La déformation permanente est un sujet préoccupant de nos jours et plusieurs chercheurs ont étudié le comportement du matériau en vue de comprendre davantage les mécanismes en jeu.

Parmi les diverses études traitant de la déformation permanente des enrobés bitumineux analysées, quelques modèles de prédiction ont été répertoriés, comme les méthodes VESYS, AASHTO 2002 et ESSO.

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous concentrerons sur l'étude de l'applicabilité de la méthodologie ESSO dans le contexte québécois avec l'objectif de déterminer la loi d'ESSO pour deux enrobés bitumineux couramment utilisés au Québec.

Au Québec, l'essai d'orniéreur est le seul critère d'acceptation d'un enrobé bitumineux sur sa performance à résister à l'orniérage. Aucun modèle de comportement n'est utilisé pour caractériser l'aptitude à un matériau de résister à la déformation permanente.

La méthodologie ESSO fut développée en France au cours des années 70. Brièvement, cette approche permet de cerner, à partir d'essais de compression cyclique sur éprouvette cylindrique, les paramètres déterminants d'un enrobé vis-à-vis sa déformabilité plastique (déformation non réversible : déformation permanente). La méthodologie ESSO permet de décrire l'évolution de la déformation permanente à la surface de la chaussée en service en suivant une approche systémique, prenant en compte l'ensemble des couches d'une chaussée et les conditions de sollicitation (température et chargement). Dans le cadre de ce mémoire, des essais ont été réalisés pour paramétrer le modèle de déformation permanente ESSO pour des enrobés types couramment utilisés au Québec en vue de prédire l'évolution de l'orniérage de ces enrobés dans les conditions du Québec.

Ce mémoire est divisé en sept (7) chapitres. Le premier chapitre fait le point sur la littérature relative aux enrobés bitumineux, la notion principale abordée étant la déformation permanente. Le second chapitre décrit en détail la méthodologie de prédiction de la déformation permanente développée par ESSO. Le troisième et le quatrième chapitres présentent la campagne expérimentale et la description des matériaux testés. Les résultats sont ensuite présentés au chapitre cinq et analysés au chapitre six. Finalement, la conclusion et les recommandations font l'objet du dernier chapitre.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce chapitre fait le point sur la littérature disponible en lien avec le sujet traité dans le cadre de cette étude. Il traitera des sujets concernant la déformation permanente de chaussées bitumineuses.

1.1 Introduction aux enrobés bitumineux

La majorité du réseau routier québécois est revêtu de chaussées souples (Gouvernement du Québec 2007). Les enrobés bitumineux se caractérisent par l'utilisation de matériaux granulaires de petites et grandes dimensions allant rarement au-delà de 20 millimètres. L'enrobé bitumineux possède les propriétés des matériaux qui le composent. Ces matériaux sont les granulats et le bitume. Les particules du squelette granulaire sont retenues les unes aux autres par un liant, le bitume. Les propriétés mécaniques du bitume jouent un rôle important dans la rhéologie de l'enrobé.

Les propriétés mécaniques du bitume varient fortement en fonction de la température. Le bitume est dit thermosensible (Corté et Di Benedetto 2005). À très haute température ($>150^{\circ}\text{C}$), il se comporte tel un liquide newtonien, peu visqueux. En dessous, de -20°C , le bitume est rigide et agit comme un solide vitreux élastique et fragile. Dans la plage de température restante (-20°C à $+150^{\circ}\text{C}$), son comportement est un mélange de ceux cités ci-dessus. Il présente alors un comportement viscoélastique linéaire et/ou non linéaire. La Figure 1.1 montre les différentes classes de comportement du bitume selon la déformation de ce dernier et de la température.

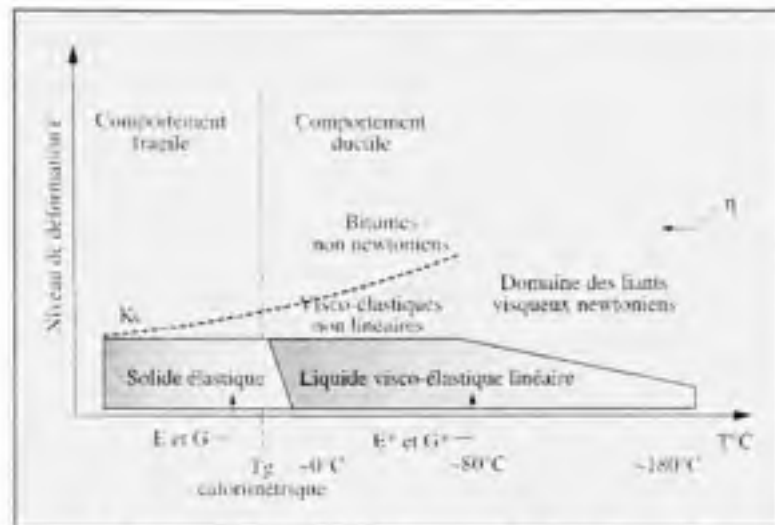


Figure 1.1 Classes de comportement du bitume en fonction de la déformation et de la température.

Source : Cette figure a été tirée du livre *Matériaux routier bitumineux 1*, p. 68. (Corté et Di Benedetto 2005)

Le comportement mécanique du liant est également sensible à la fréquence de sollicitation du matériau. Il s'agit ici de la susceptibilité cinétique. Elle est due au caractère visqueux du bitume. Par exemple, lors d'un essai de module complexe sur le bitume, pour une même température de sollicitation, le module du bitume est plus élevé lorsque la fréquence est élevée et le module est plus petit à basse fréquence (Corté et Di Benedetto 2005). Ce même phénomène sera observable dans les enrobés bitumineux dû aux propriétés visqueuses que le bitume apporte à l'enrobé.

Cette sensibilité du comportement mécanique du bitume vis-à-vis de la température et de la vitesse de sollicitation (temps de chargement), peut être interreliée et décrite par ce qui est convenu d'appeler le principe d'équivalence Temps - Température. Ce principe est utilisé avec les enrobés bitumineux. Les résultats de modules peuvent ainsi être ramenés sur une courbe maîtresse pour une température quelconque où toutes les gammes de fréquence - température sont reportées à l'aide de coefficients de translation a_T (Corté et Di Benedetto 2005). Ce coefficient varie pour chaque température et est égale à l'unité pour la température de référence.

Le principe d'équivalence Temps - Température est défini dans le contexte d'un essai de module complexe. Le module d'un enrobé obtenu pour une température et une fréquence

de sollicitation donnée peut également être obtenu à l'aide d'un autre couple température et fréquence. La relation entre les deux couples est obtenue à partir d'un coefficient a_T . Le comportement de l'enrobé bitumineux peut alors être représenté par une courbe unique (plan Cole-Cole ou espace de Black) qui n'est influencée ni par la température, ni par la fréquence.

Cette équivalence permet de réduire les courbes isothermes en une seule courbe à des températures de référence et de définir les modules de l'enrobé pour une plage de fréquences équivalentes beaucoup plus vaste que celle offerte par les équipements de laboratoire actuels. La courbe maîtresse est alors constituée des translations parallèles à l'axe des fréquences.

La courbe du module de l'enrobé peut donc être paramétrée par une seule variable en fonction de la fréquence et de la température et permet d'obtenir des valeurs de module pour des fréquences inaccessibles par l'expérimentation. La Figure 1.2 présente les courbes isothermes ainsi que la courbe maîtresse approximée par le modèle rhéologique 2S2P1D pour un enrobé bitumineux ESG-10 (PG 70-28).

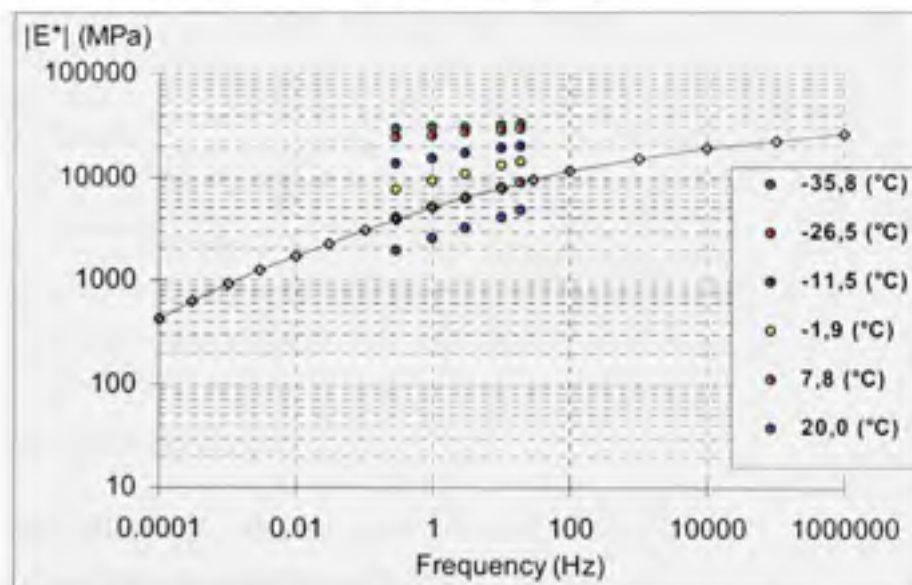


Figure 1.2 *Courbes isothermes de la norme du module en fonction de la fréquence et courbe maîtresse approximée par le modèle 2S2P1D.*

1.2 Théorie de l'orniérage (types d'ornières)

Dans un premier temps, il est important de mentionner que le terme orniérage sera utilisé dans ce document dans le contexte des chaussées bitumineuses. Visuellement, la déformation permanente générée par le passage d'un véhicule est non perceptible en surface. C'est la répétition de la charge appliquée sur la chaussée qui permet la visualisation de la déformation causée par le passage des véhicules. L'orniérage désigne la déformation permanente laissée dans le profil transversal de la chaussée. Il est généré par et croit avec l'action répétée du passage de véhicules.

Sur les chaussées en enrobé bitumineux, les déformations permanentes sont généralement classifiées suivant deux principaux types, soit :

- ornières à grand rayon
- ornières à petit rayon

1.2.1 Ornières à grand rayon

Les ornières à grand rayon représentent la déformation permanente perceptible sous forme d'un grand rayon à la surface des voies de la chaussée. Elle est causée entre autres par la faible capacité du sol support à résister aux charges appliquées à la surface de la chaussée par les véhicules. Alors, la couche d'enrobé bitumineux suit le tassement des couches supports et l'ornière à grand rayon apparaît dans chacune des voies, en surface de la chaussée. La Figure 1.3 a) illustre ce phénomène.

1.2.2 Ornières à petit rayon

Les ornières à petit rayon présentent une déformation permanente suivant un petit rayon à la surface de la chaussée localisé dans les traces de roues. Dans ce cas, les couches supports ne subissent aucune déformation générée par les charges roulantes. Il s'agit essentiellement de la couche d'enrobé qui se déforme de façon irréversible sous la trace de roue. Ce type d'ornière est causé par deux phénomènes importants. Le premier est la

post compaction de l'enrobé suite à sa pose en chantier. Elle crée alors des petites ornières ne dépassant pas la largeur de la roue qui y circule. La Figure 1.3 b) montre ce phénomène. Le deuxième étant lié à l'incapacité de l'enrobé à résister à la déformation permanente, ce qui se traduit par la mobilisation du squelette granulaire. Il y a déplacement du matériau et la formation de bourrelets de chaque côté de la dépression est observable. Il s'agit ici, d'une dégradation de l'enrobé bitumineux qui ne peut résister au cumul des déformations générées par le passage répété des charges roulantes. Ce phénomène est présenté à la Figure 1.3 c).

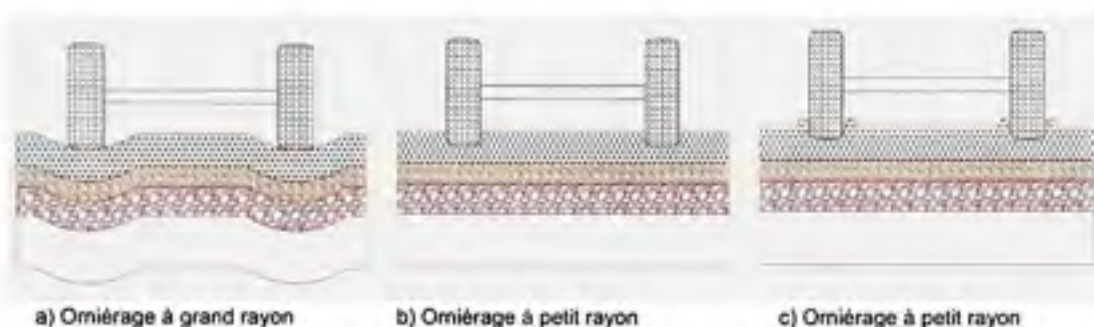


Figure 1.3 Regroupement des trois types d'orniérage pour les chaussées souples.

1.3 Sollicitations induites par le trafic routier dans les enrobés bitumineux

Le passage des véhicules sur les chaussées fait ressortir deux types de sollicitation. Une sollicitation unique qui consiste à vérifier les contraintes au travers de la chaussée à l'aplomb d'une charge simple. Une seconde sollicitation plus complexe ajoute l'impact des charges roulantes sur leur chemin de contrainte. Il est également essentiel de connaître la nature des sollicitations mécaniques produisant les déformations permanentes dans les couches d'enrobé bitumineux.

1.3.1 Les états de contrainte à l'aplomb d'une charge simple

Afin d'avoir une idée de la complexité de l'état de contrainte dans les couches bitumineuses d'une structure de chaussée souple, on peut dans un premier temps considérer les couches bitumineuses comme un milieu continu. Notamment, en

considérant l'approche multicouche développée par Burminster, on peut mettre en relief l'effet d'une charge sur l'état de contrainte dans la structure de chaussée ainsi idéalisée. En utilisant les hypothèses suivantes : 1) le matériau bitumineux est considéré comme étant élastique linéaire, 2) l'empreinte de la charge circulaire a un rayon $R = 12,5$ cm et 3) une pression de contact équivalant à $0,662$ MPa. Le calcul selon l'approche de Burminster peut être réalisé à l'aide du logiciel Alizé qui met en application l'approche développée par Burminster. La Figure 1.4 montre le résultat d'une telle analyse en considérant l'application d'une charge statique appliquée en surface.

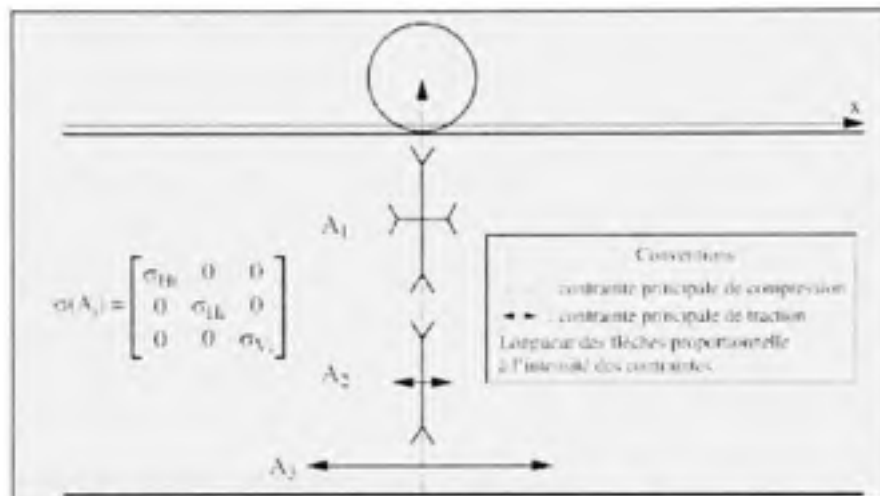


Figure 1.4 Illustration des états de contraintes dans les couches bitumineuses d'une chaussée, à l'aplomb d'une roue simple.

Source : Cette figure a été tirée du livre *Matériaux routiers bitumineux 2*, p. 178. (Di Benedetto et corté 2005)

La figure 1.4 illustre le champ de contraintes en fonction de la profondeur à l'aplomb d'une charge simple. Dans un premier temps, on constate que le champ de contraintes varie suivant la profondeur. Trois états de contraintes distincts sont visibles en fonction de la profondeur de la couche analysée. Les états de contraintes des points A1, A2 et A3 peuvent être décrits comme suit :

$\sigma_{V1} \geq \sigma_{H1} \geq 0$ ¹ : En A_1 , il y a un tassement du matériau suivant la direction verticale et une dilatation dans le sens horizontal et le matériau est soumis à une compression dans l'axe vertical et horizontal.

$\sigma_{H3} \leq 0; \sigma_{V3} \approx 0$: En A_3 , la couche d'enrobé bitumineux agit avec les mêmes caractéristiques qu'une plaque soumise à de la flexion. La contrainte verticale est près de zéro et la contrainte horizontale agit en traction.

$\sigma_{V2} \geq 0 \geq \sigma_{H2} \approx -\sigma_{V2} / 2$: En A_2 , c'est la transition entre les 2 modes de sollicitations. La contrainte verticale est toujours en compression mais diminue en fonction de la profondeur et il y a un début de traction dans l'axe horizontal du matériau.

Il faut noter que les sollicitations induites par le trafic routier sont beaucoup plus complexes qu'un état de contrainte à l'aplomb d'une charge simple. Les essieux multiples, tandem ou tridem augmentent considérablement l'état de contraintes sous ces cas de chargement. L'application du chargement sur la route est réalisée par le passage de véhicule roulant qui fait varier le chemin de contraintes.

1.3.2 Charges roulantes et chemins de contraintes

L'examen des états de contraintes suivant l'analyse simplifiée présentée précédemment n'illustre que partiellement le fonctionnement des couches bitumineuses dans la structure de la chaussée. Il faut nécessairement tenir compte de l'évolution du chargement créé par les charges roulantes. Ce phénomène fait varier les directions principales du tenseur des contraintes et des variations d'intensité dans les contraintes principales. La Figure 1.5 montre ces variations.

¹ Notons que la charge positive est ici associée à un effet de compression.

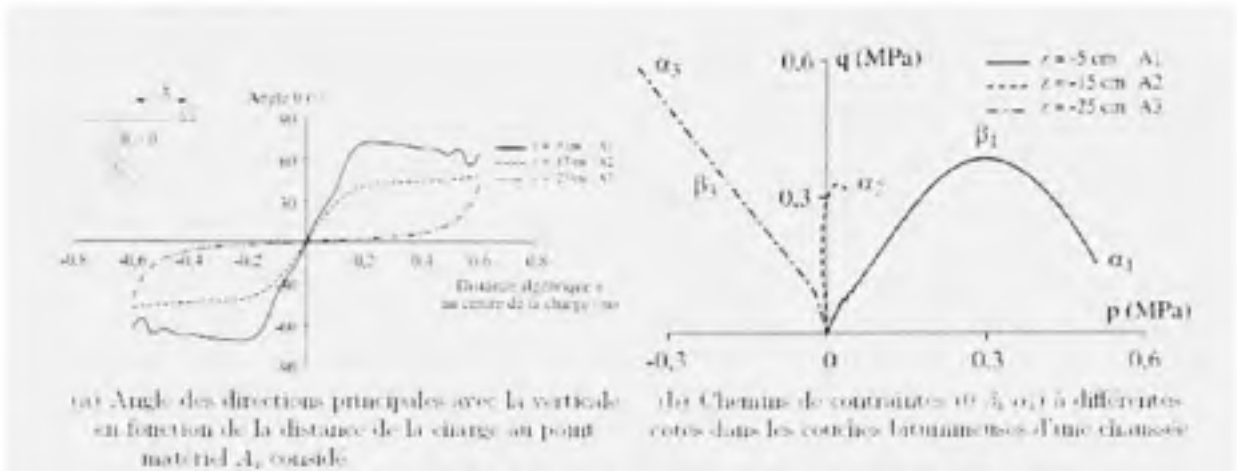


Figure 1.5 Chemin de contraintes à différentes profondeurs dans une chaussée en béton bitumineux.

Source : Cette figure a été tirée du livre *Matériaux routiers bitumineux 2*, p. 180. (Di Benedetto et Corté 2005)

Sur la figure 1.5b montre en fonction de la profondeur l'évolution du chemin de contraintes selon les axes p et q . Les paramètres p et q_{oct} sont respectivement la pression moyenne et la contrainte octaédrique appliquées sur l'éprouvette. Suivant la convention de la mécanique des sols, les composantes sont négatives en traction et positives en compression. Les paramètres p et q_{oct} sont deux invariants appropriés à l'interprétation des essais triaxiaux de révolution où p et q correspondent respectivement à :

$$p = \frac{2\sigma_H + \sigma_V}{3} \quad \text{et} \quad q = \sqrt{2/3} q_{oct} = |\sigma_V - \sigma_H| \quad (1.1)$$

1.3.3 Nature des sollicitations mécaniques à l'origine des déformations permanentes dans les enrobés bitumineux

Les sollicitations mécaniques internes générant les déformations permanentes dans les chaussées en béton bitumineux sont très complexes. Elles se caractérisent par les principaux critères suivants (Corté et Di Benedetto 2005) :

- L'alternance de charge et décharge à chaque passage de roue;
- Le trajet de contraintes déviatoriques dans le plan (p, q) , accompagné de rotations de contraintes prononcées au passage des essieux;

- Les importantes variations qualitatives et quantitatives de ces trajets de chargements, en fonction de la cote considérée dans la structure de la chaussée.

Les traits principaux précédents n'illustrent que partiellement la complexité des sollicitations réelles générées par la circulation des véhicules dans les couches d'enrobé bitumineux. Plusieurs modes de sollicitation viennent s'ajouter à ces principaux traits, en plus du comportement visqueux de l'enrobé. Également, la présence d'effort de cisaillement à la surface de la chaussée aux zones de freinage et dans les pentes, l'interaction des charges voisines dans le cas d'essieux multiples ou jumelés, (etc). sont autant d'éléments à considérer qui vont influencer la déformation permanente de l'enrobé.

1.4 Origine physique des déformations permanentes (déformation réversible et non réversible)

Lors de l'application d'une charge sur la chaussée, une déformation est générée. Utilisant l'hypothèse des petites déformations, la déformation est décomposée en une portion réversible et une autre irréversible.

1.4.1 Nature incrémental des déformations irréversibles

En utilisant l'hypothèse des petites déformations, la déformation d'un enrobé bitumineux peut être présentée sous la forme suivante (Corté et Di Benedetto 2005) :

$$\delta \bar{\epsilon}(t) = \delta \bar{\epsilon}^{rev}(t) + \delta \bar{\epsilon}^{perm}(t) \quad (1.2)$$

La petite déformation est mesurée par rapport au temps. Cette déformation se décompose en une composante réversible et une composante irréversible dites permanentes. L'orniérage est essentiellement le reflet de la portion permanente de la déformation.

$$\bar{\epsilon}^{perm}(t) = \sum_{\text{chargements}} \delta \bar{\epsilon}^{perm}(t) \quad (1.3)$$

La déformation permanente d'un cycle de chargement est difficilement mesurable et c'est l'effet de cumul des cycles de chargement qui rend mesurable la déformation permanente en cours. Il faut noter que la fréquence de chargement a une influence sur l'impact de la

déformation permanente pour le chargement en question. Plus la fréquence de sollicitation est faible plus la déformation permanente augmente. Par le fait même, le dommage généré par cette application est élevé par rapport à une fréquence plus rapide (Corté et Di Benedetto 2005).

1.4.2 Rôle du bitume et du squelette granulaire dans l'origine des déformations permanentes

Rôle du bitume

Les bitumes sont des matériaux viscoélastiques fortement thermo susceptibles. Leur comportement s'apparente à celui d'un fluide à haute température et à des vitesses de sollicitations faibles. C'est ce caractère fluide qui est principalement associé à la déformation permanente des enrobés bitumineux. Le liant joue un rôle important dans le déplacement du squelette minéral. La réorganisation des granulats est possible seulement lorsque le liant le permet.

Rôle du squelette granulaire

Vu leur agencement, les matériaux granulaires jouent un rôle important dans la déformation permanente des enrobés bitumineux. Leur rôle peut être expliqué en partie par analogie avec le comportement des matériaux granulaires non liés. Des essais au triaxial réalisés sur des matériaux granulaires non liés montrent que le nombre de cycles de chargement joue un rôle important dans le processus de la déformation permanente du matériau. Plus le nombre de cycle augmente, plus les matériaux granulaires non liés tendent à se déformer. La Figure 1.6 illustre le principe de l'essai triaxial et l'effet de cyclage sur le matériau analysé.

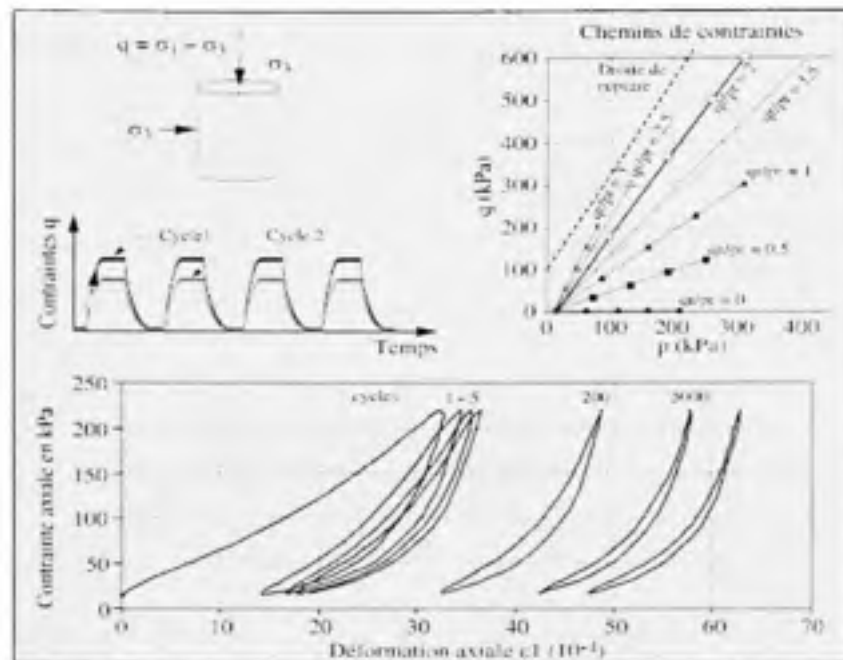


Figure 1.6 Principe des essais triaxiaux à chargement répété sur graves non traitées. Exemple de résultats pour $q/p=2$.

Source : Cette figure a été tirée du livre *Matériaux routiers bitumineux 2*, p. 185. (Di Benedetto et Corté 2005)

1.5 Essais caractérisant la déformation permanente des enrobés bitumineux

Plusieurs essais permettent une caractérisation plus ou moins précise de la déformation permanente des enrobés bitumineux. Ils se divisent en deux catégories principales, soient : 1) les essais de simulation et 2) les essais de caractérisation.

1.5.1 Les essais de simulation

Les essais de simulation permettent de simuler le comportement à petite échelle ou à dimension réelle des enrobés bitumineux. Il y a plusieurs essais permettant de simuler le cumul de la déformation permanente dans les chaussées composées d'enrobés bitumineux. Le fait de simuler le passage d'un essieu dans un essai de simulation ne garantit pas un comportement identique sur un même matériau dans la chaussée. Il est impossible de simuler en totalité les conditions dans lesquelles sont soumis les mélanges bitumineux dans la chaussée.

Simulateur de trafic

Il existe plusieurs simulateurs de trafic à travers le monde qui permettent de simuler le passage d'un essieu simple sur une plaque d'enrobé (Wheel Tracking Tester : WTT). Des éprouvettes sont au préalable compactées à l'aide du compacteur à pneus par action de pétrissage ou prélevées directement en chantier. Parmi ces simulateurs, la Figure 1.7 montre les plus connues.

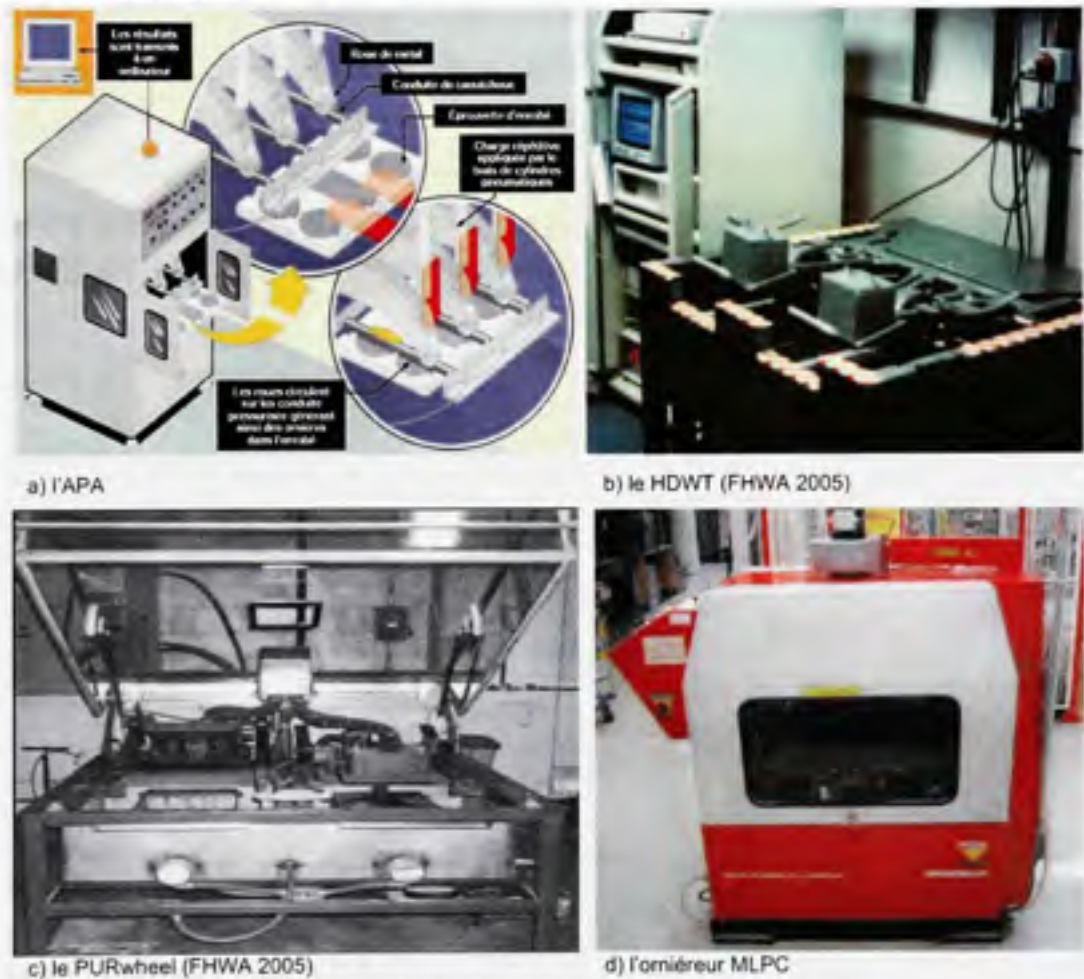


Figure 1.7 Les simulateurs les plus connus.

Ces essais sont plus ou moins représentatifs de la déformation réelle retrouvée sur les réseaux routiers. Ils demeurent cependant de bon indicateur de résistance à l'orniérage pour les conditions d'essais des simulateurs de trafic.

Manège de fatigue LCPC

Le manège de fatigue du LCPC est utilisé depuis 1984 sur le site du LCPC de Nantes en France. Le site dispose de trois anneaux de rayon moyen correspondant à 19,5 m. Le manège est formé d'une tourelle centrale et de quatre bras sur lesquels peuvent être disposées des charges roulantes. Les charges roulantes peuvent également être combinées pour réaliser des essieux simples, tandem ou tridem à une roue ou à roues multiples, afin de représenter la configuration des essieux des véhicules lourds sur les chaussées. Le manège permet de faire circuler les charges à une vitesse allant jusqu'à 100 km/h. La Figure 1.8 illustre le manège de fatigue de Nantes et différentes configurations possibles de ce dernier. Le manège permet entre autres de simuler l'effet et les efforts reliés à la fatigue et à l'orniérage sur les matériaux étudiés et mise en œuvre à l'aide d'un finisseur et de rouleaux compacteurs.



Figure 1.8 Manège de fatigue et différentes configurations de la charge.

Source : Ces photos ont été reçues par courriel le 24 octobre 2007 par l'entremise de Juliette Sohm travaillant au LCPC de Nantes.

1.5.2 Les essais de caractérisation

Les essais de caractérisation permettent de connaître les paramètres intrinsèques de matériaux donnés, chacun possédant ses propres caractéristiques. Ces essais sont dits homogènes.

Fluage statique en compression simple

Une éprouvette de forme cylindrique est soumise à une charge de compression uniaxiale. La contrainte appliquée et la température sont constantes au cours de l'essai. La déformation longitudinale est mesurée en fonction du temps.

Le résultat obtenu au cours d'essais permet alors de mesurer le module sécant qui correspond au rapport entre la contrainte et la déformation obtenue au cours du temps.

$$S(t, \theta, \sigma) = \frac{\sigma(t)}{\epsilon(t)} \quad (1.4)$$

Diverses relations entre le module sécant et l'aptitude des enrobés bitumineux à résister aux déformations permanentes ont été développées. La société pétrolière Shell propose une méthode quantitative de résistance à l'orniérage pour les enrobés bitumineux à partir des résultats de l'essai de fluage statique en compression simple. Les données de l'essai de fluage sont croisées avec les propriétés thermoviscoélastiques du bitume contenues dans l'enrobé examiné (Di Benedetto et Corté 2005).

Le mode de chargement utilisé au cours de cet essai diffère des sollicitations complexes réellement obtenues dans le phénomène d'orniérage. Il devient alors difficile de quantifier et de comprendre les mécanismes de déformation permanente dû à un manque d'informations utiles pour comprendre ces mécanismes.

Essais homogènes à chargement répété

Les essais homogènes à chargement répété sont habituellement réalisés sur des éprouvettes de forme cylindrique. L'éprouvette est soumise à un chargement axial de forme sinusoïdale ou en créneau. Les échantillons peuvent être obtenus par carottage in situ, de plaques réalisées au compacteur MLPC en laboratoire ou encore obtenus à partir de la presse à cisaillement giratoire.

Par rapport aux essais de fluage statique, ceux-ci permettent de ramener les aspects essentiels des sollicitations in situ. L'application d'une répétition de charge décharge sur l'enrobé joue un rôle majeur dans l'évolution de la déformation permanente des matériaux bitumineux.

Par rapport aux essais d'orniéreurs, les essais à chargement cyclique permettent de connaître le comportement des enrobés pour des contraintes, des fréquences de sollicitation et des températures plus variables que celles des orniéreurs. Cependant, ces essais ne permettent pas d'étudier l'effet des rotations de contrainte qui se retrouve dans les conditions réelles.

Essai de compression simple répété sans confinement

Cet essai consiste à soumettre une éprouvette cylindrique à une sollicitation de compression sous forme sinusoïdale ou en créneau.

L'interprétation typique des résultats de ce type d'essai permet de représenter la déformation permanente en fonction du nombre de cycles d'application. La déformation observée présente trois phases. La première dans laquelle la pente de la déformation diminue avec le nombre de cycles jusqu'à un certain niveau où la pente demeure stable (la deuxième phase). La déformation permanente mesurée pour chacun des cycles est identique durant cette phase et une troisième phase où la vitesse augmente jusqu'à la rupture du matériau. La Figure 1.9 montre les trois phases de la déformation dans un essai de compression simple répété sans confinement.

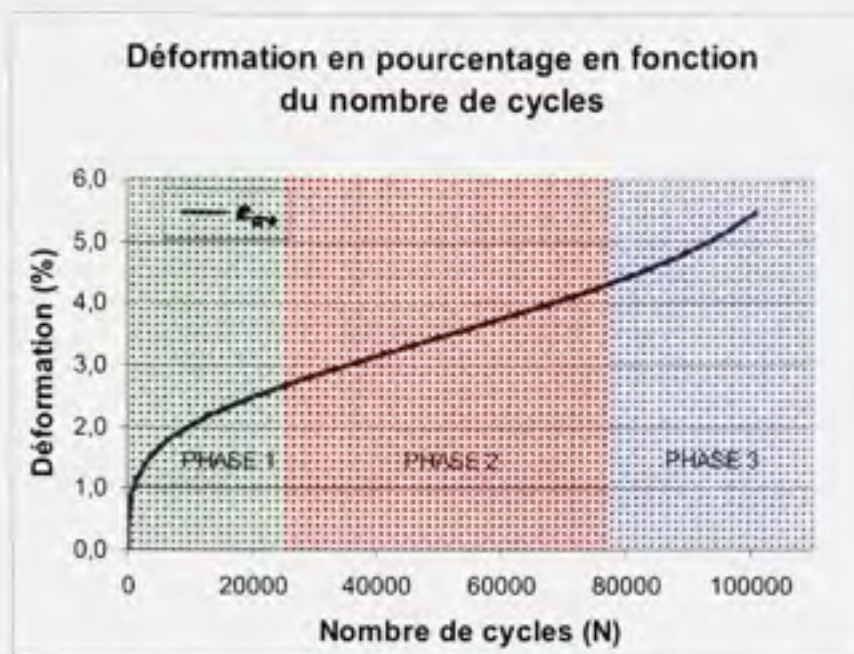


Figure 1.9 Déformation en fonction du nombre de cycles avec les trois phases de la déformation permanente.

Ces essais sont beaucoup plus représentatifs du comportement de l'orniérage dans les enrobés bitumineux que les essais de fluage statique à cause de la répétition de chargement. Dû à l'absence de confinement, ces essais semblent insuffisants dans la représentation de certains matériaux bitumineux. Les enrobés drainants et à squelette granulaire fort sont reconnus comme stables pour les couches de roulement de chaussée et la capacité à résister à l'orniérage se voit pénalisée lors de la réalisation d'essai de compression sans confinement latéral. La première phase est associée au comportement d'un enrobé à un essai de fluage. C'est la répétition de cycles de chargement qui permet d'atteindre la portion linéaire (Phase 2).

Essai de compression simple répété à confinement constant

Cet essai consiste à soumettre une éprouvette cylindrique à une sollicitation de confinement fixe sur les parois du spécimen, appelé σ_H , jumelé à une compression axiale variable σ_V généralement sous forme sinusoïdale. La contrainte de confinement est

toujours sous forme de compression donc $\sigma_H > 0$ et la contrainte de compression σ_V est toujours plus grande que la contrainte appliquée pour confiner l'éprouvette ($\sigma_V > \sigma_H$).

En cours d'essai, les déformations volumiques dans l'axe longitudinal et tangentiel ou radial sont enregistrées. Il est souhaitable d'effectuer des temps de repos entre différents cycles de chargement. Cela permet au matériau d'atteindre une certaine recouvrance et les portions réversibles et irréversibles peuvent être analysées en cours d'évolution de l'essai.

Essai de compression simple répété à confinement variable

De même que l'essai de compression simple à confinement constant, dans l'essai répété à confinement variable, l'éprouvette est soumise à des sollicitations de compression verticale et de confinement variable. Les cycles de chargement des deux modes de sollicitation peuvent être avec ou sans déphasage l'une par rapport à l'autre. La contrainte σ_V doit être maintenue plus grande que σ_H pour éviter les problèmes de décollement de l'échantillon en cours de chargement.

1.6 Méthodes de prédiction de déformation permanente

La littérature, présente plusieurs méthodes développées pour prédire la déformation permanente des enrobés bitumineux. Certains estiment l'évolution de la déformation permanente en fonction du nombre de cycles de chargement, d'autres en fonction des contraintes appliquées. D'autres ont combiné le nombre de cycles de chargement et les contraintes appliquées pour développer leurs modèles de prédiction.

Le Tableau 1.2 montre divers modèles de prédiction de la déformation permanente classés en fonction des critères utilisés lors du développement de ces modèles. De tous les modèles présentés dans ce tableau, le modèle ESSO de prédiction sera celui utilisé dans cette étude. La modèle ESSO de prédiction a été retenue puisqu'il tient compte des deux premières phases du processus de déformation permanente. Il sera expliqué en détail au chapitre 2.

Tableau 1.2

Modèles couramment utilisés pour décrire le comportement à l'orniérage de type fluage des enrobés

Type	Description	# éq	Référence
Semi-log	Barksdale	(1)	Barksdale 1972
		(2)	
Loi de puissance	$\epsilon_p = a_1 + b_1 \log N$ $\epsilon_{pn} = \frac{b_1}{N} \quad (N > 1)$	(3)	Monismith et coll. 1975
Loi de puissance	$\epsilon_p = aN^b$	(4)	Majidzadeh et coll. 1980
Régression pure	$\log \epsilon_p = C_0 + C_1(\log N) + C_2(\log N)^2 + C_3(\log N)^3$	(5)	Monismith et coll. 1975
Loi de puissance	$\epsilon_1^p(N) = A \left[1 - \left(\frac{N}{100} \right)^{-B} \right] + \epsilon_1^p(100)$	(6)	Hornych 1993
Log-log	$\log(\epsilon_1^p(N)) = a + b \log(N)$	(7)	Sweere 1990
Loi de puissance	$\log \epsilon_p = \log \epsilon_p(1) + S \cdot \log N$	(8)	Lytton et coll. 1993

Tableau 1.2

Modèles couramment utilisés pour décrire le comportement à l'ornièrage de type fluage des enrobés (suite)

Type	Description	# éq	Référence
Loi de puissance	Shenton $\epsilon_1^p = K * \left(\frac{q_{MAX}}{\sigma_3} \right)^a$	(9)	Shenton 1974
Loi de puissance	Lekarp $\frac{\epsilon_1^p(N_{REF})}{(L/p_0)} = a * \left(\frac{q}{p} \right)_{MAX}^b$	(10)	Lekarp 1997
Loi de puissance	VESYS $\epsilon_{pn} = \mu * \epsilon_r N^{-a}$	(11)	Kenis 1977
Loi de puissance	AASHTO 2002 $\log \frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = \log C + 0,4262 * \log N$	(12)	Witczak 2001
Loi de puissance	TSENG & LYTTON $\epsilon_p = \epsilon_0 e^{-(p/N)^p}$ $\epsilon_{pn} = \epsilon_0 \beta p^\beta \frac{N^p \sqrt{A}}{N^{(\beta+1)}}$	(13)	Tseng et Lytton 1989
Loi de puissance & linéaire	Three-Stage permanent deformation model $\epsilon_p = a * N^b$ $\epsilon_p = \epsilon_{PS} + c (N - N_{PS})$ $\epsilon_p = \epsilon_{ST} + d (e^{f(N-N_{ST})} - 1)$	(14)	Zhou et coll. 2004
Loi de fluage	ESSO $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}(\sigma_V, \sigma_H, \theta, f)$	(15)	Aussedat 1977

CHAPITRE 2

DESCRIPTION DE LA MÉTHODOLOGIE ESSO DE PRÉDICTION DE LA DÉFORMATION PERMANENTE

2.1 Introduction

Suite aux divers modèles de prédiction de la déformation permanente présentés au chapitre 1, la méthodologie ESSO de prédiction a été retenue puisqu'elle tient compte des deux premières phases du processus de déformation permanente. La phase 3 est peu intéressante puisque lorsque la déformation atteint ce niveau de déformation, la vie utile du matériau est à toutes fins pratiques terminée. Cette méthode a été développée par Aussedat et ses collaborateurs (Aussedat 1977).

Cette méthode permet à partir de la loi d'un enrobé, du profil journalier de température dans la chaussée, du profil journalier des contraintes dans la chaussée d'estimer l'orniérage réel d'une structure de chaussée. Le méthode ESSO est basée sur une loi de déformation permanente sous chargement cyclique sinusoïdale. La littérature fait référence à une loi de fluage dynamique. Notons que, d'une part le chargement est variable en cours d'essai et que d'autre part l'intensité et la fréquence sont relativement faibles sans mettre en cause des effets d'inertie. En conséquent, nous parlerons de la loi de déformation permanente sous charge cyclique sinusoïdale plutôt que de loi de fluage dynamique. Il permet d'établir un lien entre la déformation permanente et le nombre de passages d'essieux sur un revêtement bitumineux.

Deux modes de sollicitation cyclique peuvent être utilisés lors de la réalisation d'un essai de compression cyclique. Un premier mode consiste à solliciter l'éprouvette suivant un chargement en créneau, c'est-à-dire un temps de chargement avec une contrainte fixe et un temps de repos équivalent au temps de chargement. On peut également solliciter de façon cyclique l'éprouvette, sans période de repos, suivant un chargement sinusoïdal. C'est ce mode de sollicitation qui a été utilisé dans le cadre de nos essais visant à caler la loi de déformation permanente tirée de la méthodologie ESSO à certains enrobés types couramment utilisés au Québec.

2.1.1 Description générale de la méthodologie

La méthodologie ESSO vise à établir l'évolution de l'ornièrage en pourcentage (%) de déformation par millions de cycles de sollicitation (Mc).

Le modèle de déformation permanente de cette méthodologie est développé à partir des résultats obtenus d'essais triaxiaux sur des enrobés bitumineux. L'essai consiste à soumettre une éprouvette cylindrique à une contrainte verticale sinusoïdale en compression avec ou sans contrainte de confinement latéral. De cet essai, la courbe de déformation représentant l'évolution de la déformation permanente en fonction du nombre de cycles de chargements est alors tracée. Cet essai prend en compte l'effet cyclique d'application du chargement qui existe sur la chaussée (le passage de véhicule) et permet de faire varier les autres paramètres d'essai, soit la pression de confinement, l'amplitude de la contrainte verticale, la température ainsi que la fréquence.

2.1.2 Description détaillée

La méthodologie ESSO permet de prédire l'ornièrage ou le cumul de la déformation permanente d'une structure de chaussée sous un trafic de vitesse et d'intensité donnés à l'aide des lois de déformation permanente établies en compression cyclique sinusoïdale pour les différents matériaux bitumineux.

La mise en application de la méthodologie ESSO présente trois limitations notables inhérentes aux hypothèses de base.

1. Elle ne peut être utilisée dans le cas où la contrainte verticale σ_v est supérieure à 10^5 N/m^2 (1MPa) (Aussedat 1977). Notons que le champ de contrainte effectif sur chaussée souple dépasse rarement les 10^6 N/m^2 . (Aussedat 1977)
2. Elle doit être utilisée uniquement dans le cas où la fondation est plus rigide que la couche de base pendant l'été. Les lois de déformation permanente établies en compression cyclique sinusoïdale ne sont valables que lorsque la contrainte isotrope σ_H est positive, soit en compression. Notamment, les équipements actuels

de laboratoire ne permettent pas d'exercer une traction isotrope sur une éprouvette. Or, comme nous l'avons souligné à la section 1.3, de nombreuses couches bitumineuses de base ou de surface subissent une contrainte horizontale de traction quand elles sont posées sur un support moins rigide qu'elles ou dépendamment de la profondeur. Leur comportement à la déformation permanente ne peut pas être calculé par cette méthodologie. (Aussedat 1977)

3. Finalement, la méthodologie ESSO analyse essentiellement le comportement de la couche de base qui est protégée des aléas du trafic (freinage, accélération, côte, virage) ou au climat (très fort gradient de température). La couche de surface pourrait également être étudiée, mais pour rester aussi près des réalités, il faudrait des programmes de calculs et des essais plus sophistiqués. (Aussedat 1977)

La méthodologie ESSO tient compte dans les calculs de l'influence de quatre variables jugées indépendantes soit :

- la contrainte verticale : σ_v
- la contrainte horizontale : σ_H
- la température : T
- la fréquence : f,

Les éprouvettes servant à la réalisation des essais à cerner la loi de déformation permanente en compression cyclique sinusoïdale doivent nécessairement être prélevées de matériaux compactés par action de pétrissage. Elles peuvent alors être carottées directement de la chaussée ou d'une plaque issue d'un compacteur pneumatique en laboratoire. Les éprouvettes fabriquées dans un moule par compression statique présentent un comportement radicalement différent.

À chacun des essais triaxiaux, l'objectif de l'essai est de tracer la courbe représentant le pourcentage de déformation permanente en fonction du nombre de cycles. La Figure 2.1 montre une courbe type de l'évolution de la déformation permanente sous charges cycliques.

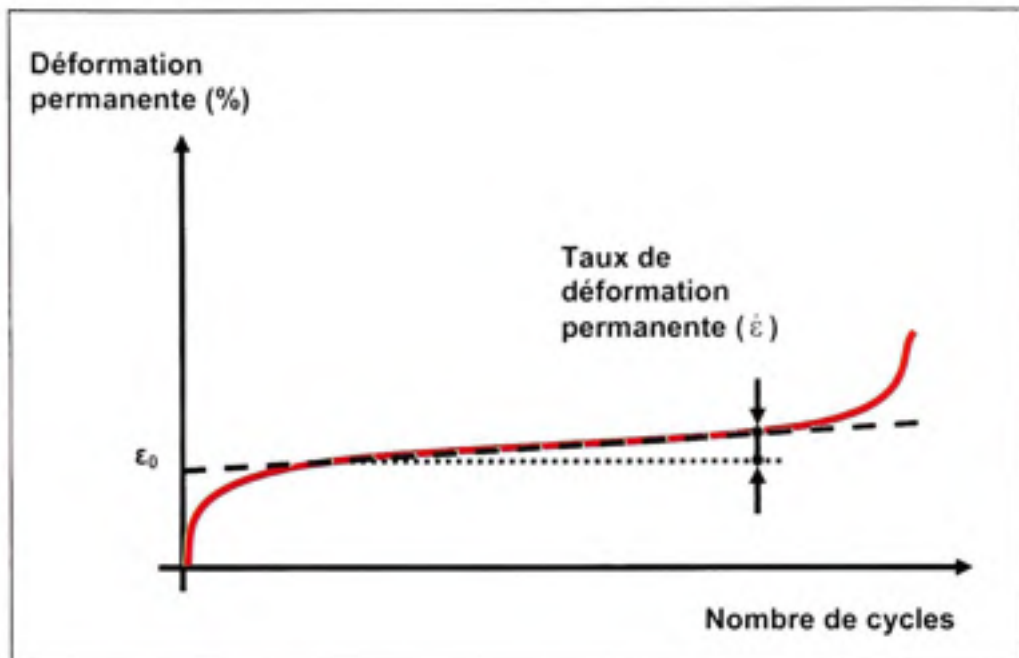


Figure 2.1 Courbe ϵ_p de déformation permanente sous chargements cycliques.

De cette relation les paramètres suivants sont calculés :

- la déformation initiale ϵ_0 (exprimée en %) qui est l'ordonnée à l'origine de la droite prolongée décrivant l'évolution de la déformation permanente de la phase 2 par la ligne tireté;
- la vitesse de la déformation permanente de la phase 2, $\dot{\epsilon} = d\epsilon / dN$ (exprimée en % / Mc), représentée par la pente de la droite de la deuxième phase;
- la durée de vie à 6 % ($N_{6\%}$ exprimée en Mc) définie comme le nombre de cycles nécessaires pour atteindre une déformation permanente de 6% suivant la pente $\dot{\epsilon}$.

2.1.3 Loi de déformation permanente

La méthodologie ESSO propose de décrire la loi de déformation permanente en se concentrant essentiellement sur la phase 2. On assume que cette phase évolue linéairement et elle est une relation de type :

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}(\sigma_v, \sigma_H, T, f_r) \quad (2.1)$$

Afin de préciser la relation ci-dessus, il faut effectuer une série d'essais en compression cyclique sinusoïdale en réalisant diverses combinaisons de σ_v , de σ_H , de température et de fréquence. Cela permettra d'établir la relation $\dot{\epsilon}$ en fonction des conditions d'essais imposées.

La méthodologie ESSO propose une relation logarithmique du taux de la déformation permanente de la phase 2, $\dot{\epsilon}$, de la forme suivante :

$$\log \dot{\epsilon} = A + B \log \sigma_v + C (\Delta\sigma_H) + D (\Delta T) + F (\Delta f_r) \quad (2.2)$$

Une fois les essais réalisés, il faut déterminer les constantes A, B, C, D et F de l'équation avant de pouvoir faire le cumul de la déformation permanente pour une structure de chaussée donnée.

Le calcul de la déformation permanente, l'orniéage, consiste principalement à intégrer les lois propres à chacun des matériaux bitumineux de la structure de la chaussée ci-dessus en fonction de la profondeur de celle-ci. Il faut noter que le profil de température, la contrainte verticale et la contrainte de confinement varient sur toute la profondeur des couches bitumineuses dans la structure de chaussée. Ces derniers sont établis par divers modèles de prédiction (Température mesurée directement dans la chaussée, et les contraintes, calculé suivant une méthode, multicouche élastique tel que proposé par Burminster) (Huang 2004) Les résultats obtenus sont des pourcentages d'ornières ou de déformations exprimés en millimètre par millions de cycles.

Pour obtenir l'évolution de l'orniéage au cours d'une journée, la méthodologie ESSO exige de faire le calcul répétitif de la déformation permanente pour une condition spécifique (T et trafic) pour chaque heure en fonction du profil de température et de multiplier pour chaque heure la prévision du trafic par heure de la route en question. Le résultat de cette opération est alors l'orniéage réel pour une journée. Il est également possible de réaliser le calcul journalier pour obtenir le cumul annuel et du cycle de vie du matériau.

Avant de pouvoir calculer la déformation permanente selon la méthodologie ESSO, il faut tout d'abord déterminer les constantes A, B, C, D et F de l'équation 2.2

2.2 Détermination des paramètres A, B, C, D et F

Après avoir réalisé une série d'essais en faisant varier les variables dont le modèle de déformation permanente (équation 2.2) tient compte, il s'agit de déterminer l'effet que cela occasionne sur le matériau bitumineux à l'étude. Les effets sont subdivisés en trois catégories : les contraintes, la température et la fréquence de chargement.

2.2.1 Définir l'effet des contraintes (A, B et C)

Lors de cette étape, la vitesse de déformation permanente ($\dot{\epsilon}$) est mesurée en maintenant une température (T) et une fréquence (f_r) constantes tout en faisant varier les contraintes verticale (σ_v) et horizontale (σ_h), en traçant le graphique de $\dot{\epsilon}$ (%/Mc) versus σ_v (10^5 Pa).

Cette étape permet alors, de déterminer les premiers paramètres à partir de la relation suivante :

$$\log \dot{\epsilon} = A + B \log \sigma_v + C \sigma_h \quad (2.3)$$

Où :

A, B, C sont des constantes propres au matériau

2.2.2 Définir l'effet de la température (D)

Cette étape sert à mesurer la vitesse de déformation permanente ($\dot{\epsilon}$) sous un même état de contraintes (σ_v et σ_h constants tout au long des essais) et à une même fréquence mais à différentes températures.

L'effet de la température est établi suivant la relation :

$$\log \dot{\epsilon}_1 / \log \dot{\epsilon}_2 = D (T_1 - T_2) \quad (2.4)$$

Où :

D est une constante.

2.2.3 Définir l'effet de la fréquence (F)

De cette étape, l'effet de la fréquence sur la vitesse de déformation permanente ($\dot{\epsilon}$) sous un même état de contraintes (σ_V et σ_H constant tout au long des essais) et sous une température constante est observé.

L'effet de la fréquence est alors établi suivant cette relation :

$$\log (\dot{\epsilon}_1 / \dot{\epsilon}_2) = F \log (f_1 / f_2) \quad (2.5)$$

Où :

F est une constante

Notons que la fréquence de sollicitation à considérer peut être approximée à partir de la vitesse du trafic, Aussedat énonce (Aussedat 1977) : « La fréquence, jouant un grand rôle dans la loi de déformation permanente comme dans la loi de module, doit être estimée à partir de la vitesse des poids lourds. Bien que la relation soit en fonction de la profondeur dans la structure et de la rigidité de cette dernière, on peut en première approximation estimer que » :

$$f_r \text{ (Hz)} = V \text{ (km/h)} / 6 \quad (2.6)$$

2.3 Calcul de l'orniérage pour un tronçon routier

Maintenant que toutes les constantes de la relation générale de la loi de déformation permanente sont connues, il est possible de calculer la prévision de la déformation permanente ou l'orniérage d'une section de réseau routier.

2.3.1 Relation générale de déformation permanente

Aussedat (1977) a établie la loi de déformation permanente pour une grave bitume ayant une pénétration de 40/50 pour le domaine où :

la contrainte σ_v varie de $2,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ à $1 \times 10^6 \text{ N/m}^2$;

la pression σ_H varie de 0 à $3 \times 10^5 \text{ N/m}^2$;

la température T varie de 25 à 40 °C;

la fréquence f_r varie de 0,1 à 50 Hz.

L'équation ci-dessous, issue des travaux présentés par Aussedat, est valable uniquement pour le domaine cité plus haut.

$$\log \dot{\epsilon} = A + B \log \sigma_v + C \sigma_H + D (T - 30) + F \log f_r / 10 \quad (2.7)$$

Où :

$\log \dot{\epsilon}$ = % / Mc

σ_v et σ_H = 10^5 Pa

T = °C

f_r = Hz

2.3.2 Calcul de l'orniérage

Par la suite, afin de calculer l'orniérage de la chaussée, il est primordial de savoir que la prédiction de l'orniérage pour un matériau donné dépend des conditions dans lesquels ce matériau est soumis. Ce calcul ne demeure valable que dans les conditions auxquelles il a été réalisé. Or, dans le calcul de l'orniérage, il faut d'abord connaître :

la nature de l'enrobé (calcul des constantes);

l'épaisseur de la couche;

la vitesse du trafic;

l'évolution des contraintes dans la couche;

l'évolution de la température dans la couche.

Lorsque toutes ces conditions sont connues, il est possible de calculer l'orniérage pour une structure de chaussée donnée.

2.3.3 Calcul de la déformation permanente en fonction de l'épaisseur des couches

Dans un premier temps, il faut intégrer l'équation 2.7 en fonction de l'épaisseur de la couche, soit :

$$\epsilon_{perm}(t) = \int_{y_1}^{y_2} (\dot{\epsilon}) dy \quad (2.8)$$

Sachant que la température, la contrainte verticale et la contrainte de confinement varient sur toute la profondeur de la couche, il faut calculer la déformation permanente au temps « i », l'équation 2.7, sur chaque sous-couche de la couche. Pour ce faire, on subdivise chaque couches bitumineuses en plusieurs sous-couches de manière à cerner la valeur du taux de déformation permanente approprié $\dot{\epsilon}$. La Figure 2.2 montre la variation de $\dot{\epsilon}$ en fonction de la profondeur pour une subdivision en 20 sous-couches de la couche 2 de manière à prendre en considération la variation de σ_H , σ_V et T.

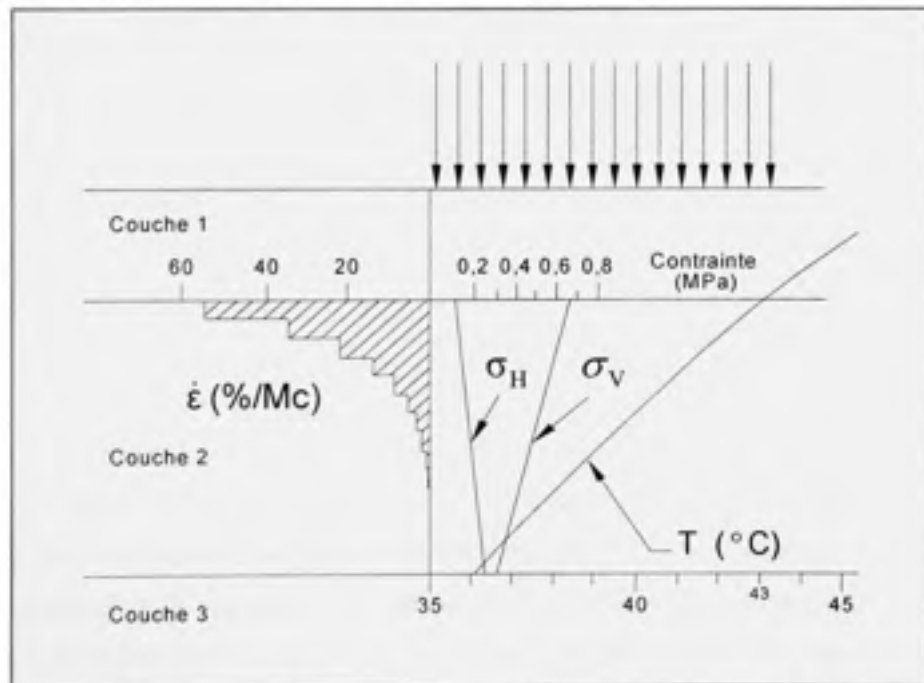


Figure 2.2 Contraintes, température et taux de déformation permanente types dans la couche 2 d'enrobé bitumineux.

La Figure 2.2 divisée en deux sections : la section de gauche présente l'évolution du taux de déformation permanente ($\dot{\epsilon}$) en fonction de la profondeur, alors que la section de droite présente la variation de σ_H , σ_V et de la température en fonction de la profondeur.

La portion droite de la Figure 2.2 montre la variation de la température, de la contrainte verticale et de la contrainte horizontale en fonction de la profondeur de la couche. La portion de gauche représente le calcul de la loi d'ESSO pour l'enrobé selon les conditions réelles de sollicitation de la portion de droite.

Notons que les valeurs de $\dot{\epsilon}$ sont calculées à partir de la loi de déformation permanente établie pour l'enrobé de la couche « i » suivant les essais de compression cyclique sinusoïdale traités précédemment.

Sachant que la déformation permanente va varier en fonction des conditions de sollicitation définies par le couple température et trafic, la déformation permanente totale nécessite un calcul incrémental prenant en compte cette évolution. La méthodologie ESSO propose de définir pour la structure de chaussée étudiée une fonction prenant en compte le profil journalier de la température et permettant de décrire le potentiel de déformation permanente par unité de trafic. Cette relation est établie pour un profil de température donné et pour une charge standard de 13 tonnes (ÉCAS).

La Figure 2.4 présente le profil journalier de la température et la Figure 2.4 montre l'évolution du calcul du taux potentiel d'ornièr (mm/Mc) en fonction de la profondeur pour chaque heure de la journée en tenant compte des différents paramètres et des conditions réelles de sollicitation d'une journée (Température et charge de référence ÉCAS, trafic). À ce stade, les données sont toujours en millimètres de déformation permanente par millions de cycles étant donné que l'influence du trafic réel n'a pas encore été prise en compte dans le cumul des déformations.

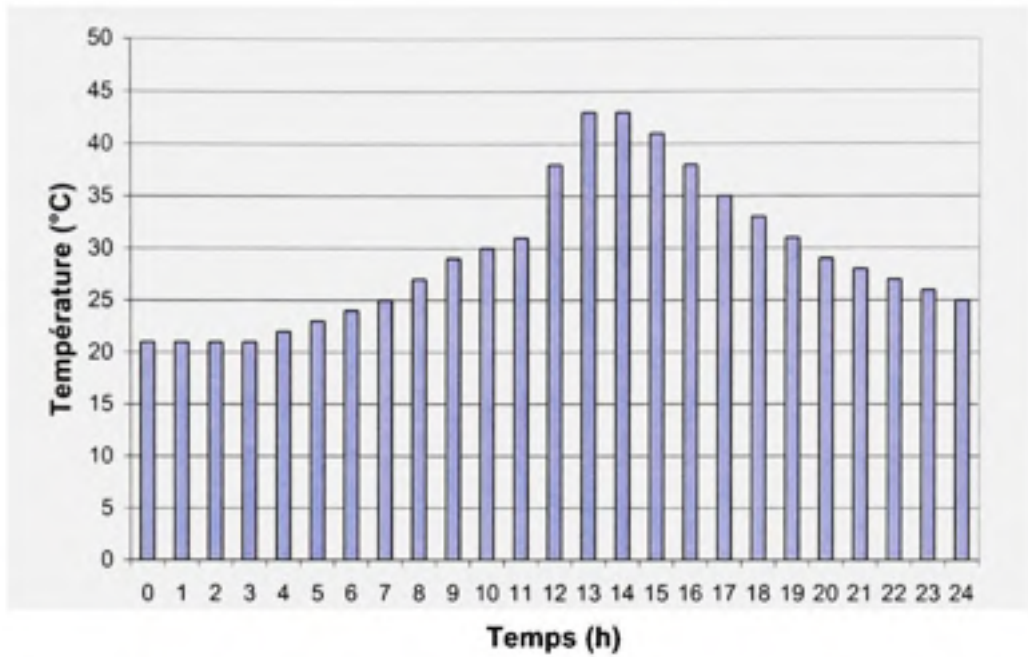


Figure 2.3 Variation de la température moyenne de la couche 2 d'un enrobé bitumineux au cours d'une journée.

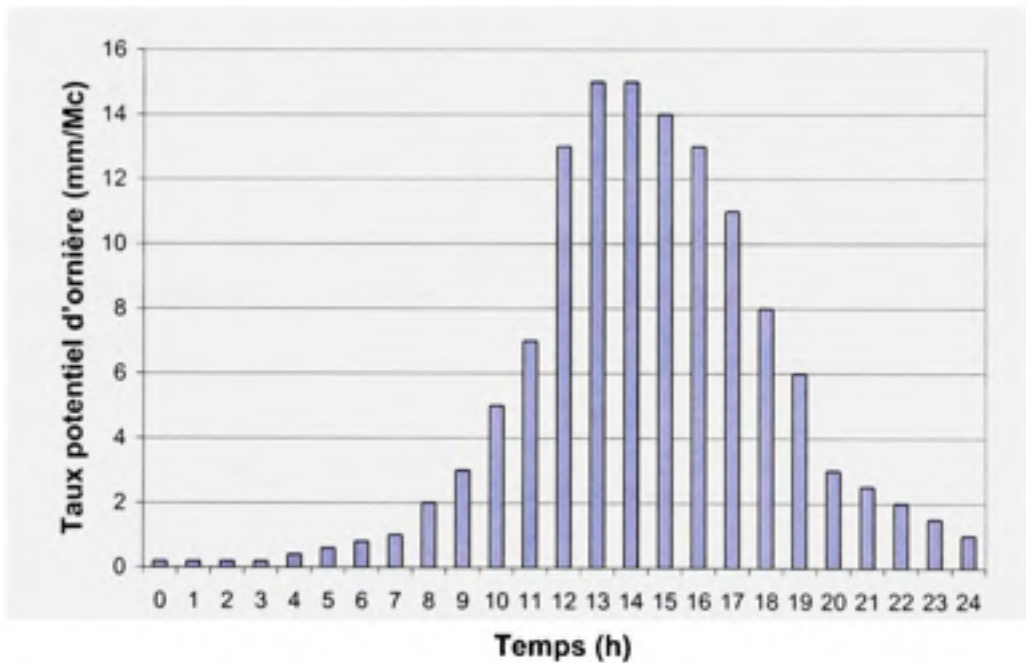


Figure 2.4 Variation du taux d'ornièrè de la couche 2 d'enrobé bitumineux au cours d'une journée.

2.3.4 Calcul de la déformation au cours d'une journée

Connaissant maintenant le taux potentiel d'ornièrerie pour chaque heure d'un cycle de 24 heures, on procède alors à l'intégration du profil de charges pour obtenir l'ornièrerie réel Ω de la structure bitumineuse de chaussée. Pour ce faire, il faut effectuer la double intégration ci-dessous. Soit $\dot{\epsilon}$ multiplié par la variation dans le temps du nombre de passages d'essieux de 13 tonnes $N(t)$.

$$\Omega = \int_{t_0}^{t_1} \int_{y_1}^{y_2} (\dot{\epsilon}) \frac{dN(t)}{dt} dt dy \quad (2.9)$$

Par contre, pour réaliser cette étape, il est important de procéder au préalable à l'analyse complète de l'évolution de l'ornièrerie de la chaussée en fonction de chaque heure, puisque l'ornièrerie dépend de la température et du trafic et que ces deux derniers paramètres doivent être actualisés en fonction du temps. Il est impossible de procéder à l'analyse complète en une journée sans tenir compte de ces deux paramètres à chaque heure de la journée. Il faut donc procéder à une analyse approfondie à chaque heure pour éventuellement déduire le comportement total de la chaussée vis-à-vis l'ornièrerie pour une journée.

Pour ce faire, il faut déterminer la variation de passage d'essieux normalisés dans le temps (dN / dt). La fréquence de passage est en première approximation calculée selon la relation suivante :

$$N_{(24)} = P_{(13)} * S * T_R * \left(\frac{V}{100}\right) * \left(\frac{P_L}{100}\right) \quad (2.10)$$

Où

- $N_{(24)}$ Nombre de passages journaliers d'essieux de 13 tonnes : nombre d'ÉCAS
- T_R Trafic total journalier dans les deux sens;
- P_L Pourcentage de véhicules de plus de 1,5 t de charge utile passant sur la chaussée (Belgique et France = 20%);

- V Pourcentage de véhicules de plus de 1,5 t de charge utile passant sur la voie étudiée (en général $V = 50\%$);
- S Nombre moyen d'essieu par poids lourd de plus de 1,5 t de charge utile (France $S = 2,8$ en dehors des villes);
- $P_{(13)}$ Fréquence de passages d'essieux de 13 t équivalent du point de vue de l'orniérage à l'histogramme réel des fréquences de passages des différentes classes d'essieux circulant en réalité sur la chaussée (France $\pm 0,30$)

Connaissant maintenant le paramètre, $\frac{dN(t)}{dt}$ il est possible de compléter le calcul de l'orniérage réel (équation 2.9) dans la chaussée pour une période quelconque de la journée. Le détail du calcul de l'orniérage réel est présenté aux figures 2.5 et 2.6 à partir des graphiques du taux potentiel d'ornière et du taux de trafic pour une journée donnée.

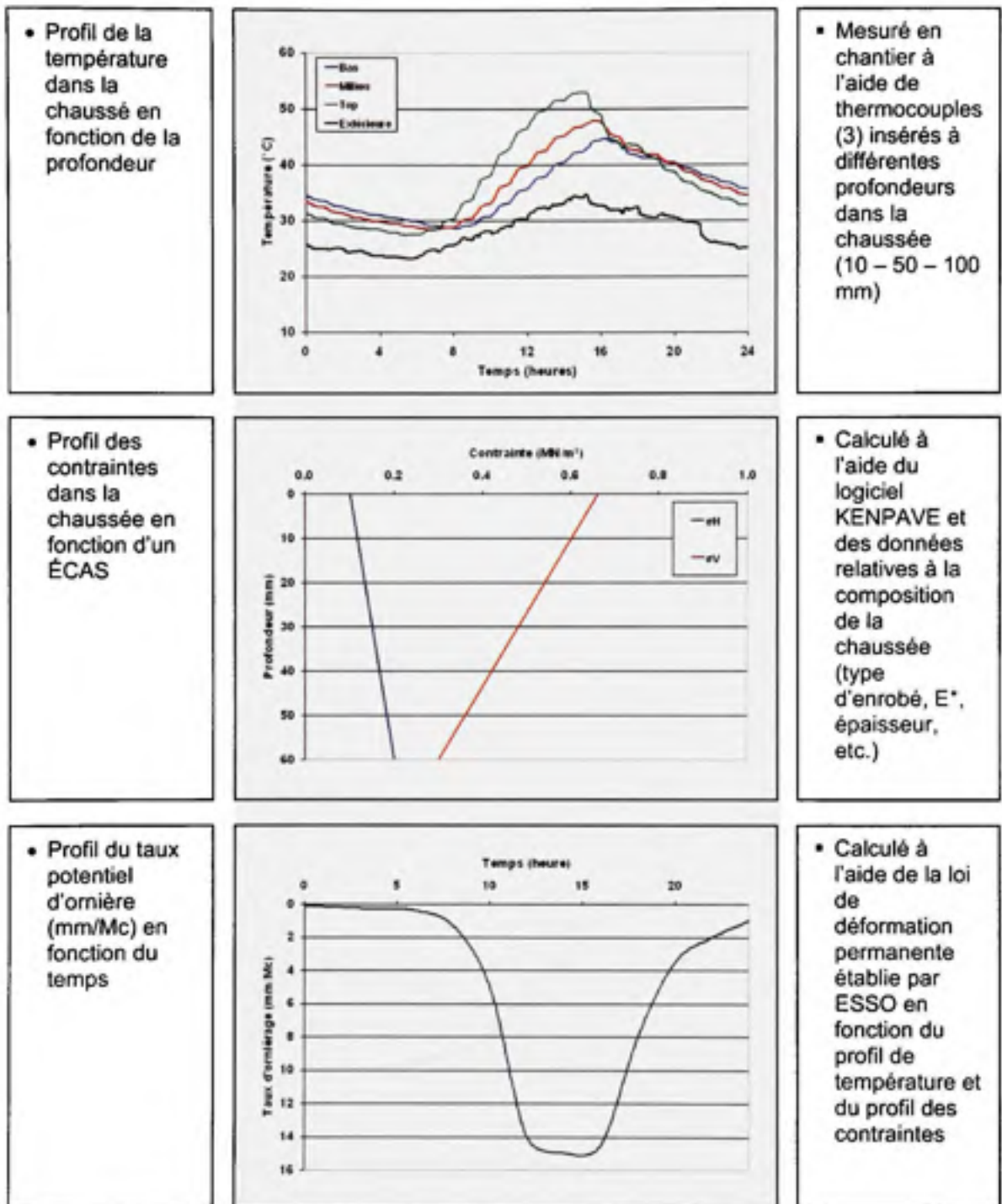


Figure 2.5 Détail du cumul de l'ornièrisme partie A.

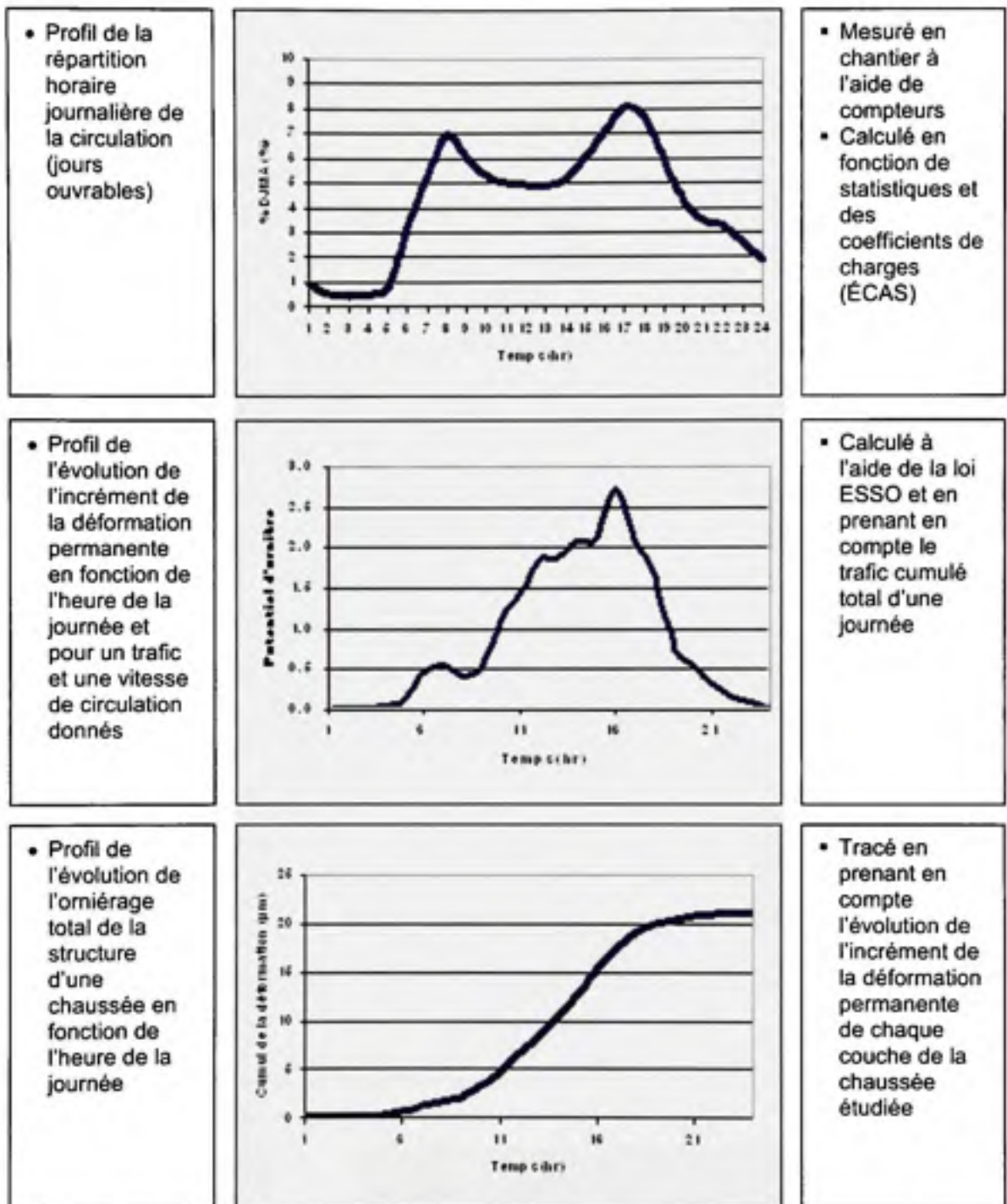


Figure 2.6 Détail du cumul de l'ornièrage partie B.

2.4 La loi générale $\dot{\epsilon}$ de la déformation permanente

Aussedat (Aussedat 1977) a observé une évolution quasi linéaire dans le domaine $\log(\dot{\epsilon})$ et $\log(\sigma_v)$. Le modèle de la déformation permanente est donc fondé à la base sur cette observation. Il correspond à l'équation suivante :

$$\log \dot{\epsilon} = A + B \log \sigma_v \quad (2.11)$$

À cette équation s'ajoutent les travaux d'Aussedat et de ses collaborateurs qui permettent de proposer des relations qui tiennent compte du confinement latéral, de la température et de la fréquence. Dans ce domaine, l'hypothèse de la linéarité d'Aussedat est décrite par une loi en puissance de la forme

$$y = a_0 \cdot x^b \quad (2.12)$$

À partir des valeurs expérimentales, les paramètres a_0 et b de cette relation sont établis en minimisant l'erreur suivant l'approche des moindres carrés. En représentant la relation en puissance sous forme logarithmique, soit :

$$\log(y) = \log(a_0) + b \log(x) \quad (2.13)$$

On retrouve la forme de la loi de déformation permanente reprise par la méthodologie ESSO. (équation 2.11). La Figure 2.8 montre la relation décrite ci-dessus lorsque $\sigma_H = 0$, $T = 30^\circ\text{C}$ et $f_r = 10\text{Hz}$.

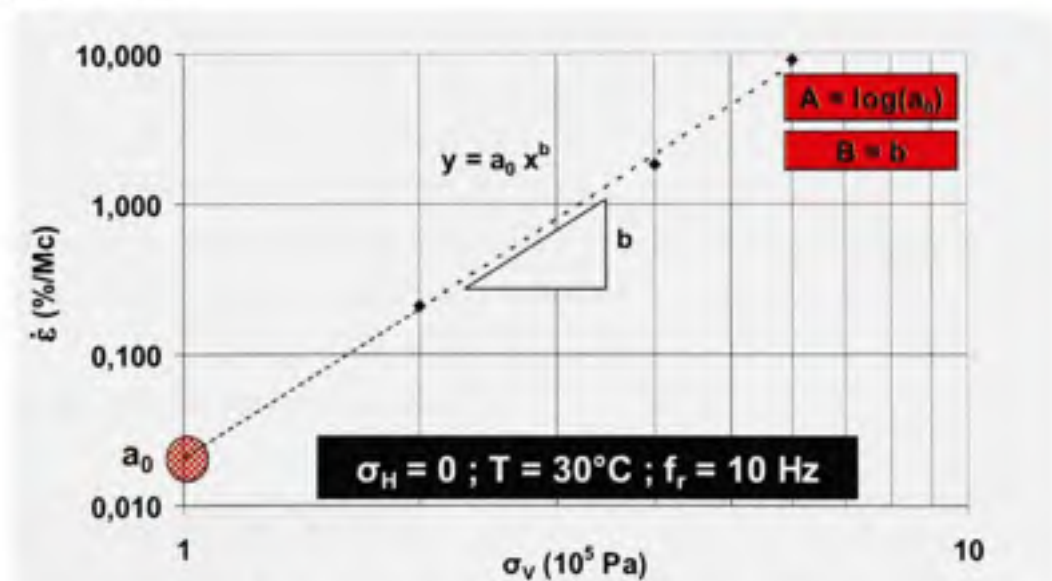


Figure 2.8 Pente de la déformation $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_v .

Par association, la valeur $\log(a_0)$ correspond à la constante A de la loi de déformation permanente de la méthodologie ESSO. Par ailleurs, la constante B, correspond directement à la valeur b de l'approximation de la loi de puissance optimisée. La relation 2.11 sert de base à la loi de déformation permanente pour la méthodologie ESSO. Or, plusieurs autres paramètres déterminants vont interférer sur la réponse en déformation permanente d'un enrobé bitumineux. Notamment, la contrainte de confinement, la température et la fréquence sont des paramètres étudiés par Aussédat et ses collaborateurs. Ils ont évalué l'effet de chacun de ces paramètres de manière à les prendre en compte dans la loi de déformation permanente.

2.5 Effet des conditions d'essais sur la loi de déformation permanente de la méthodologie ESSO

Afin de quantifier les autres constantes de la loi de déformation permanente proposées par la méthodologie ESSO (équation 2.2), il faut faire varier les conditions d'essais une à une et tracer la même relation ($\dot{\epsilon}$ et σ_v). Cela permettra de quantifier pour un enrobé donné les constantes C, D et F de la loi de déformation permanente.

2.5.1 Effet du confinement (σ_H) sur la loi de déformation permanente de la méthodologie ESSO

L'effet du confinement latéral est exprimé dans la loi ESSO par la constante C. Pour traduire ce paramètre, Aussédat pose, d'une part que les relations dans le domaine $\log(\dot{\epsilon})$ et $\log(\sigma_v)$ pour divers niveaux de confinement sont parallèles et, d'autre part, que le taux de variation de (a_0) de la loi de puissance varie de façon exponentielle en fonction du confinement. Ce qui se traduit par la relation suivante :

$$\log \dot{\epsilon} = A + B \log \sigma_v + C \Delta \sigma_H \quad (2.14)$$

Pour le cas σ_H , la loi de puissance peut s'écrire :

$$y = a_0^{\sigma_H} \cdot x^{b_{\sigma_H}} \quad (x \text{ étant } \sigma_H) \quad (2.15)$$

où b_{σ_H} est une constante pour tous le σ_H

Pour obtenir la variation générée par l'application de différents σ_H , soit le paramètre C, on vérifie le décalage apporté dans la relation ($\dot{\epsilon}$ et σ_V) en fonction de σ_H . La Figure 2.9 illustre la pente de la déformation en fonction de la contrainte verticale pour trois pressions de confinements distinctes.

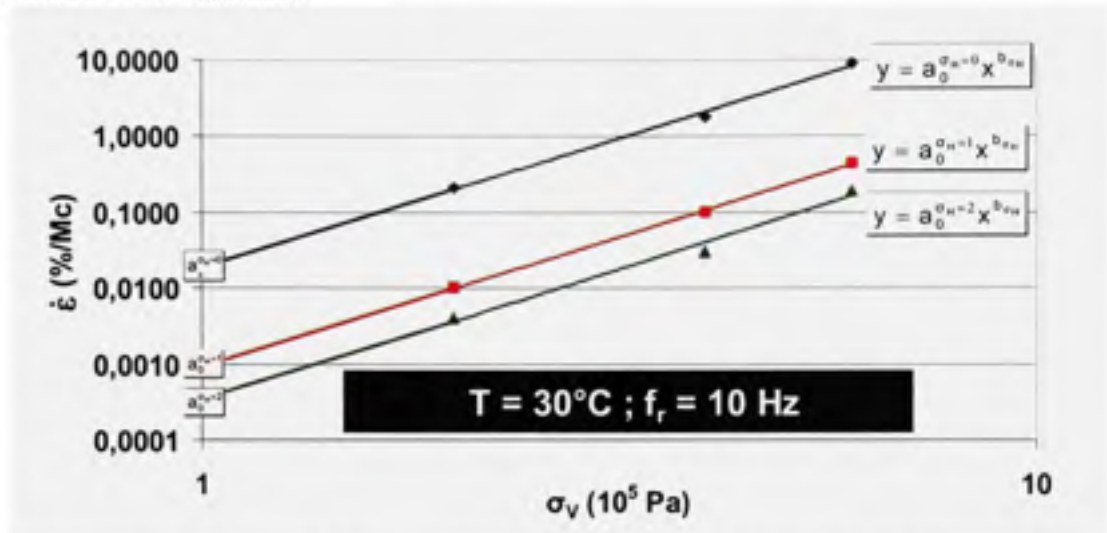


Figure 2.9 Pente de la déformation $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_V pour trois σ_H différents.

Pour chaque niveau de σ_H , la loi de puissance (équation 2.15) est optimisée à partir des moindres carrés. Pour mesurer l'influence de la pression de confinement, la relation de a_0 en fonction de σ_H est tracée en prenant comme référence $\sigma_H = 0$. Cette relation est illustrée à la Figure 2.10.

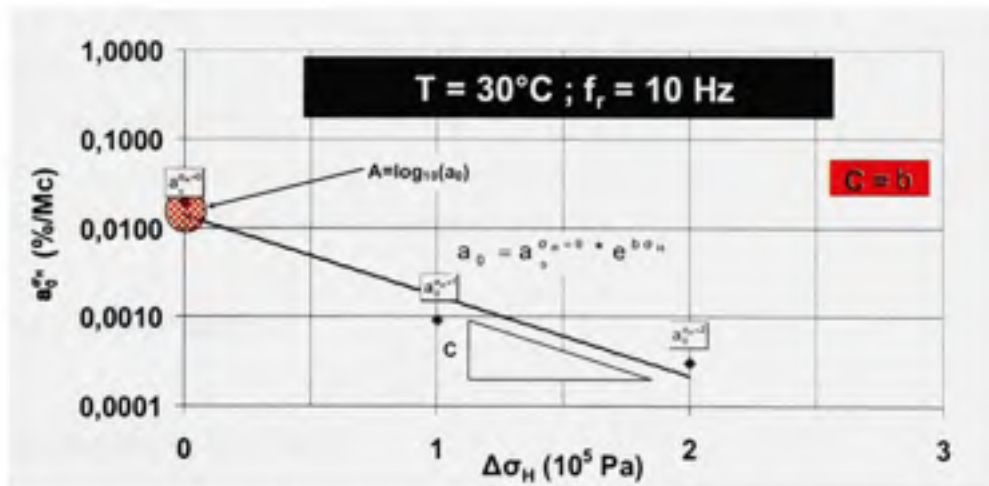


Figure 2.10 Courbe de $a_0^{\sigma_H}$ en fonction de $\Delta \sigma_H$.

Dans ses travaux sur la méthodologie ESSO, Aussedat et ses collaborateurs ont constaté que le confinement a une incidence marquée sur l'évolution de la déformation permanente. Le paramètre a_0 évolue selon la loi exponentielle suivante :

$$a_0 = a_0^{\sigma_H=0} \cdot e^{b\sigma_H} \quad (2.16)$$

équivalente à :

$$\log a_0 = \log a_0^{\sigma_H=0} + b \sigma_H \quad (2.17)$$

Où :

$a_0^{\sigma_H=0}$, la valeur de a_0 lorsque $\sigma_H = 0$, soit la valeur de A de la loi de déformation permanente d'ESSO et b , la pente équivalent au $\log_{10}(e^b)$. La constante C correspond alors à b de la loi exponentielle a_0 de l'équation 2.17.

Connaissant la valeur du logarithme de $a_0^{\sigma_H}$, la relation devient la suivante

$$\log a_0 = A + C \sigma_H \quad (2.18)$$

La constante C est alors un facteur de translation de la constante A et la loi d'ESSO mise à jour devient :

$$\log \dot{\epsilon} = A + B \log \sigma_V + C \sigma_H \quad (2.19)$$

2.5.2 Effet de la température (T) sur la loi de déformation permanente de la méthodologie ESSO

L'effet de la température est exprimé dans la loi ESSO par la constante D . Pour traduire ce paramètre, Aussedat pose, d'une part que les relations pour un niveau de température donné sont parallèles dans le domaine $\log(\dot{\epsilon})$ et $\log(\sigma_V)$ et, d'autre part, que le taux de variation de (a_0) de la loi de puissance varie de façon exponentielle en fonction de la température. Ce qui se traduit par la relation suivante :

Pour le cas T on peut écrire :

$$y = a_0^{\Delta T} \cdot e^{b_T} \quad (2.20)$$

Avec b_T constante pour tous les ΔT

Maintenant, il faut mesurer l'influence de la température pour déterminer la constante D. La pression de confinement est alors fixée à $0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ et la fréquence maintenue à 10 hertz et on fait varier la température. La pente de l'essai de déformation permanente est présentée à la Figure 2.11 en fonction de la contrainte verticale et ce pour différentes températures.

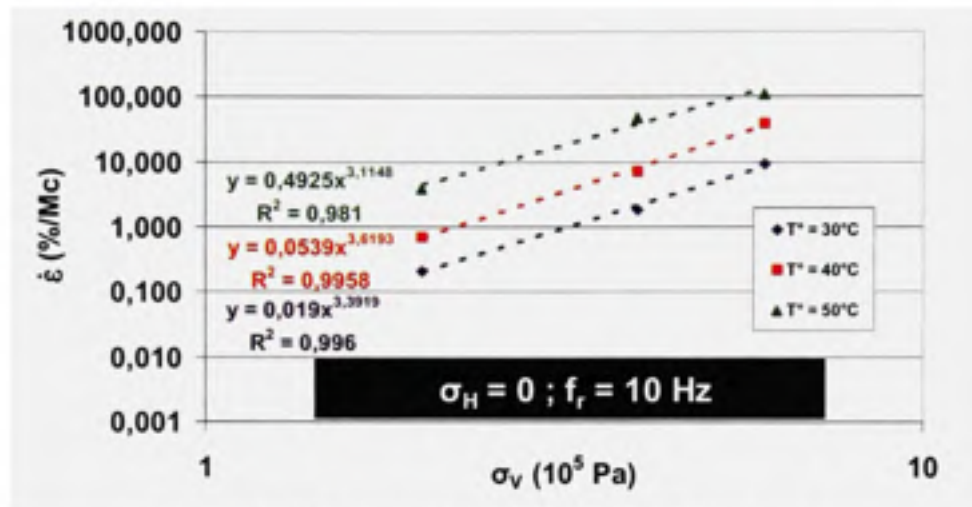


Figure 2.11 Courbe de $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_v pour trois températures différentes.

On suit le même cheminement qu'avec la pression de confinement. La valeur a_0 de chacune des courbes correspondantes aux températures 30, 40 et 50°C est tracée à la Figure 2.12 et permet d'observer la relation entre les courbes de $\dot{\epsilon}$ versus σ_v pour différentes températures.

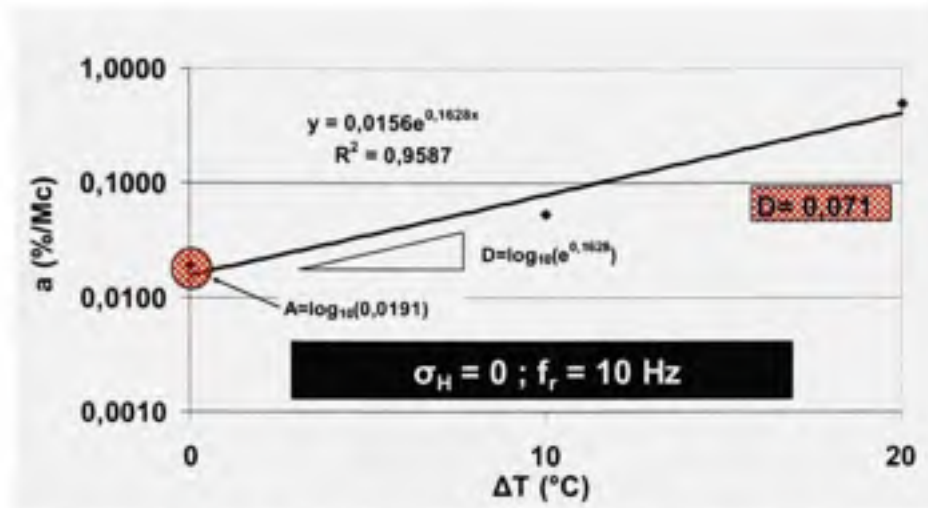


Figure 2.12 Courbe de $a^{\Delta T}$ en fonction du Δ de température.

La valeur a_0 varie de façon exponentielle lors de l'incrément de la température. La relation est la même que pour la contrainte de confinement latérale, soit :

$$a_0 = a_s^{\Delta T} \cdot e^{b \cdot \Delta T} \quad (2.21)$$

Le paramètre D de la loi d'ESSO est tiré de cette relation et correspond au $\log_{10}(e^b)$. La loi d'ESSO mise à jour peut alors être écrite sous la forme :

$$\log \dot{\epsilon} = A + B \log \sigma_v + C \sigma_H + D (T - 30) \quad (2.22)$$

2.5.3 Effet de la fréquence (f_r) sur la loi de déformation permanente de la méthodologie ESSO

Pour traduire l'effet de la fréquence, Aussedat a assumé d'une part que les pentes des relations de base de $\dot{\epsilon}$ versus σ_v sont parallèles pour différentes fréquences dans le domaine log-log. Il ne reste que l'effet de la fréquence à cerner pour compléter la loi d'ESSO de l'enrobé type. Pour ce faire, le même processus d'analyse est effectué. On compare l'évolution de la pente de la deuxième phase de l'essai de déformation permanente en fonction de la contrainte verticale pour différentes fréquences tout en maintenant fixées la pression de confinement et la température ($\sigma_H=0$ et $T=30$). La Figure 2.13 présente la relation $\dot{\epsilon}$ et σ_v pour trois fréquences.

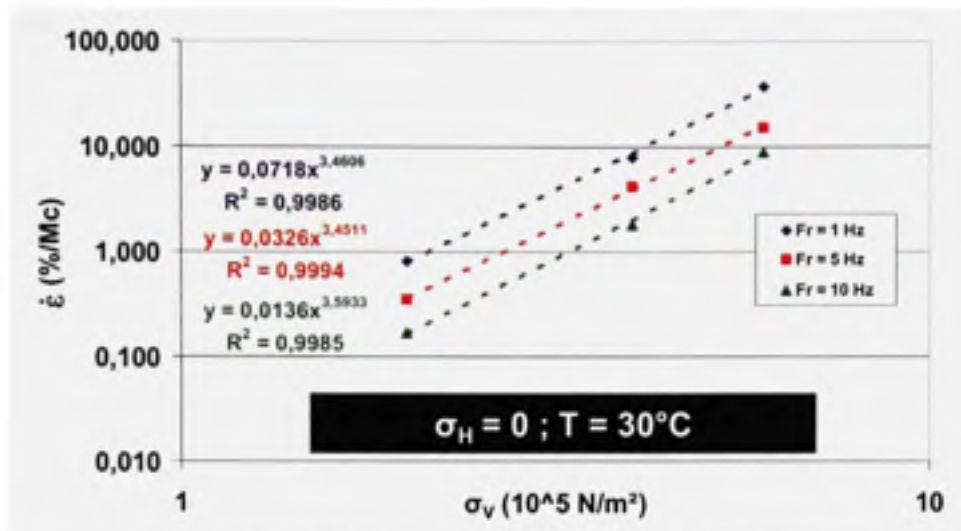


Figure 2.13 Courbe de $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_v pour trois fréquences différentes.

La déformation en fonction de la contrainte verticale s'écrit toujours sous la forme $\dot{\epsilon} = a_0 \sigma_v^b$. Pour connaître l'influence de la fréquence, a_0 est tracée en fonction de la fréquence. Une relation type est présentée à la Figure 2.14.

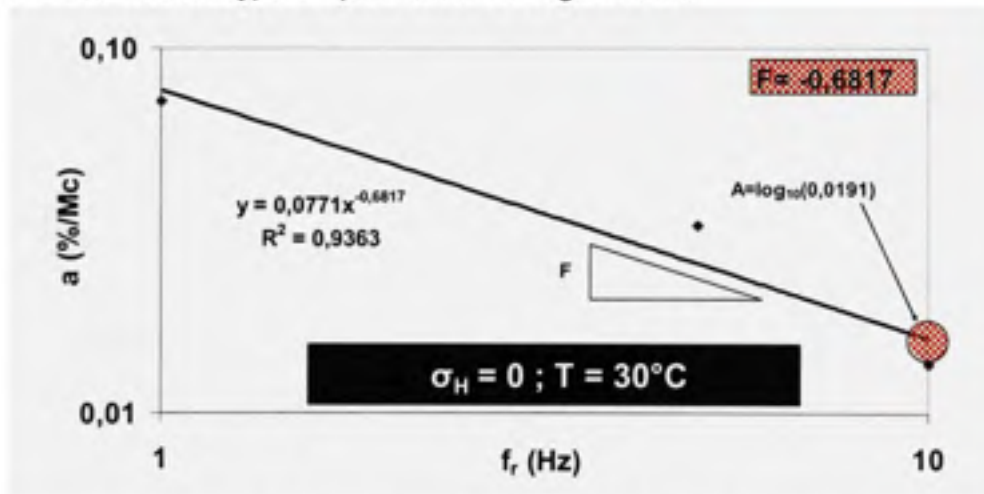


Figure 2.14 Courbe de a_0 en fonction de la fréquence.

Cette courbe peut être approximée par une fonction de puissance où le paramètre b de la fonction puissance correspond à la constante F de la loi d'ESSO. La loi complète de l'enrobé type peut maintenant être exprimée par :

$$\log \dot{\epsilon} = A + B \log \sigma_v + C \sigma_H + D (T - 30) + F \log \left(\frac{f_r}{10} \right) \quad (2.23)$$

Où les constantes C, D et F sont établies à partir de valeur de référence où la pression de confinement σ_H est égale à 0, la température à 30°C et la fréquence à 10 hertz. Sous sa forme générale, la loi de déformation permanente ESSO établi par Aussedat s'exprime par :

$$\log \dot{\epsilon} = A + B \log \sigma_v + C \Delta \sigma_H + D \Delta T + F \Delta f_r \quad (2.2)$$

En intégrant ces valeurs de référence, cette loi peut s'écrire :

$$\log \dot{\epsilon} = A + B \log \sigma_v + C \sigma_H + D (T - 30) + F \log \left(\frac{f_r}{10} \right) \quad (2.7)$$

CHAPITRE 3

CAMPAGNE EXPÉRIMENTALE

3.1 Programme d'essai

Dans le but de paramétrer deux enrobés bitumineux, les enrobés EB-14 et ESG-10, couramment utilisés au Québec, suivant le modèle ESSO, une série d'essais en compression cyclique sinusoïdale a été réalisée sur des éprouvettes cylindriques.

Pour chacun des deux enrobés testés, les tableaux 3.1a et 3.1b présentent les différentes conditions d'essai de chaque essai de compression cyclique réalisé sur différentes éprouvettes d'enrobé bitumineux.

3.2 Essai de déformation permanente (compression cyclique)

Comme nous l'avons souligné précédemment, l'essai de déformation permanente est un essai réalisé en condition homogène suivant un chargement cyclique. L'éprouvette est soumise à un chargement cyclique répété de compression dans un environnement isotherme et suivant des conditions d'essais définis (σ_v , σ_H , f_t). Dans le contexte de cette recherche, la majeure partie des essais a été réalisée sans contrainte de confinement ($\sigma_H = 0$). Quelques essais avec confinement latéral ont été ajoutés dans la perspective de quantifier le paramètre C de la loi d'ESSO.

Par ailleurs, dans le cadre de ce programme d'essais, en dépit du fait que l'enrobé en bas d'une couche de base de la structure d'une chaussée souple soit soumis à des efforts de traction, l'évolution de la déformation permanente des enrobés sous contraintes cycliques de traction n'a pas été étudiée. La réalisation de tels essais est nettement plus complexe à mettre en œuvre.

Tableau 3.1

Conditions d'essais pour chaque enrobé testé

a) EB-14

Fréquence (Hz)	σ_v (MPa)	Température (T°)	σ_H (MPa)
1	0,2	30	0
1	0,2	40	0
1	0,2	50	0
1	0,4	30	0
1	0,4	40	0
1	0,4	50	0
1	0,6	30	0
1	0,6	40	0
1	0,6	50	0
3	0,4	40	0
5	0,2	30	0
5	0,2	40	0
5	0,2	50	0
5	0,4	30	0
5	0,4	40	0
5	0,4	50	0
5	0,6	30	0
5	0,6	40	0
5	0,6	50	0
10	0,2	30	0
10	0,2	40	0
10	0,2	50	0
10	0,4	17	0
10	0,4	25	0
10	0,4	30	0
10	0,4	35	0
10	0,4	40	0
10	0,4	45	0
10	0,4	50	0
10	0,6	30	0
10	0,6	40	0
10	0,6	50	0
10	0,6	30	0,1
10	0,6	30	0,2

b) ESG-10

Fréquence (Hz)	σ_v (MPa)	Température (T°)	σ_H (MPa)
1	0,2	30	0
1	0,2	40	0
1	0,2	50	0
1	0,4	30	0
1	0,4	40	0
1	0,4	50	0
1	0,6	30	0
1	0,6	40	0
1	0,6	50	0
5	0,2	30	0
5	0,2	40	0
5	0,2	50	0
5	0,4	30	0
5	0,4	40	0
5	0,4	50	0
5	0,6	30	0
5	0,6	40	0
5	0,6	50	0
10	0,2	30	0
10	0,2	40	0
10	0,2	50	0
10	0,4	3	0
10	0,4	12,8	0
10	0,4	20	0
10	0,4	25	0
10	0,4	30	0
10	0,4	35	0
10	0,4	40	0
10	0,4	45	0
10	0,4	50	0
10	0,6	30	0
10	0,6	40	0
10	0,6	50	0
10	0,6	30	0,1
10	0,6	30	0,2

Les résultats tirés de l'essai de compression cyclique sinusoïdale permettent le calcul des paramètres de la méthodologie ESSO de déformation permanente. Cet essai a été réalisé à plusieurs reprises pour différentes combinaisons de températures, de fréquences, de contraintes de compression axiale (σ_v) et de contraintes de confinement (σ_H). Pour chacune de ces grandeurs, une condition de référence a été fixée : une température de 30°C, une fréquence de 10Hz, une contrainte axiale de 0,4 MPa et une contrainte de confinement de 0 MPa.

3.2.1 Procédure expérimentale

Les éprouvettes testées en compression cyclique sinusoïdale ont été prélevées par carottage dans des plaques d'enrobé compactées en laboratoire à l'aide du compacteur de plaques MLPC. La procédure détaillée liée à la fabrication des éprouvettes est donnée à la section 4.2.1.

Des casques d'aluminium sont collés à l'aide d'époxy aux extrémités planes des éprouvettes pour la réalisation des essais. La Figure 3.1 illustre schématiquement le corps d'éprouvette testée. Trois extensomètres de 50 mm sont positionnés dans la partie centrale de l'éprouvette suivant un espacement de 120 degrés les uns des autres. Ils sont maintenus en place par six ressorts de même calibre.

En cours d'essai, un chargement cyclique sinusoïdal est imposé en contrôlant la force appliquée sur l'éprouvette. La force et les déformations sont enregistrées durant l'essai.

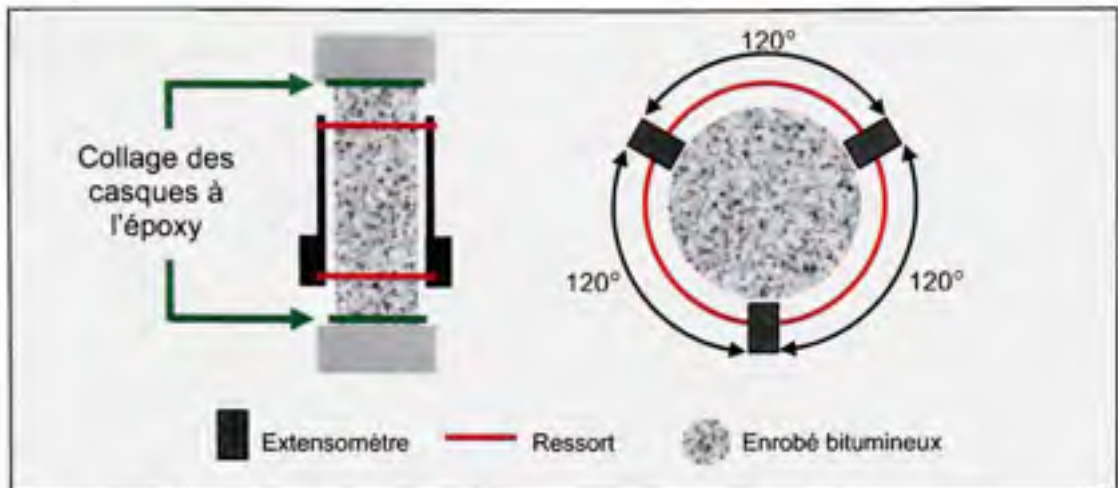


Figure 3.1 Schématisation des éprouvettes pour l'essai de compression cyclique et localisation des extensomètres.

3.2.2 Traitement des fichiers bruts

De manière à quantifier l'évolution de la déformation permanente de l'éprouvette, il faut en cours de sollicitation, suivant un nombre de cycles donné, faire l'acquisition de la force, des déformations de chacun des trois extensomètres et de la température. Cette dernière est prise directement à la surface de l'éprouvette à l'aide d'une sonde thermique de type PT100. La quantité de données recueillies en cours d'essai est très grande et le traitement de ces données est lourd. Peu importe la fréquence utilisée en cours d'essai, chaque cycle enregistré est représenté par une séquence de 200 valeurs. Compte tenu de la quantité considérable de données à traiter, une série de macros commandes en Visual Basic Application (VBA) pour Excel a été développée pour le traitement des données brutes. Ces macros permettent de traiter les résultats sous forme de données discrètes pour deux cycles consécutifs de manière à définir les paramètres du signal effectif en cours d'essai. En effet, on est en droit de se poser la question suivante : Je commande un signal sinusoïdal, ai-je bel et bien un sinus ? Par ailleurs, l'analyse permet le traitement de la contrainte et de la déformation en simultané de manière à calculer l'évolution de la déformation permanente.

La contrainte (vérification de la qualité du signal)

Les essais sont pilotés en contrôlant la contrainte appliquée sur l'éprouvette testée. Par l'entremise de la force appliquée, en cours d'essai, le signal de la force est enregistré de manière à pouvoir vérifier la qualité du chargement imposé par la presse en cours d'essai. Compte tenu que l'essai est réalisé en condition homogène, la contrainte axiale est calculée en considérant la section brute de l'éprouvette. La contrainte varie selon les conditions d'essai imposées (T , σ_v , σ_H , f_r). Dans le cadre de notre programme expérimental, trois amplitudes de contraintes de compression verticale différentes ont été ciblées soit, 0,1 MPa, 0,2 MPa ou 0,3 MPa. La contrainte imposée de façon sinusoïdale est déphasée autour de l'amplitude afin de toujours appliquer de la compression. Par conséquent, l'éprouvette est sollicitée en compression. La convention de signe utilisée dans ces essais sera le signe positif lorsqu'il y a de la compression tandis que le signe négatif fera référence à la traction. Les différents cas de chargement sont présentés à la Figure 3.2.

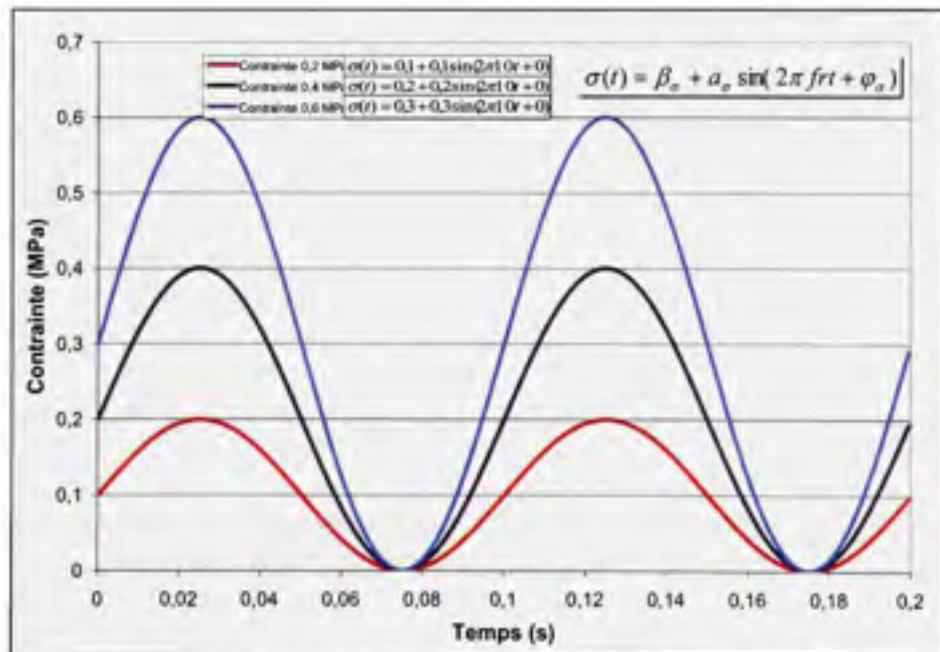


Figure 3.2 Différents cas de chargement attendu lors de l'application du signal de contrainte imposé.

En définitive, la sollicitation imposée se définit mathématiquement comme suit :

$$\sigma(t) = \beta_{\sigma} + a_{\sigma} \sin(\omega t + \varphi_{\sigma}) \quad (3.1)$$

Où,

- $\sigma(t)$ la contrainte en fonction du temps;
- β_{σ} la contrainte moyenne du signal sinusoïdal;
- a_{σ} l'amplitude du signal sinusoïdal de la contrainte;
- φ_{σ} l'angle de phase du signal sinusoïdal de la contrainte;
- ω la pulsation où $\omega = 2\pi f_r$;
- f_r la fréquence;
- t le temps

La Figure 3.3 illustre la sollicitation imposée.

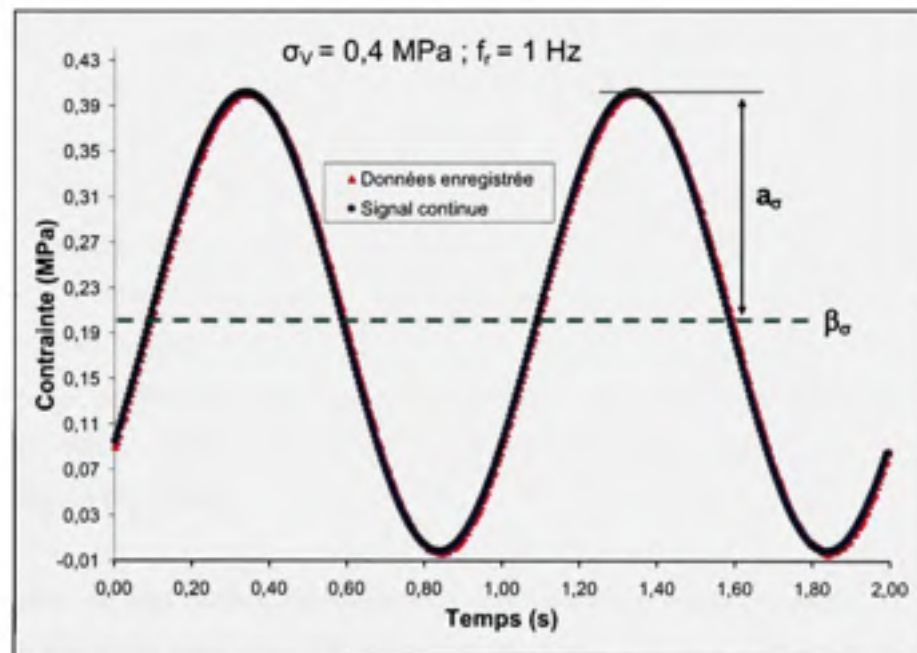


Figure 3.3 Exemple de signal discret de la contrainte avec son approximation par un signal continu.

La presse MTS permet d'imposer un chargement directement suivant une sollicitation sinusoïdale : c'est la consigne imposée. Cependant, dépendant des conditions d'essai

imposées et du matériau testé, il est possible que la réponse sur le matériau soit différente de la consigne. À partir des mesures effectuées en cours d'essai, nous pouvons établir la sollicitation effective imposée. En effet, puisque la consigne vise un signal de type sinusoïdal, nous avons utilisé la méthode des moindres carrés en vue de définir de façon rigoureuse l'amplitude (a_o), la contrainte moyenne (β_o) et l'angle de phase (φ_o) de l'amplitude de sollicitation imposée. La méthode d'approximation par les moindres carrés est décrite à l'annexe 1 et est utilisée pour convertir le signal discret de la contrainte en un signal continu.

La déformation

Dans un essai de déformation permanente, la déformation de l'éprouvette est mesurée en trois points distincts sur l'éprouvette testée, à l'aide de 3 extensomètres (50 mm). Lorsqu'un essai est réalisé sans temps de repos, la déformation mesurée est la déformation totale. La déformation totale est la déformation réelle mesurée en cours d'essai durant les cycles de chargement sans laisser de temps de repos. Dans le cas où l'essai est réalisé avec un temps de repos, il est possible de connaître la capacité à un enrobé de revenir à son état initial en mesurant la déformation réversible (ϵ_{rev}). La déformation réversible correspond à la portion élastique de l'enrobé bitumineux qui revient à sa place à la fin d'un chargement. Finalement, la déformation permanente est alors la déformation non réversible (ϵ_{perm} : permanente) dans l'enrobé après les temps de repos. La déformation permanente est obtenue en soustrayant la déformation réversible de la déformation totale. Idéalement, pour connaître la déformation permanente réelle, il faut laisser un temps de repos.

Dans le cadre de nos essais, nous n'avons pas laissé de temps de repos. Le signal de déformation moyenne totale (ϵ_T) est enregistré en respectant le minimum de la norme NF P 98-253-2. Durant l'enregistrement des données, un minimum de deux cycles doit être conservé en mémoire pour le traitement des résultats bruts. L'évolution de la déformation en cours de sollicitation est définie par l'équation suivante :

$$\epsilon_T(t) = \alpha_{eN}t + \beta_{eN} + a_{eN}\sin(\omega t + \varphi_{eN}) \quad (3.2)$$

Où,

- $\epsilon_T(t)$ la déformation moyenne totale en fonction du temps;
- α_{eN} la pente linéaire du signal de la déformation;
- β_{eN} la déformation moyenne initial du signal sinusoïdal;
- a_{eN} l'amplitude du signal sinusoïdal de la déformation;
- φ_{eN} l'angle de phase du signal sinusoïdal de la déformation;
- ω la pulsation où $\omega = 2\pi f$;
- f , la fréquence;
- t le temps

De cette équation sont obtenues la pente α_{eN} , et l'ordonnée à l'origine, β_{eN} , correspondant au $N^{\text{ème}}$ cycle de sollicitation, dans une séquence de deux cycles consécutifs. La Figure 3.4 montre un exemple du signal deux cycles consécutifs. Lorsque toutes les données sont traitées, il est possible de tracer l'évolution de β_{eN} en fonction du nombre de cycle en vue d'extrapoler les paramètres du modèle ESSO.

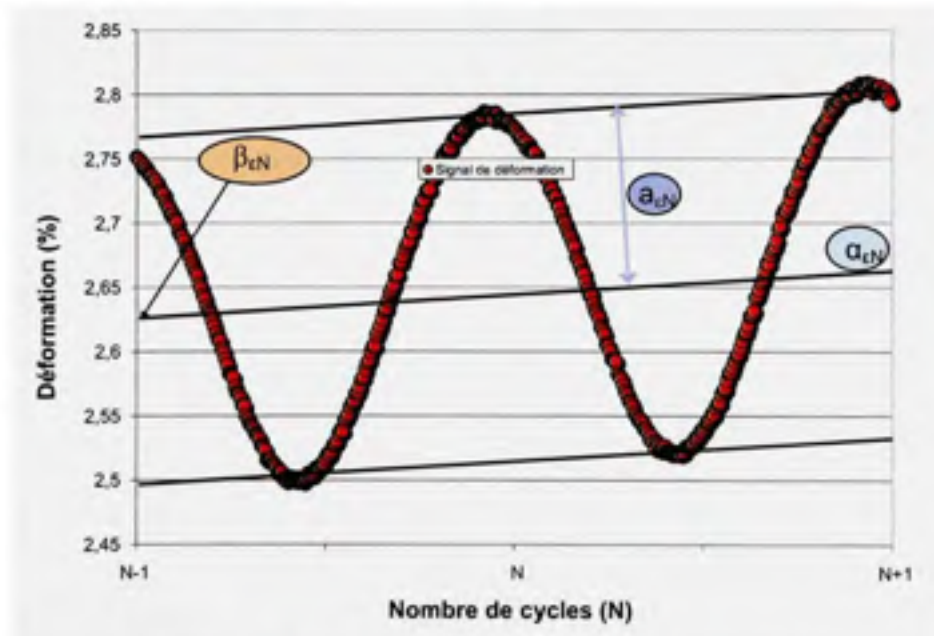


Figure 3.4 Exemple de données de déformation sur deux cycles pour un essai type.

La pente $\alpha_{\epsilon N}$ pour chaque groupe de deux cycles

La pente $\alpha_{\epsilon N}$ est calculée à partir de la courbe de déformation moyenne des trois extensomètres. À tous les deux cycles, la méthode intégrale d'approximation, décrite à l'annexe 2, est utilisée pour convertir les données discrètes en un signal continu.

L'ordonnée à l'origine $\beta_{\epsilon N}$ pour groupe de deux cycles

En utilisant l'équation 3.2 pour approximer le signal discret pour chaque deux cycles, le paramètre $\beta_{\epsilon N}$ correspond à la valeur de base initiale pour le groupe de cycles auquel le signal est analysé.

$$\epsilon_T(N) = \beta_{\epsilon N}(N) = \epsilon_0 + \dot{\epsilon}_N \quad (3.3)$$

3.2.3 Les paramètres ESSO

Deux paramètres ESSO sont tirés des résultats de l'essai de compression cyclique, soit $\dot{\epsilon}$, ϵ_0 . La Figure 3.5 présente l'évolution $\beta_{\epsilon N}$ en fonction du nombre de cycles de la courbe présentant les trois phases de la déformation moyenne totale.

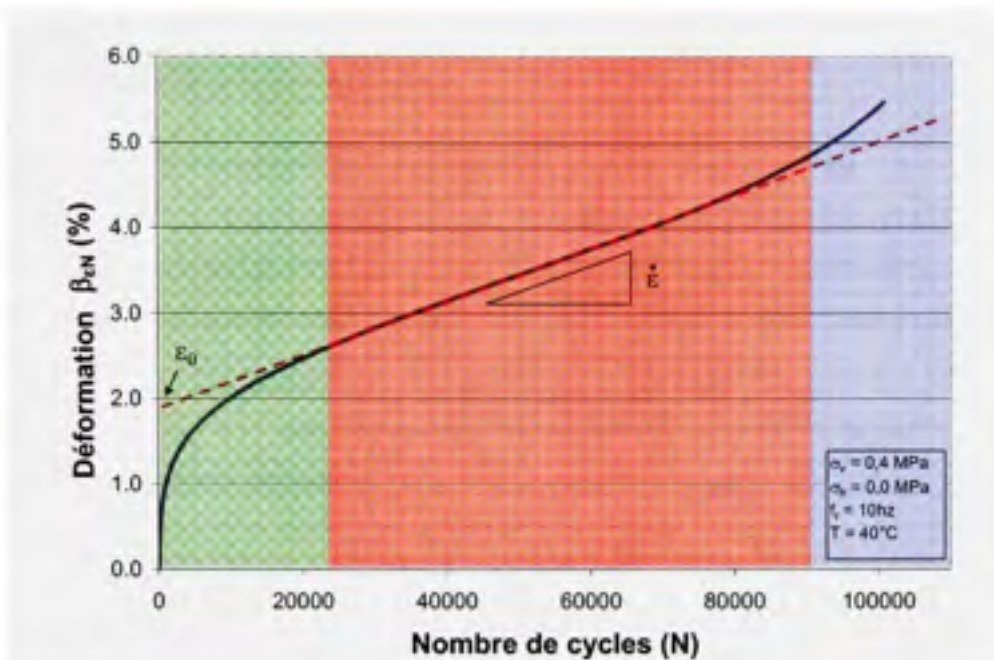


Figure 3.5 Exemple de données de β_{LN} pour un essai donné.

La pente ϵ sur l'essai en général

Pour l'analyse de l'évolution de la déformation permanente suivant la méthodologie ESSO, nous nous concentrons essentiellement sur la phase II (voir Figure 3.5). Rappelons que lorsque la déformation de l'éprouvette atteint la deuxième phase d'endommagement en déformation permanente, la pente demeure quasi constante durant un grand nombre de cycles. C'est cette pente qui sera utilisée dans le calcul des paramètres de la loi d'ESSO.

En admettant une évolution linéaire de la déformation permanente, laquelle est décrite par β_{LN} , on détermine à partir de la méthode des moindres carrés la pente la plus juste possible pour chaque essai de compression cyclique réalisé.

L'ordonnée à l'origine ϵ_0 de la déformation

L'ordonnée à l'origine générale de la portion linéaire de l'essai de compression cyclique (phase II) est obtenue en prolongeant la droite de la pente ϵ extrapolée par la méthode des moindres carrés linéaires vers l'ordonnée à l'origine.

3.2.4 Présentation des résultats

Les résultats d'un essai sont présentés à l'aide des données des déformations enregistrées par les trois extensomètres. Un graphique présentant la déformation de chaque extensomètre en fonction du nombre de cycle est généré avec les données traitées. Une courbe représentant une moyenne des déformations est également tracée sur le même graphique. C'est sur la courbe moyenne que sont calculés les paramètres β_{LN} , α_{LN} , $\dot{\epsilon}$, ϵ_0 et N_5 . La Figure 3.6 présente la déformation mesurée au cours de l'essai de compression cyclique sinusoïdale.

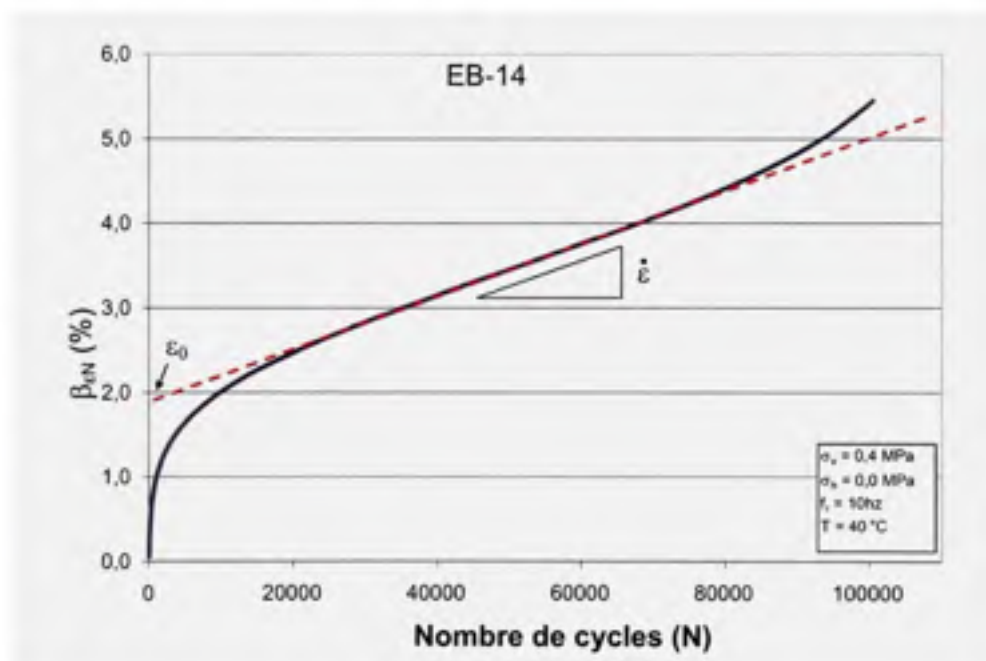


Figure 3.6 Exemple de données de la relation de la déformation moyenne totale initiale β_{LN} et le nombre de cycles pour un essai donné.

Calcul des paramètres ESSO

À partir d'une série d'essais de compression cyclique sinusoïdale, il est possible de calculer les constantes (A, B, C, D et F) de la loi de déformation permanente de la méthodologie ESSO du cumul de la déformation permanente. Pour parvenir à calculer ces

paramètres, il faut faire différentes combinaisons en faisant varier la contrainte verticale, la contrainte horizontale, la température et la fréquence des essais tel que spécifié à la section 2.2.

Finalement, on assumera que la pente de la déformation permanente établie en soustrayant la partie de la déformation réversible à la partie de la déformation permanente est prise comme étant la même que celle déterminée en considérant la déformation totale mesurée en cours d'essai.

CHAPITRE 4

DESCRIPTION DES MATÉRIAUX UTILISÉS, DES PROCÉDURES D'ESSAIS ET DE PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES

Le chapitre quatre présente la synthèse de tous les matériaux utilisés dans ce mémoire, les procédures d'essai et les différentes procédures de préparation des éprouvettes en vue de l'essai de déformation permanente. Ce chapitre conclut avec les propriétés physiques de chaque éprouvette testée dans ce mémoire.

4.1 Matériaux utilisés

Deux enrobés bitumineux couramment utilisés au Québec ont été testés dans le cadre de cette étude, soit l'enrobé EB-14, généralement utilisé en couche de base dans une structure de chaussée souple et l'enrobé ESG-10 utilisé en couche de surface.

Les sections qui suivent décrivent les caractéristiques principales de chacun des constituants utilisés dans la confection des enrobés bitumineux testés. L'ensemble de ces constituants est illustré à la Figure 4.1. Finalement, dans ce chapitre, seront présentées les formulations des enrobés testés à l'essai de compression cyclique sinusoïdale.

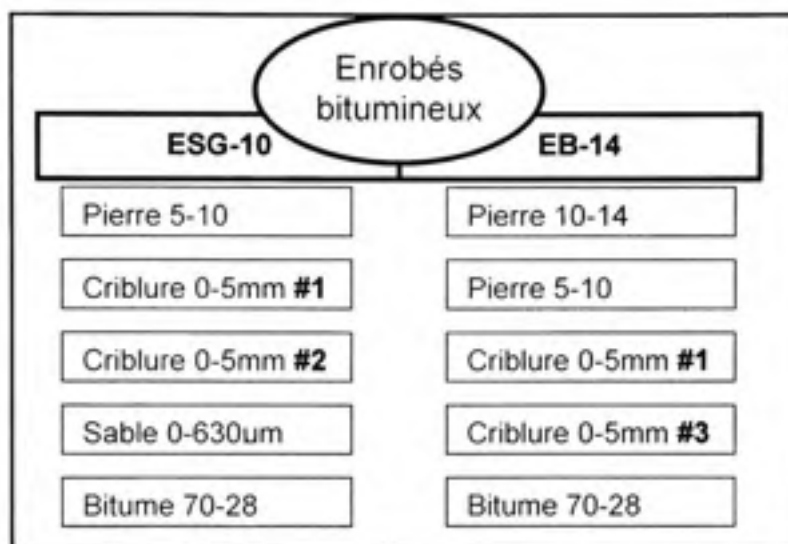


Figure 4.1 Constituants utilisés pour la confection des deux enrobés bitumineux testés.

4.1.1 Gros granulats (particules dont la dimension est supérieure à 5 millimètres)

Dans un premier temps, il est bon de rappeler que les enrobés ont été confectionnés directement en usine d'enrobage, soit à l'usine de Carignan. Suite au malaxage de l'enrobé, un échantillonnage de masse (150 boites de 10kg) a été réalisé suivant une procédure développée au LUCREB (voir annexe 3).

Pour la fabrication des enrobés, deux gros granulats ont été utilisés. Une pierre de calibre 5-10 provenant de la carrière St-Bruno et dont la nature minéralogique est un schiste métamorphique. Ce granulat est utilisé pour la confection des deux enrobés testés (ESG-10 et EB-14). Par ailleurs, une pierre de calibre 10-14, également de la carrière St-Bruno, a été utilisée pour la confection de l'enrobé EB-14. Le Tableau 4.1 présente les principales caractéristiques physiques des gros granulats utilisés.

Tableau 4.1

Caractéristiques des gros granulats utilisés pour la confection des enrobés ESG-10 et EB-14

Caractéristique physique	Norme	Calibre	5-10	10-14
		Type	Pierre	Pierre
		Provenance	St-Bruno	St-Bruno
		Minéralogie	Schiste	
Micro-Deval (%)	LC 21-070		4	4
Los Angeles (%)	LC 21-400		13	13
Micro-Deval + Los Ang. (%)	-		17	17
Fragmentation (%)	LC 21-100		100	100
Propreté au 80 µm (%)	CSA A23.2-5A		0,6	0,4
Coef. Polissage par proj.	LC 21-102		0,49	N/A
			Tamis (mm)	% passant
		20	100	100
		16	100	99
		14	100	82-92
		10	88-91	19
		5	11	1
		2,5	1	1
		1,25	1	1
		0,630	1	1
		0,315	1	1
		0,160	1	1
		0,080	0,7	0,5
		Densité brute (d_{gb})	2,793	2,826
		Densité apparente (d_{ga})	2,829	2,849
		Absorption (%)	0,45	0,29

4.1.2 Granulats fins (particules dont la dimension moyenne est inférieure à 5 millimètres)

Quatre granulats fins ont été utilisés. Une criblure de calibre 0-5 mm provenant de la carrière St-Bruno, dont la nature minéralogique est également un schiste métamorphique a été utilisée dans l'enrobé ESG-10 alors qu'une autre criblure de calibre 0-5 mm provenant de la carrière St-Philippe (calcaire) a été utilisée pour la confection des deux enrobés testés (ESG-10 et EB-14). Par ailleurs, un sable de calibre 0-630 microns provenant de la sablière Gaudette a été utilisé pour l'enrobé ESG-10 de manière à corriger la granulométrie

fine. Finalement, un dernier granulat fin, une criblure manufacturée de calibre 0-5 mm de la carrière Tracy a été utilisée pour la confection de l'enrobé EB-14. Les propriétés physiques de ces granulats fins sont présentées au Tableau 4.2.

Tableau 4.2

Caractéristiques des granulats fins utilisés pour la confection des enrobés ESG-10 et EB-14

Caractéristique physique	Norme	Calibre	0-5	0-5	0-630	0-5
		Type	Criblure	Criblure	Sable	Criblure
		Provenance	St-Bruno	St-Philippe	Gaudette	Tracy
Particule inférieure à 5 μ m (%)	NQ 2501-025		0,7	3,4	0,1	0,3
Motte d'arg. & part. fri. (%)	BNQ 2560-250		0,3	0,5	N/A	0,2
		Tamis (mm)	% passant			
		10	100	100	100	100
		5	93	94	100	96
		2,5	55	68	100	74
		1,25	31	47	98	43
		0,630	19	35	86	23
		0,315	12	26	53	12
		0,160	9	19	13	4
		0,080	6,5	14,6	2,7	1,2
		Densité brute (d_{gb})	2,765	2,704	2,618	2,839
		Densité apparente (d_{ga})	2,818	2,771	2,691	2,954
		Utilisé pour la confection des enrobés	ESG-10	ESG-10 EB-14	ESG-10	EB-14

4.1.3 Bitume

Dans les deux enrobés bitumineux testés, le même bitume (grade, provenance et lot) a été utilisé, soit un PG 70-28. Une copie du certificat de conformité du bitume est donnée à l'annexe 4.

4.2 Formulation des enrobés utilisés

Les enrobés utilisés dans ce mémoire ont été prélevés en masse à l'usine d'enrobage. Les éprouvettes testées dans ce programme d'essai furent confectionnées à partir de

boîtes d'enrobé sélectionné aléatoirement. Pour vérifier que cette approche permet de conserver l'homogénéité des lots prélevés, Meunier (Meunier 2005) et Balba (Balba 2006) ont analysé la variabilité du lot en mesurant les propriétés de l'enrobé à partir d'un échantillonnage aléatoire de 10 boîtes sur le lot de 150. Une autre étude menée par Bilodeau (Bilodeau 2008) sur la reproductibilité de mélanges reconstitués en laboratoire a permis de conclure que la sélection aléatoire de boîtes parmi celles échantillonnées en masse pour la confection des éprouvettes conserve l'homogénéité de chaque éprouvette. En conséquent, nous assumons que les propriétés de chacune des éprouvettes testées sont représentatives de l'ensemble du lot.

L'enrobé ESG-10 est composé de 43% de pierre 5-10, 22% de la criblure (St-Bruno), 22% de la criblure (St-Philippe) et 13 % de sable (Gaudette). La teneur en bitume de cet enrobé est fixée à 5,2%. La densité brute du mélange est 2,456 tandis que la densité maximale est 2,547.

L'enrobé EB-14 est composé de 18% de pierre 10-14 (St-Bruno), 28% de pierre 5-10 (St-Bruno), 35% de criblure 0-5 (St-Philippe) et 19% de criblure 0-5 (Tracy). La teneur en bitume de cet enrobé est fixée à 4,8%. La densité brute du mélange est 2,495 tandis que la densité maximale est 2,586.

La formulation de chacun des deux enrobés testés (EB-14 et ESG-10) est donnée au Tableau 4.3.

Tableau 4.3

Formulation des enrobés ESG-10 et EB-14

Propriétés du combiné granulaire		
	ESG-10	EB-14
28,0	100	100
20,0	100	100
14,0	100	97
10,0	96	81
5,0	59	54
2,5	40	38
1,25	30	25
630	23	17
315	16	12
160	8	8
80	5,3	5,6
d_{gb}	2,743	2,776
d_{ga}	2,795	2,833
Absorption à l'eau	0,67%	0,72%
Propriétés de l'enrobé		
% bitume	5,20	4,8
Volume de bitume effectif V_{be} (%)	12,2	11,3
Teneur en vides (%)	3,6	3,5
Vide dans l'agrégat minéral V.A.M (%)	15,3	N/D
Vides comblés par le bitume V.C.B. (%)	76,7	75,6
Film de bitume effectif F.B.E (μm)	8,69	8,32
Stabilité (N)	17005	12200
Fluage (mm)	3,5	2,9
Densité brute d_{mb}	2,456	2,495
Densité maximale d_{mm}	2,547	2,586

4.2.1 Confection des éprouvettes

Les éprouvettes utilisées pour la réalisation des essais de compression cyclique sinusoïdale ont été compactées en laboratoire au LUCREB à l'aide du compacteur de plaques MLPC. Les éprouvettes ont ensuite été extraites par carottage. Les sous-sections suivantes présentent les principales étapes liées à la confection de ces éprouvettes.

Compactage des plaques

Des plaques de dimensions 400mm de largeur par 600 mm de longueur par 125 mm d'épaisseur ont été confectionnées à l'aide du compacteur de plaques MLPC. La Figure 4. 2 illustre le compacteur de plaques MLPC utilisé pour le compactage des plaques au cours de cette étude. Dû à la quantité d'essais requis pour caractériser les enrobés bitumineux selon la méthodologie ESSO, un total de sept plaques pour chacun des deux enrobés à l'étude ont été confectionnés.



Figure 4. 2 *Compacteur MLPC.*

Carottage des éprouvettes

Le carottage des plaques a été réalisé selon le plan de carottage décrit à la Figure 4.3. Au total, entre le carottage des éprouvettes et le compactage de la plaque, une cure de deux à trois semaines a été respectée avant le carottage. Le jour de l'essai, les éprouvettes n'avaient pas nécessairement le même âge. La date d'échantillonnage des mélanges est inscrite au Tableau 4.4 ainsi que la date de compactage et la date de carottage. Les éprouvettes ont une dimension de 80mm de diamètre par 120mm de longueur et sont identifiées selon le code suivant : [A3-2] (Lettre # - #) où la lettre A correspond à l'une des quatre sections (A à D) de la plaque dans laquelle le carottage est effectué (voir Figure 4.3). Le premier numéro [3] correspond au numéro séquentiel (1 à 7) de la fabrication de la plaque et le second numéro [2] représente la position dans la section de la plaque.

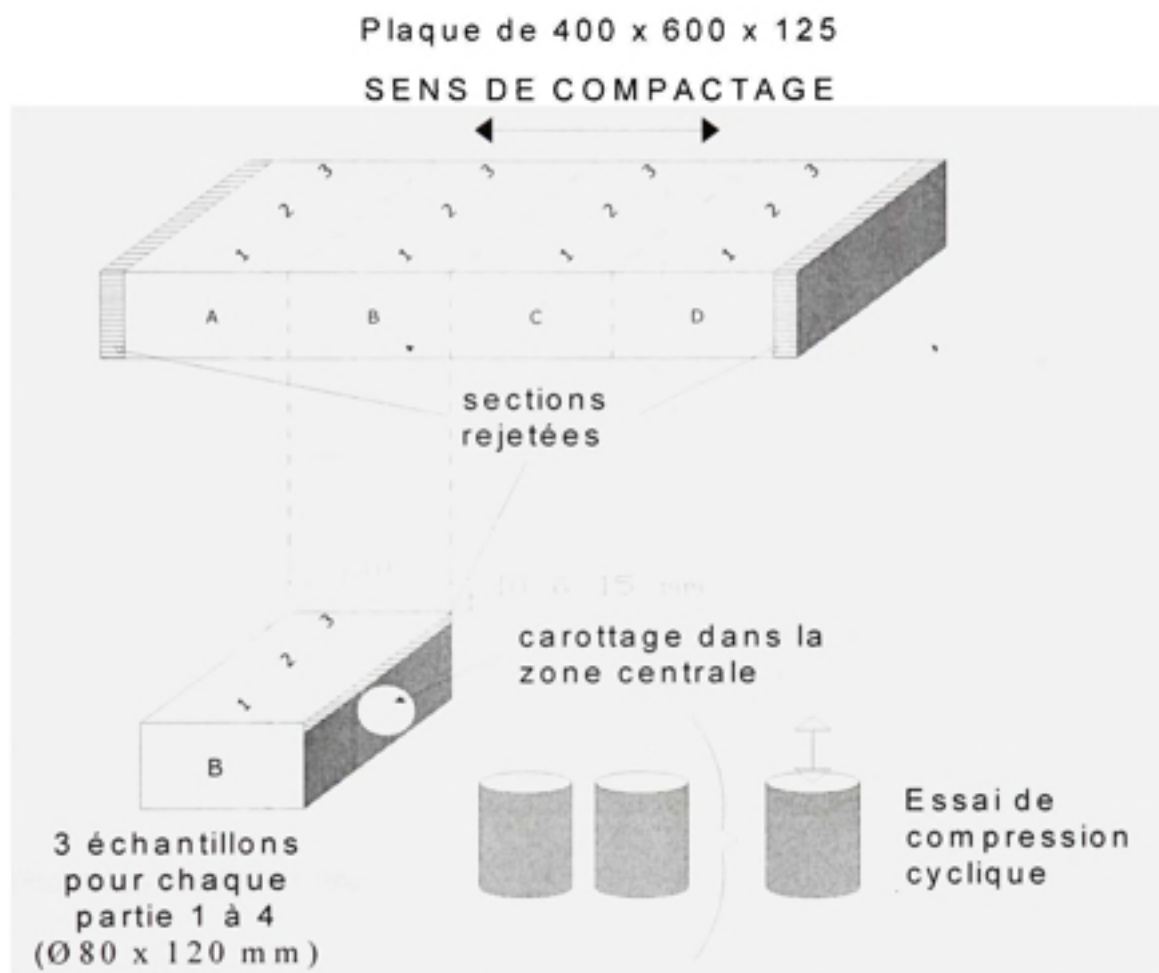


Figure 4.3 Schématisation du plan de carottage des éprouvettes pour fin d'essais de compression cyclique sinusoïdale.

Tableau 4.4

Dates de compaction et dates de carottage des
échantillons d'enrobés EB-14 et ESG-10

Enrobé	# de plaque	Date de compaction	Date de carottage
EB-14 Échantillonné en usine le 06102003	1	N/A	N/A
	2	19022007	03032007
	3	24042007	05052007
	4	08072007	21072007
	5	14122007	06012008
	6	18122007	09012008
	7	15012008	28012008
ESG-10 Échantillonné en usine le 06102003	1	19022007	04032007
	2	19022007	05032007
	3	24042007	06052007
	4	12072007	25072007
	5	08012008	20012008
	6	08012008	21012008
	7	17012008	30012008

Entreposage des échantillons

Suite au carottage, les échantillons sont entreposés à l'horizontal dans un lit de sable jusqu'au moment du collage des casques d'aluminium. Une fois les casques collés, les échantillons sont à nouveau déposés sur le lit de sable jusqu'au jour de l'essai de manière à s'assurer qu'ils soient suffisamment bien supportés pour éviter tout risque de gauchissement. L'ensemble des échantillons est entreposé dans une chambre à température contrôlée ($T = 20^{\circ}\text{C}$).

4.2.2 Caractéristiques des échantillons

Pour chacune des échantillons utilisées dans cette recherche, plusieurs caractéristiques correspondant à ces dernières ont été recueillies, soit : 1) le numéro du spécimen, 2) la hauteur moyenne et le diamètre moyen de trois valeurs, 3) la masse de l'échantillon, 4) la

densité brute, 5) la densité maximale (de formulation) et 6) le pourcentage de vide du mélange. Les tableaux 4.6 et 4.7 présentent les caractéristiques physiques de chaque éprouvette testée ainsi que la date de la réalisation de l'essai pour les enrobés EB-14 et ESG-10 respectivement. Pour l'enrobé EB-14, la teneur en vide des éprouvettes utilisées se situe autour de 5,1% avec des valeurs variant de 3,0 à 6,4 %. Pour l'enrobé ESG-10, la valeur moyenne est établie à 4,8% suivant une plage comprise entre 3,6% à 6,0%.

Tableau 4.5

Caractéristiques physiques et dates de l'essai
des éprouvettes d'enrobés EB-14

Échantillon (#)	Hauteur (mm)	Diamètre (mm)	Masse (g)	d_{nb} ^A	d_{mm}	% Vides ^B	Date de l'essai
A2-3	117,1	79,2	1417,9	2,460	2,586	4,9	05062007
A3-3	122,9	79,2	1471,7	2,433	2,586	5,9	06052007
A3-4	122,9	79,2	1471,7	2,433	2,586	5,9	22062007
A5-1	120,9	79,1	1468,1	2,470	2,586	4,5	02012008
A5-2	120,8	79,2	1457,3	2,450	2,586	5,2	29122007
A5-3	118,9	79,2	1442,4	2,463	2,586	4,8	11012008
A6-1	121,7	79,2	1458,4	2,432	2,586	5,9	18012008
A6-2	118,4	79,2	1441,6	2,472	2,586	4,4	20012008
B2-2	121,7	79,2	1462,6	2,442	2,586	5,6	12042007
B3-3	123,1	79,4	1489,1	2,442	2,586	5,6	06052007
B4-2	121,1	79,1	1460,6	2,433	2,586	5,2	12122007
B5-1	117,6	79,2	1429,4	2,463	2,586	4,8	19122007
B5-2	117,1	79,2	1414,5	2,449	2,586	5,3	02012008
B5-3	117,5	79,2	1414,7	2,442	2,586	5,6	02012008
B6-1	120,0	79,2	1437,5	2,435	2,586	5,8	13022006
B6-2	119,9	79,2	1440,0	2,437	2,586	5,8	17012008
C2-3	119,4	79,1	1471,9	2,509	2,586	3,0	18042007
C3-1	118,1	79,1	1428,5	2,460	2,586	4,9	09072007
C3-2	118,3	79,1	1408,8	2,420	2,586	6,4	11062007
C3-3	117,5	79,1	1418,3	2,455	2,586	5,0	26062007
C5-1	117,0	79,1	1421,8	2,469	2,586	4,5	14012008
C5-2	119,2	79,3	1429,9	2,430	2,586	6,0	10012008
C5-3	117,2	79,3	1408,1	2,432	2,586	6,0	10012008
C6-1	122,8	79,2	1479,0	2,446	2,586	5,4	17012008
C6-3	122,7	79,1	1478,8	2,443	2,586	5,5	12022008
D3-1	121,4	79,2	1455,0	2,435	2,586	5,8	19062007
D3-2	122,0	79,0	1457,2	2,435	2,586	5,8	13062007
D3-3	123,1	79,1	1483,0	2,451	2,586	5,2	14062007
D4-2	121,1	79,1	1448,5	2,435	2,586	5,8	15122007
D5-1	118,5	79,1	1436,6	2,462	2,586	4,8	15012008
D5-2	119,5	79,4	1442,8	2,437	2,586	5,8	14012008
D5-3	120,0	79,1	1448,6	2,454	2,586	5,1	26122007
D6-1	120,6	79,2	1450,0	2,439	2,586	5,7	16012008
D6-2	120,7	79,1	1448,7	2,441	2,586	5,6	21012008

^A la d_{nb} est calculée à partir des dimensions et de la masse de chaque éprouvette

$$\text{\% vide} = \left(1 - \frac{d_{nb}}{d_{mm}}\right) \cdot 100$$

Tableau 4.6

Caractéristiques physiques et dates de l'essai
des éprouvettes d'enrobés ESG-10

Échantillon (#)	Hauteur (mm)	Diamètre (mm)	Masse (g)	d_{mb}^A	d_{mm}	% Vides ^B	Date de l'essai
A2-3	120,2	79,1	1429,8	2,418	2,547	5,1	03072007
A4-1	120,7	79,3	1444,3	2,425	2,547	4,8	05112007
A5-1	122,3	79,1	1464,8	2,439	2,547	4,2	22012008
A5-2	120,6	79,1	1438,1	2,424	2,547	4,8	06022008
A5-3	119,7	79,1	1437,0	2,441	2,547	4,2	27012008
A6-1	119,9	79,1	1434,2	2,431	2,547	4,6	09022008
A6-2	120,2	79,2	1435,0	2,421	2,547	4,9	19022008
A6-3	121,5	79,2	1452,3	2,428	2,547	4,7	20022008
B2-2	123,6	79,1	1475,4	2,432	2,547	4,5	12042007
B2-3	124,7	79,1	1485,5	2,426	2,547	4,7	01072007
B3-1	120,6	79,1	1435,6	2,423	2,547	4,9	10072007
B3-2	121,0	79,2	1432,7	2,405	2,547	5,6	11072007
B3-3	121,6	79,1	1448,4	2,421	2,547	5,0	27062007
B4-2	122,0	79,2	1460,6	2,433	2,547	4,5	12122007
B5-1	118,8	79,2	1416,4	2,422	2,547	4,9	22012008
B5-2	121,0	79,2	1450,3	2,433	2,547	4,5	05022008
B5-3	121,9	79,2	1462,6	2,437	2,547	4,3	28012008
B6-1	116,5	79,2	1395,5	2,431	2,547	4,5	13022008
B6-2	118,6	79,1	1411,7	2,420	2,547	5,0	19022008
C2-2	124,1	79,1	1486,2	2,437	2,547	4,3	21062007
C3-1	116,6	79,1	1388,8	2,425	2,547	4,8	04072007
C3-2	117,7	79,0	1388,7	2,404	2,547	5,6	03072007
C3-3	119,0	79,1	1422,8	2,431	2,547	4,6	05112007
C4-2	119,5	79,0	1438,8	2,454	2,547	3,6	19012007
C5-1	120,5	79,3	1449,0	2,437	2,547	4,3	05022008
C5-2	122,0	79,1	1469,0	2,437	2,547	4,3	06022008
C5-3	120,5	79,2	1435,2	2,416	2,547	5,2	29012008
C6-1	119,1	79,1	1428,6	2,438	2,547	4,3	14022008
C6-2	121,4	79,1	1445,1	2,421	2,547	4,9	19022008
C6-3	120,9	79,2	1445,8	2,426	2,547	4,8	08052008
D3-2	121,7	79,1	1430,8	2,394	2,547	6,0	21062007
D4-2	121,5	79,1	1457,9	2,441	2,547	4,2	15122007
D5-1	121,2	79,2	1442,8	2,420	2,547	5,0	07022008
D5-2	118,7	79,2	1423,4	2,436	2,547	4,4	14022008
D5-3	121,1	79,3	1446,9	2,423	2,547	4,9	04022008
D6-1	120,5	79,2	1439,6	2,424	2,547	4,8	18022008

^A la d_{mb} est calculée à partir des dimensions et de la masse de chaque éprouvette

$$\text{\% vide} = \left(1 - \frac{d_{mb}}{d_{mm}}\right) \times 100$$

CHAPITRE 5

RÉSULTATS DES ESSAIS DE DÉFORMATION PERMANENTE

Dans ce chapitre, les résultats des essais de compression cyclique sur éprouvette cylindrique sont présentés. Dans un premier temps, pour chaque enrobé testé, l'ensemble des courbes d'essais est regroupé selon des conditions de sollicitation similaires telles que la contrainte verticale et la fréquence de sollicitation. Finalement, pour chacun des enrobés testés, les résultats des essais seront reportés dans un tableau synthèse.

Les courbes individuelles des essais de déformation permanente de chaque enrobé sont présentées à l'annexe 5 pour l'enrobé ESG-10 et à l'annexe 6 pour l'enrobé EB-14. Ces annexes montrent également les tableaux des résultats de chaque enrobé respectif.

5.1 Courbes d'essais regroupées selon la fréquence et la contrainte verticale

Les figures 5.1 et 5.2 présentent la relation entre le pourcentage de déformation totale et le nombre de cycles pour l'ensemble des courbes d'essais effectués sur les éprouvettes d'enrobés ESG-10 et EB-14 respectivement.

Pour les essais à déformation très prononcée, certaines courbes ne peuvent laisser apparaître les trois phases de la déformation permanente. De manière à mieux voir l'évolution de la déformation des essais, pour chaque enrobé testé, les courbes d'essai ont été regroupées selon la fréquence et la contrainte verticale appliquée.

Les résultats montrent que, dans le cas où la fréquence est élevée, la température basse et une faible contrainte verticale, les déformations sont moins prononcées en fonction du nombre de cycles. À l'inverse, des déformations plus grandes sont obtenues avec une diminution de la fréquence, une température plus élevée et une augmentation de l'amplitude de la contrainte verticale. Les figures 5.1 et 5.2 montrent que les trois phases de la déformation permanente sont perceptibles à quelques reprises.

Pour les essais où de faibles déformations (moins de 2%), seules la première et la deuxième phases sont visibles. Pour se rendre dans la troisième phase, il aurait fallu énormément de cycles de sollicitation. Étant donné que l'on ne travaille qu'avec les données de la deuxième phase, ces essais furent interrompus après quelques centaines de milliers de cycles. Par ailleurs, pour les essais qui ont présenté de très grande déformation avec peu de cycles, la deuxième phase semble quasi absente. Pour environ quatre essais par enrobé, les trois phases de la déformation permanente sont visibles.

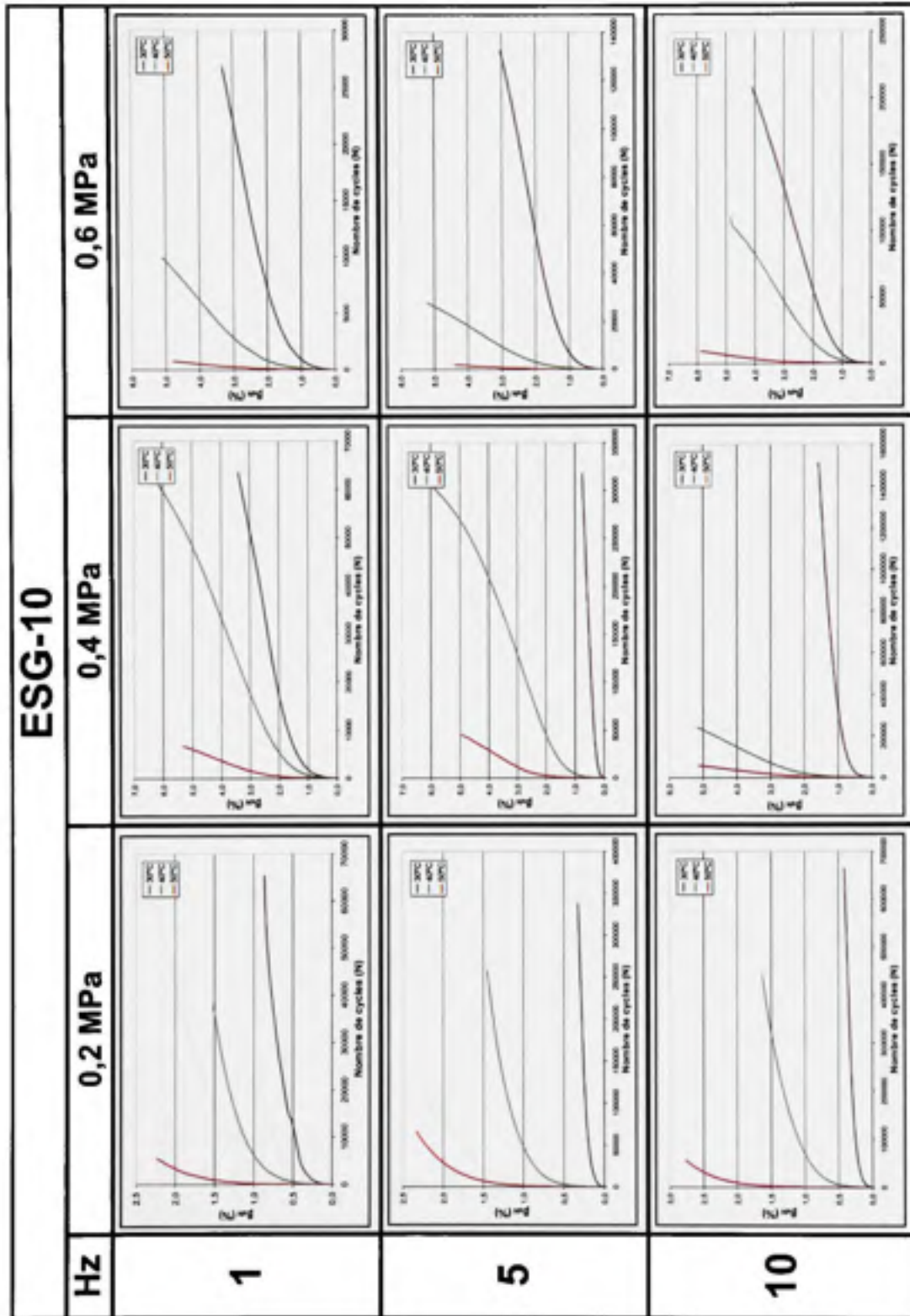


Figure 5.1 Courbes de résultats des essais de déformation permanente pour l'enrobé ESG-10.

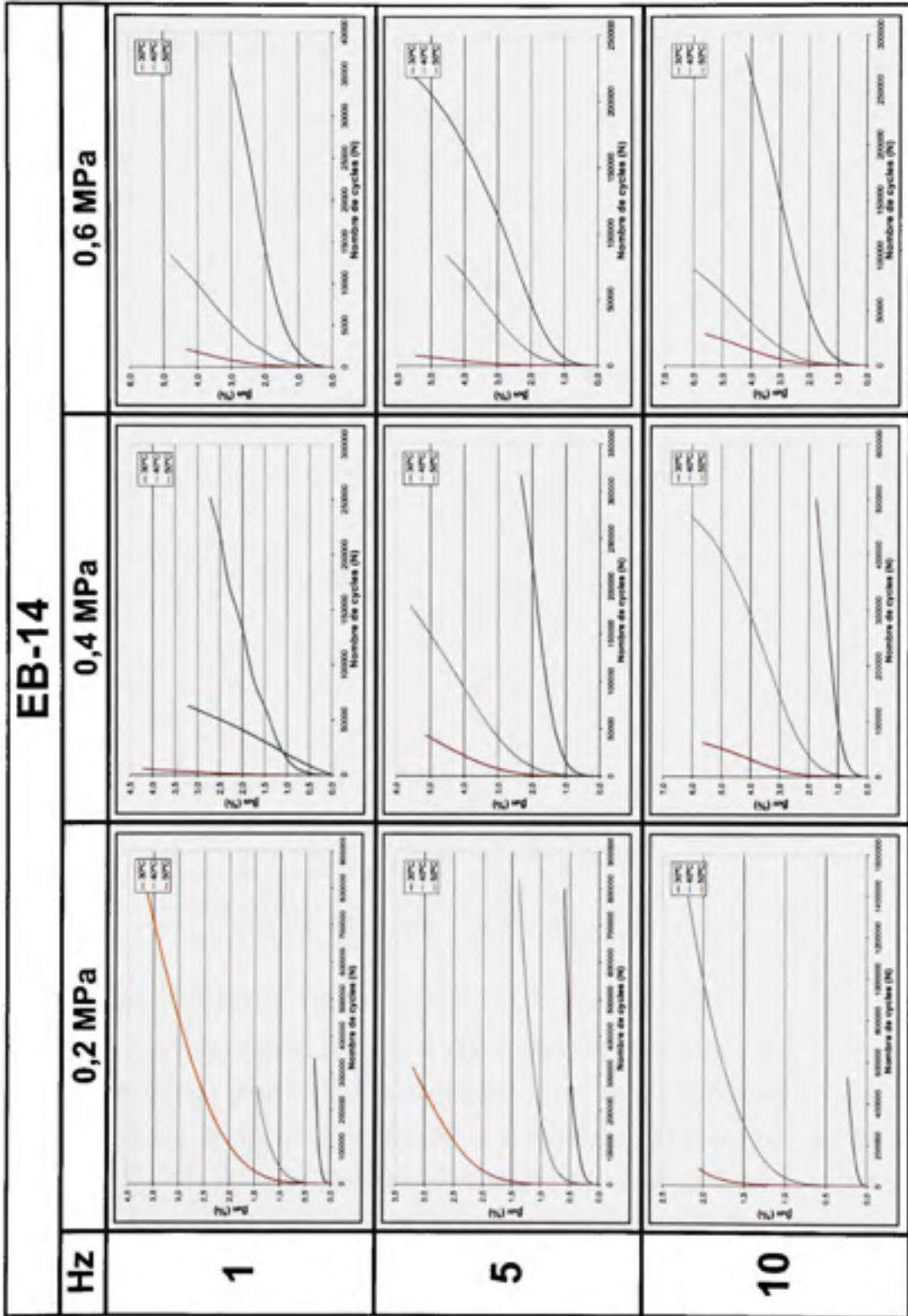


Figure 5.2 Courbes de résultats des essais de déformation permanente pour l'enrobé EB-14.

5.2 Synthèse des résultats

Le Tableau 5.1 et le Tableau 5.2 montrent la synthèse des résultats des essais de déformation permanente réalisés sur les enrobés bitumineux ESG-10 et EB-14 respectivement. Les résultats sont classés selon le niveau de contrainte verticale et la fréquence.

Tableau 5.1

Synthèse des résultats aux essais de déformation permanente pour l'enrobé ESG-10

ESG-10								
σ_v MPa	σ_H MPa	f_r (Hz)	30°C		40°C		50°C	
			ϵ_0 (%)	$\dot{\epsilon}$ (%/Mc)	ϵ_0 (%)	$\dot{\epsilon}$ (%/Mc)	ϵ_0 (%)	$\dot{\epsilon}$ (%/Mc)
0,2	0	1	0,769	1,478	1,071	12,10	1,711	95,60
		5	0,207	0,360	1,087	1,436	1,862	7,308
		10	0,260	0,236	1,086	1,236	2,209	10,23
0,4	0	1	1,576	27,46	1,885	63,76	2,482	423,2
		5	0,309	1,415	1,482	11,93	2,405	56,37
		10	0,920	0,451	2,159	12,56	2,294	49,81
0,6	0	1	1,634	62,35	2,240	287,3	2,434	3192
		5	1,246	13,33	1,903	116,7	2,282	1131
		10	0,909	7,690	1,682	28,16	3,029	316,6
0,6	0,1	10	1,778	0,288	N/D	N/D	N/D	N/D
	0,2	10	0,845	0,090	N/D	N/D	N/D	N/D

À partir des résultats du tableau ci-dessus, on peut voir la tendance de $\dot{\epsilon}$ lorsque les conditions d'essais varient. Lorsque la fréquence et la température sont fixées, la pente $\dot{\epsilon}$ dans la deuxième phase tend à augmenter avec une augmentation de la contrainte verticale. Dans le cas où la fréquence et la contrainte verticale sont fixées, il y a une augmentation de $\dot{\epsilon}$ lorsque la température augmente. D'un autre côté, la pente de l'essai diminue suivant une augmentation de la fréquence pour des conditions fixées sauf dans un cas soit à la température 40°C et $\sigma_v=0,4$ MPa.

Tableau 5.2

Synthèse des résultats aux essais de déformation permanente pour l'enrobé EB-14

ESG-10								
σ_v MPa	σ_H MPa	f_r (Hz)	30°C		40°C		50°C	
			ϵ_0 (%)	$\dot{\epsilon}$ (%/Mc)	ϵ_0 (%)	$\dot{\epsilon}$ (%/Mc)	ϵ_0 (%)	$\dot{\epsilon}$ (%/Mc)
0,2	0	1	0,912	0,171	1,846	0,636	2,147	19,32
		5	0,532	0,102	1,066	0,366	2,039	3,870
		10	0,131	0,211	1,952	0,352	1,794	3,301
0,4	0	1	1,148	6,474	0,136	45,92	2,031	401,6
		5	1,761	2,127	2,262	18,59	2,801	56,18
		10	0,879	1,821	1,966	7,100	2,451	51,91
0,6	0	1	1,295	48,49	1,865	219,1	1,778	1540
		5	1,080	15,00	1,866	31,66	2,721	358,2
		10	1,643	9,091	2,454	39,71	2,458	109,8
0,6	0,1	10	1,255	0,118	N/D	N/D	N/D	N/D
	0,2	10	1,119	0,085	N/D	N/D	N/D	N/D

Pour l'enrobé bitumineux EB-14, les mêmes tendances sont observables, soient l'augmentation de la pente de la deuxième phase de la déformation permanente suivant une augmentation de la température, une diminution de la fréquence et une augmentation de la contrainte verticale.

CHAPITRE 6

ANALYSE DES RÉSULTATS

Le chapitre 6 regroupe la synthèse de l'analyse des résultats de cette étude. Dans un premier temps, deux sections couvrent le calcul des constantes pour les enrobés ESG-10 et EB-14 selon la méthodologie proposée par Aussedat. Une troisième section permettra de vérifier l'indépendance des constantes B, D et F suivant une variation de la fréquence ou de la température. À partir des relations obtenues suite à la vérification de l'indépendance, une quatrième section permettra de valider la loi de déformation permanente ($\dot{\epsilon}_{calculée}$) avec les valeurs des taux de la déformation permanente en cours de phase 2 mesurées sur les courbes d'essai ($\dot{\epsilon}_{mesurée}$). Un outil développé servira à vérifier la variation entre la valeur calculée et celle mesurée. Pour l'optimisation des constantes, les tendances observées seront utilisées pour tenter de minimiser les écarts entre $\dot{\epsilon}_{calculée}$ et $\dot{\epsilon}_{mesurée}$. À chaque fin de section, les constantes calculées de cette étude seront comparées avec celles obtenues à partir des travaux de Aussedat (1977).

6.1 Calcul des constantes A, B, C D et F de la loi d'ESSO pour l'enrobé ESG-10

Le calcul des constantes est réalisé selon la méthodologie ESSO décrite à la section 2.2. Les résultats utilisés dans le calcul des constantes de la loi de déformation permanente de l'enrobé ESG-10 sont présentés au Tableau 5.1 du chapitre précédent.

Les constantes A et B

Les paramètres A et B de la loi d'ESSO sont obtenus en traçant la pente de la déformation mesurée, en fonction de la contrainte verticale dans les axes $\log \dot{\epsilon}$ et $\log \sigma_v$. La Figure 6.1 illustre cette relation pour les conditions de référence de la loi de déformation permanente fixées à $\sigma_H = 0$, $T = 30^\circ\text{C}$ et $f = 10\text{Hz}$.

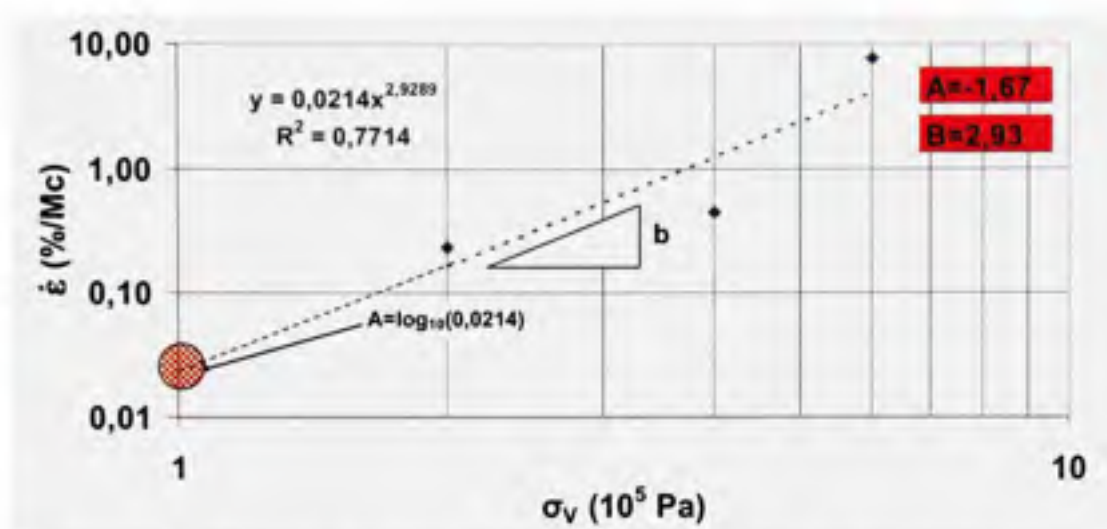


Figure 6.1 *Pente de la deuxième phase de la déformation permanente $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_v pour l'enrobé ESG-10 ($\sigma_H = 0$, $T = 30^\circ\text{C}$ et $f = 10\text{Hz}$).*

Sur la Figure 6.1, on observe que la régression linéaire a un R^2 de 0,77. La valeur $\dot{\epsilon}_{\text{mesurée}}$ obtenue pour la contrainte verticale $\sigma_v = 0,4\text{MPa}$ semble s'écarter de l'alignement des autres valeurs expliquant un faible R^2 . Après vérification des trois courbes d'essais de l'enrobé ESG-10, on constate que la valeur de $\dot{\epsilon}_{\text{mesurée}}$ à la contrainte verticale 0,4 MPa fut obtenue avec peu de cycles de sollicitation. Avec la faible déformation totale obtenue (de l'ordre de 0,4%), il n'est pas possible de valider que la deuxième phase aie été atteinte. Une augmentation du nombre de cycles de sollicitation aurait aidé à mesurer une valeur plus adéquate. La réalisation d'un double essai sur un ou tous les σ_v aurait également permis de valider chaque pente d'essai $\dot{\epsilon}$ et, par ce fait même préciser la loi de base de la déformation permanente (équation 2.11) de l'enrobé ESG-10.

La loi de puissance approchée par les moindres carrés pour les conditions de référence est $y = 0,0214 x^{2,929}$. De cette équation, les constantes A et B sont obtenues. La constante B est 2,929 et la constante A est égale au $\log_{10}(0,0214)$ soit, -1,67. Les constantes calculées pour l'enrobé ESG-10 sont reportées au Tableau 6.1 avec les constantes obtenues par Aussedat.

Tableau 6.1

Synthèse des constantes calculées (A et B) de l'enrobé ESG-10 avec les constantes correspondantes calculées par Aussedat

Constantes	ESG-10	Aussedat
A	-1,67	-2,04
B	2,93	4,33

À première vue, les constantes de l'enrobé ESG-10 et celles obtenues par Aussedat sont du même ordre de grandeur. De plus, le signe de chaque constante est le même, soit un signe négatif pour la constante A et un signe positif pour la constante B.

La constante C

Le paramètre C représente l'effet du confinement de l'éprouvette sur la vitesse de déformation permanente $\dot{\epsilon}$ lors d'un essai de déformation permanente. Dans ce mémoire, seulement deux essais ont été effectués de manière à caler la constante C. Un premier essai est réalisé avec une pression de confinement égale à 0,1 MPa puis un second à une contrainte de 0,2 MPa. Les autres conditions d'essai sont fixées à $T = 30^{\circ}\text{C}$; $f_r = 10\text{Hz}$ et $\sigma_v = 0,6\text{ MPa}$. La pente b de la loi de puissance est assumée constante peu importe le confinement appliqué sur l'éprouvette. La Figure 6.2 illustre la relation $\dot{\epsilon}_{\text{mesurée}}$ en fonction de σ_v des différentes conditions d'essais utilisées pour l'obtention de la constante C.

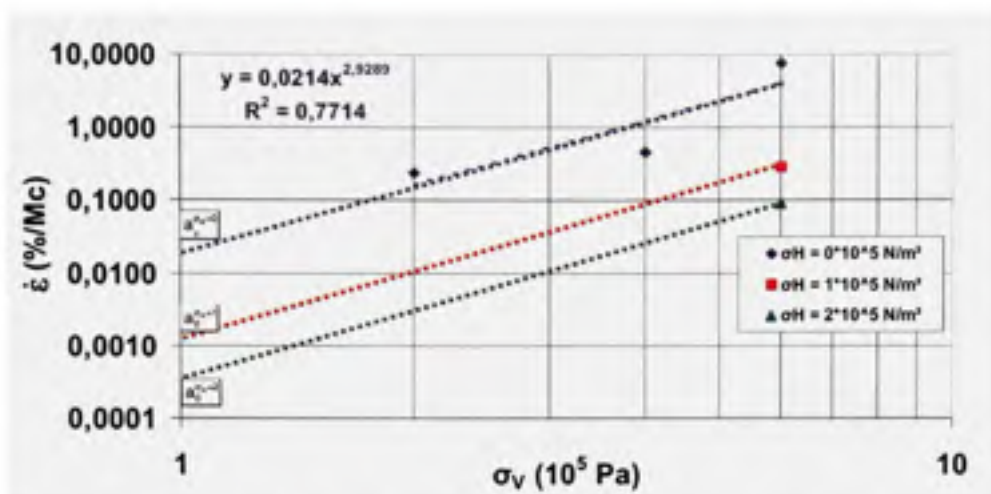


Figure 6.2 Pente de la déformation $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_V pour l'enrobé ESG-10 à pour trois confinements différents ($T = 30^\circ\text{C}$; $f_r = 10\text{Hz}$).

Les valeurs extrapolées des courbes de la loi de puissance vers $\sigma_V = 10^5$ Pa donne le paramètre $a_0^{\sigma_H}$ pour chacun des σ_H à l'étude. Pour obtenir le paramètre $a_0^{\sigma_H}$, lorsque σ_H est égale à 0,1 MPa et 0,2 MPa, on utilise la même loi de puissance sauf que l'on fait passer cette loi par les couples ($\dot{\epsilon}_{\text{mesurée}}$ et σ_V) correspondant aux pressions de confinement de 0,1MPa et 0,2MPa. Les valeurs de $a_0^{\sigma_H}$ pour chaque $\Delta\sigma_H$ sont reportées à la Figure 6.3 afin de calculer la constante C de l'enrobé ESG-10 où C correspond à la pente de la relation exponentielle $y = a e^{bx}$. ($\log_{10}(e^b)$).

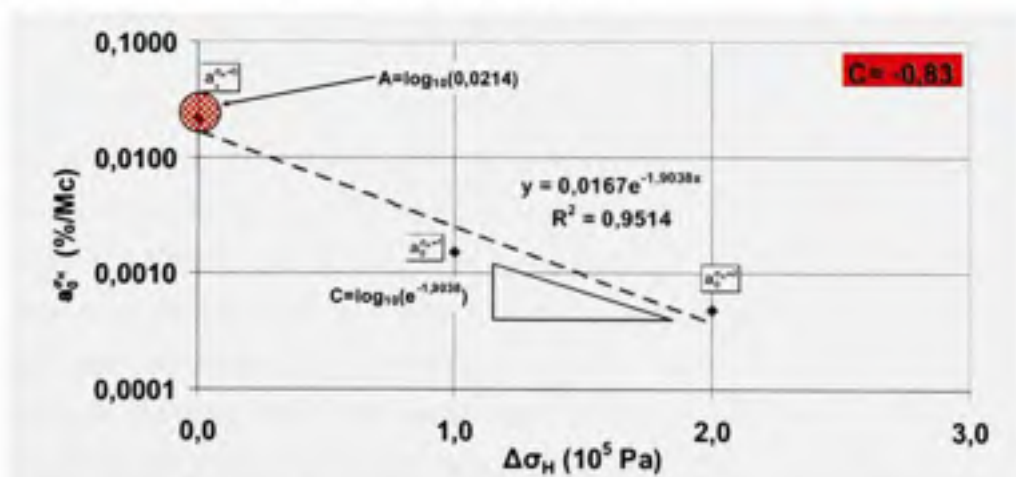


Figure 6.3 Courbe de $a_0^{\sigma_H}$ en fonction de σ_H pour l'enrobé ESG-10 ($T = 30^\circ\text{C}$; $f_r = 10\text{Hz}$).

La valeur de $a_0^{\sigma_n}$ évolue selon une tendance linéaire dans un domaine $\log a_0^{\sigma_n}$ et $\Delta\sigma_H$. La loi exponentielle correspondant de cette tendance est $y=0,017e^{-1,904x}$. La constante C de l'enrobé ESG-10 est alors égale au $\log_{10}(e^{-1,904})$, soit -0,83. La synthèse des constantes calculées est présentée au Tableau 6.2 incluant les constantes obtenues par Aussedat.

Tableau 6.2

Synthèse des constantes calculées (A, B et C) de l'enrobé ESG-10 avec les constantes correspondantes calculées par Aussedat

Constantes	ESG-10	Aussedat (1997)
A	-1,67	-2,04
B	2,93	4,33
C	-0,83	-0,72

La nouvelle constante calculée dans cette section (C) est cohérente avec la constante C calculée par Aussedat dans ses travaux. Cela montre que les propriétés de l'enrobé (type de bitume et granulats) influence la valeur des constantes.

La constante D

La constante D est associée à l'effet de la température sur la vitesse de déformation permanente $\dot{\epsilon}$. Trois constantes D seront calculées dans cette section. Dans un premier temps, la constante D est calculée selon la méthodologie présentée à la section 2.5.2. Le calcul de la constante D sera effectué pour les conditions de référence ($f_r = 10\text{Hz}$, $\sigma_v = 0,6\text{MPa}$, $\sigma_H = 0,0\text{MPa}$). Par ailleurs, le programme expérimental de ce mémoire a permis de vérifier si la température peut être considérée indépendante telle que proposé par Aussedat dans ses travaux sur la méthodologie ESSO. Afin de vérifier si la température a une influence similaire pour différentes fréquences, le cheminement de calcul de la constante D réalisé à 10 Hz est répété pour les fréquences de 1 et 5 Hz.

Fréquence fixée à 10 hertz

Pour la fréquence 10 hertz et sans pression de confinement latéral, la Figure 6.4 présente l'évolution de la pente $\dot{\epsilon}_{\text{mesurée}}$ en fonction de σ_v pour les températures de 30, 40 et 50°C.

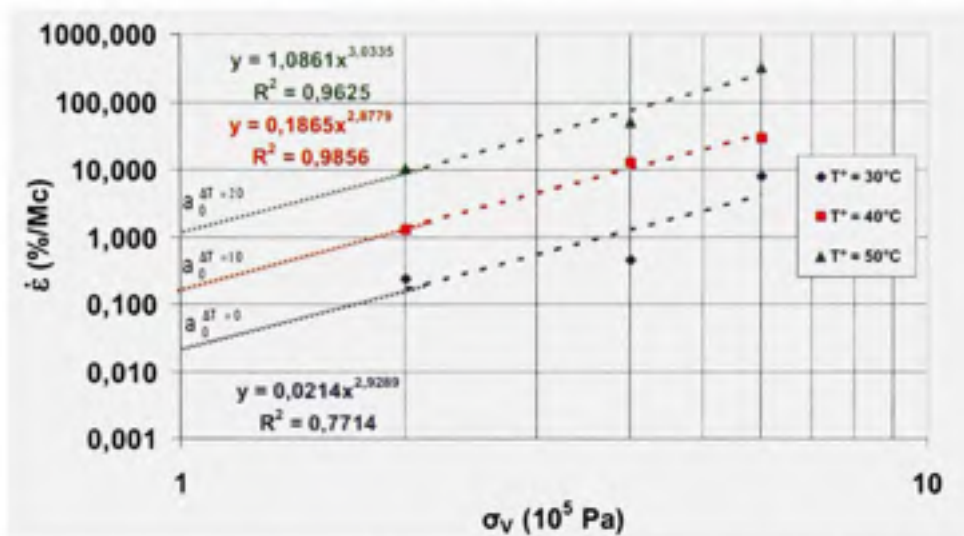


Figure 6.4 Pente de la déformation $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_v pour trois températures différentes ($\sigma_H = 0$; $f_r = 10\text{Hz}$; ESG-10).

La figure ci-dessus confirme la tendance linéaire de la pente b pour les trois températures. Le prolongement des lois de puissance jusqu'à la contrainte verticale $\sigma_v = 10^5\text{Pa}$ donne la valeur $a_0^{\Delta T}$ correspondant à chaque température testée. À partir des valeurs $a_0^{\Delta T}$ de chaque delta de température, la relation entre $a_0^{\Delta T}$ et ΔT est tracée à la Figure 6.5 . Rappelons que la température de référence est 30°C et par conséquent les différentielles de température (ΔT) correspondent à 0,10 et 20°C pour les températures 30, 40 et 50°C respectivement.

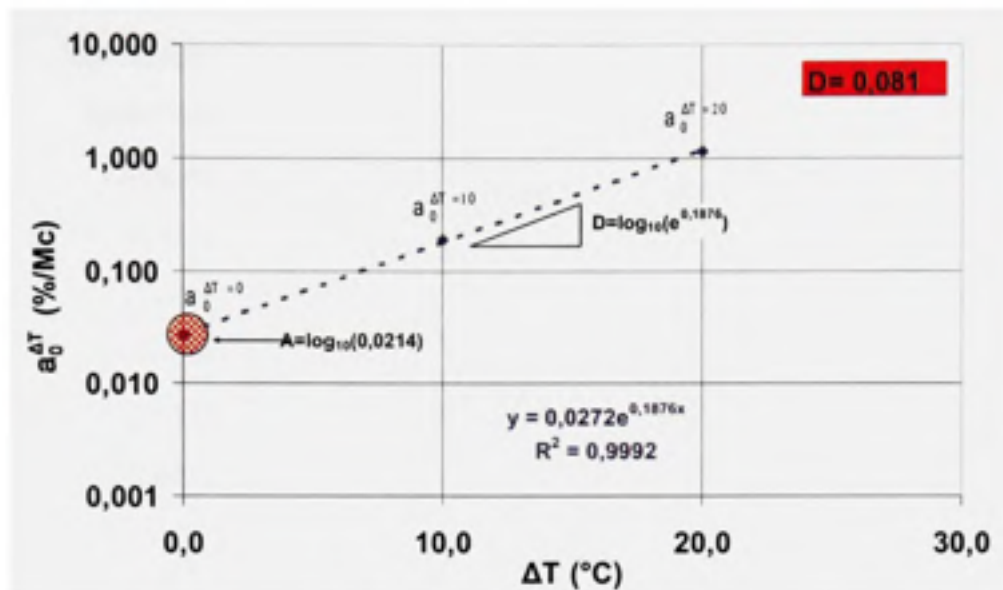


Figure 6.5 Courbe de $a_0^{\Delta T}$ en fonction de ΔT ($\sigma_H = 0$; $f = 10\text{Hz}$; ESG-10).

La relation $a_0^{\Delta T}$ et ΔT pour la fréquence 10 hertz peut être approchée suivant les moindres carrés par la loi exponentielle $y=0,027e^{0,188x}$. La constante $D_{10\text{Hz}}$ est alors calculée à partir de cette loi et correspond à $\log_{10}(e^{0,188})$ soit : $D_{10\text{Hz}}=0,081$.

Fréquence fixée à 5 hertz

Les résultats des essais réalisés à différentes températures mais, suivant une fréquence de sollicitation de 5Hz, sans pression de confinement permettent de calculer la constante $D_{5\text{Hz}}$. La Figure 6.6 présente l'évolution de la pente de la deuxième phase $\dot{\epsilon}_{\text{mesurée}}$ en fonction de σ_V pour les températures de 30, 40 et 50°C.

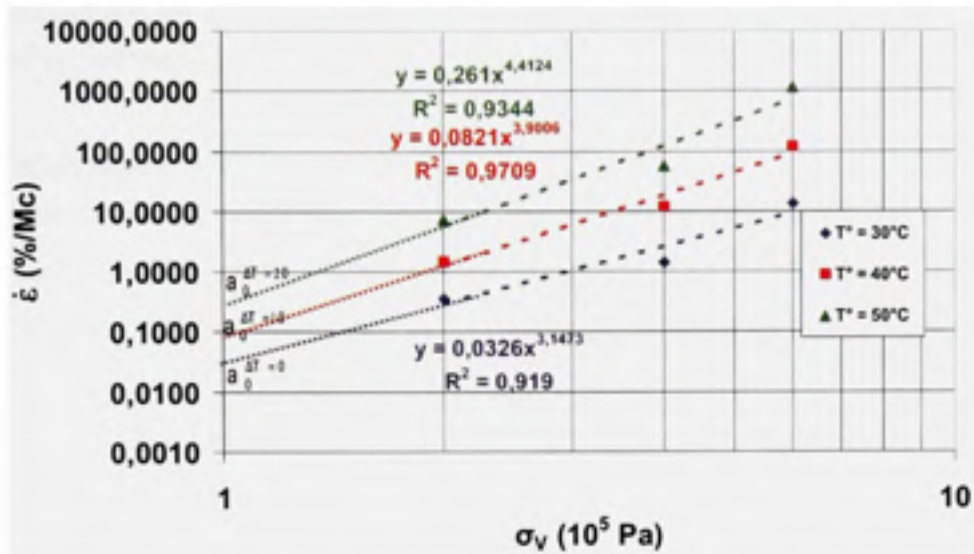


Figure 6.6 Pente de la déformation $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_V pour trois températures différentes ($\sigma_H = 0$; $f_r = 5\text{Hz}$; ESG-10).

Encore une fois, chaque température testée peut être approchée par une loi de puissance. De ces trois lois de puissance présentées à la figure 6.6, la relation $a_0^{\Delta T}$ en fonction de ΔT est présentée à la Figure 6.7.

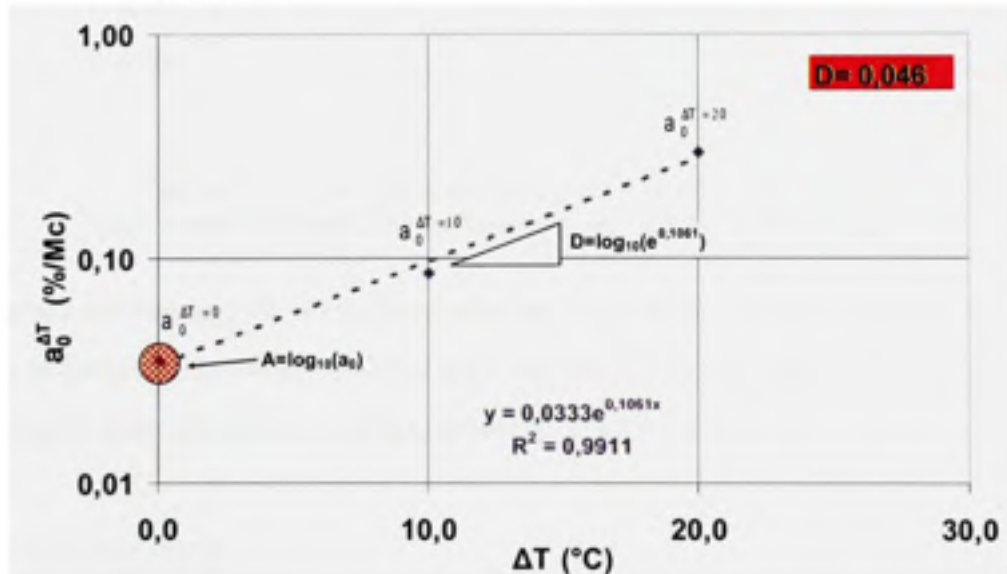


Figure 6.7 Courbe de $a_0^{\Delta T}$ en fonction de ΔT ($\sigma_H = 0$; $f_r = 5\text{Hz}$; ESG-10).

La constante $D_{5\text{Hz}}$ est obtenue à partir de la relation exponentielle $y=0,033e^{0,106x}$ et la constante $D_{5\text{Hz}}$ correspondante est $0,046 = \log_{10}(e^{0,106})$.

Fréquence fixée à 1 hertz

La troisième et dernière fréquence à laquelle l'influence de la température sera vérifiée est 1 hertz. La Figure 6.8 présente l'évolution de la pente $\dot{\epsilon}_{\text{mesurée}}$ en fonction de σ_V pour les essais réalisés aux températures 30, 40 et 50°C pour une fréquence de sollicitation de 1Hz.

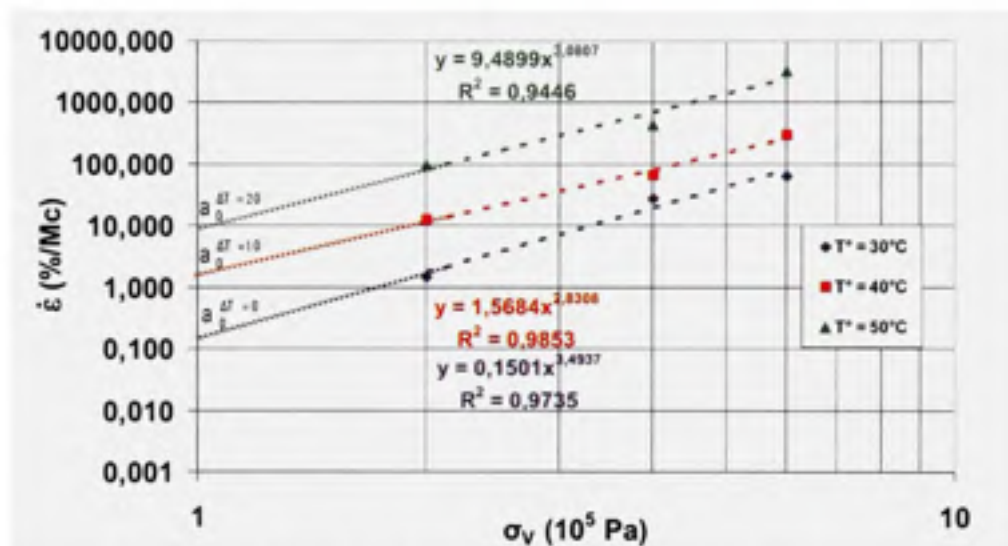


Figure 6.8 Pente de la déformation $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_V pour trois températures différentes ($\sigma_H = 0$; $f_r = 1\text{Hz}$; ESG-10).

Pour toutes les fréquences, les pentes b des lois de puissance sont relativement parallèles lorsque la température varie. Comme pour les autres fréquences, la relation $a_0^{\Delta T}$ versus ΔT est tracée pour calculer $D_{1\text{Hz}}$ tel que présenté à la Figure 6.9 .

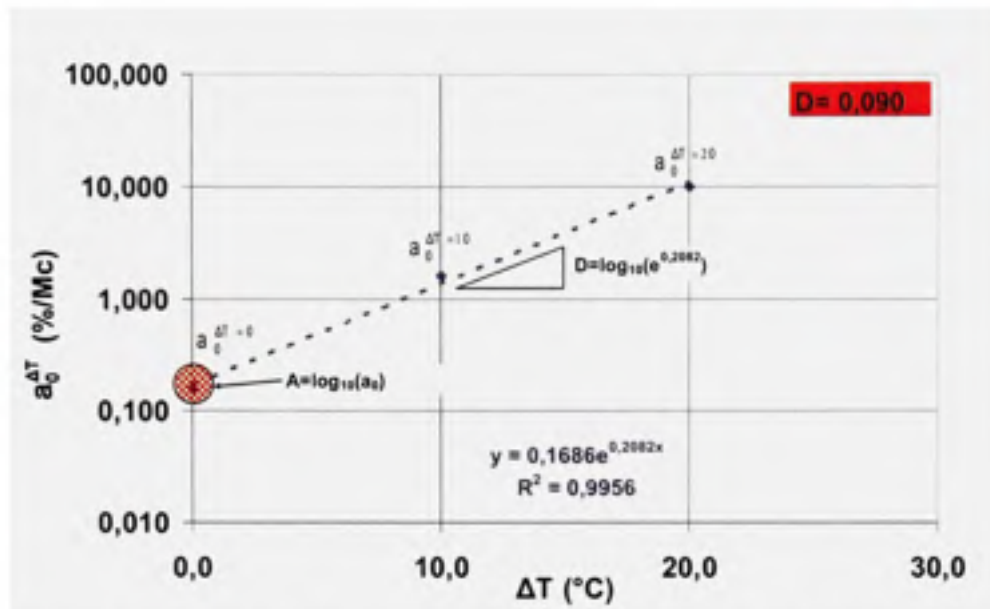


Figure 6.9 Courbe de $a_0^{\Delta T}$ en fonction de ΔT ($\sigma_H = 0$; $f_r = 1\text{Hz}$; ESG-10).

La constante $D_{1\text{Hz}}$ peut être calculée à partir de la loi exponentielle $y=0,169e^{0,208x}$, soit $D_{1\text{Hz}}$ est égale au $\log_{10}(e^{0,208}) = 0,090$. La synthèse des constantes D calculées pour différentes fréquences de sollicitation est reportée au Tableau 6.3.

Tableau 6.3

Synthèse des constantes D calculées selon la fréquence pour l'enrobé ESG-10

Fréquence	D
1 hertz	0,090
5 hertz	0,046
10 hertz	0,081

À partir des constantes D obtenues, on constate que D varie. Or, Aussedat suppose que la constante D est indépendante et ne varie pas avec une variation de la fréquence. Les résultats montrent clairement que D n'est pas constant. Cependant aucune tendance marquée n'est observable sur la variation de D avec la fréquence.

La variation de la constante D pour diverses fréquences différentes nous conduit à s'interroger sur la valeur D à considérer pour établir la loi de déformation permanente de l'enrobé ESG-10. Les possibilités seraient d'utiliser, soit la constante D des fréquences 1, 5 ou 10 hertz ou encore prendre la constante D obtenue par la moyenne arithmétique des trois constantes D obtenues. Afin de suivre la loi de déformation permanente de base tel qu'établie par Aussedat, la constante D utilisée sera celle correspondant à la fréquence 10 hertz. D'ailleurs, pour suivre la loi de déformation permanente, si l'on prend la constante D pour la fréquence 1 hertz, il faut que tous les autres paramètres soient basés sur la fréquence 1 hertz. Dans notre cas, les conditions d'essais sont à la fréquence 10 hertz. Le Tableau 6.4 présente la synthèse à jour des constantes de l'enrobé ESG-10 et des constantes établies par Aussedat.

Tableau 6.4

Synthèse des constantes (A, B, C et D) de l'enrobé ESG-10 et celles obtenues par Aussedat

Constantes	ESG-10	Aussedat (1977)
A	1,67	-2,04
B	2,93	4,33
C	-0,83	-0,72
D_{1Hz}	0,090	N/A
D_{5Hz}	0,046	N/A
D_{10Hz}	0,081	0,093

La constante F

La constante F est associée à l'effet de la fréquence sur la vitesse de déformation permanente $\dot{\epsilon}$ de la loi de déformation permanente. Trois constantes F seront calculées dans cette section suivent la procédure détaillée à la section 2.5.3. Dans un premier temps, le calcul de la constante F désigné $F_{30^{\circ}\text{C}}$, est réalisé aux conditions de référence :

$T=30^{\circ}\text{C}$, sans confinement. Comme pour le paramètre D , de manière à connaître l'évolution de F en fonction de la température, la constante F a été calculée pour les deux autres températures d'essai réalisées ($F_{40^{\circ}\text{C}}$ et $F_{50^{\circ}\text{C}}$).

Température fixée à 30°C

La Figure 6.10 montre la relation $\dot{\epsilon}_{\text{mesurée}}$ et σ_v pour $T=30^{\circ}\text{C}$ et $\sigma_H = 0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ pour les trois fréquences étudiées.

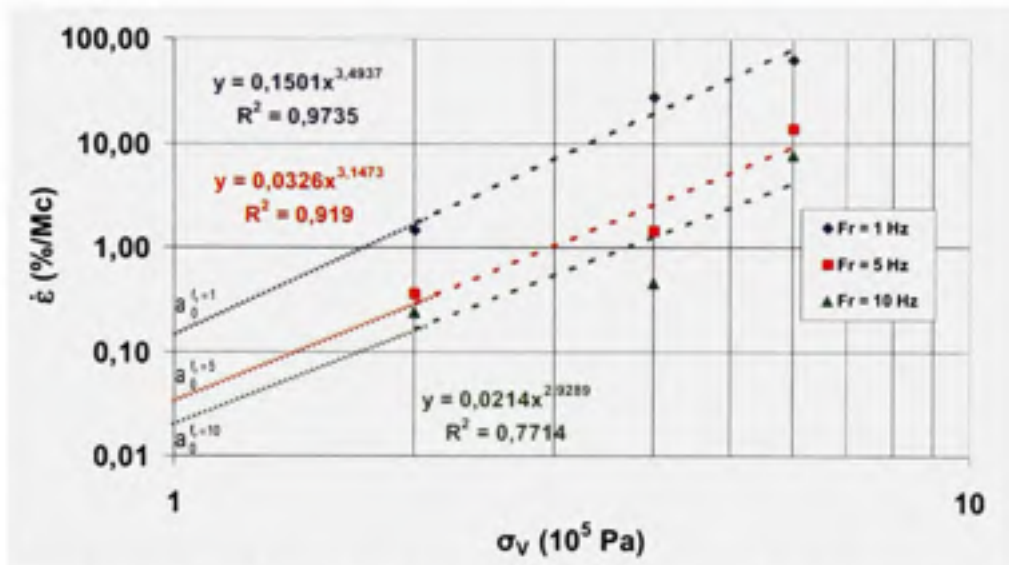


Figure 6.10 Pente de la déformation $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_v pour trois fréquences différentes ($\sigma_H = 0$, $T = 30^{\circ}\text{C}$; ESG-10).

Elle montre la tendance linéaire pour chacune des fréquences. Le prolongement des lois de puissance pour la contrainte verticale $\sigma_v = 10^5 \text{ Pa}$ donne la valeur de a_0^f correspondant à chaque fréquence. La variation en fonction de la fréquence est mesurée à l'aide de a_0^f . La Figure 6.11 montre la relation de a_0^f et f , dans le domaine log-log.

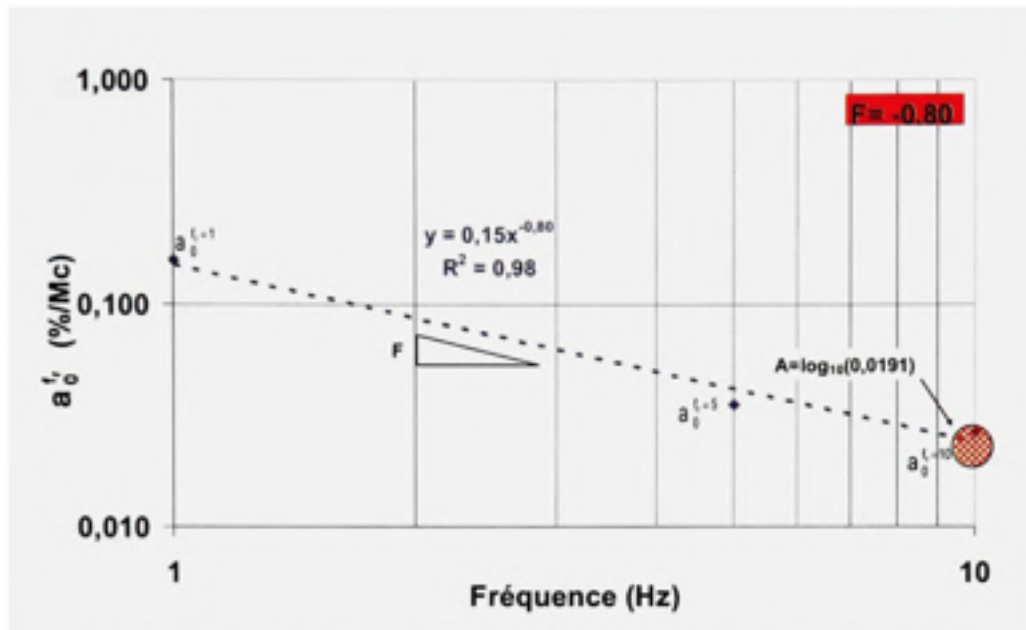


Figure 6.11 Courbe de a_0^f en fonction de f , ($\sigma_H = 0$, $T = 30^\circ\text{C}$).

Cette relation est approchée suivant les moindres carrés par la loi de puissance $0,15x^{-0,80}$. La constante $F_{30^\circ\text{C}}$ est alors tirée directement du paramètre b de la loi de puissance approchée et est égale à $-0,80$.

Température fixée à 40°C

Pour la température 40°C et toujours sans confinement, la Figure 6.12 illustre la relation $\dot{\epsilon}_{\text{mesurée}}$ et σ_v pour les trois fréquences testées. Elle montre que les droites se croisent ce qui laisse croire que la validité des pentes n'est pas certaines.

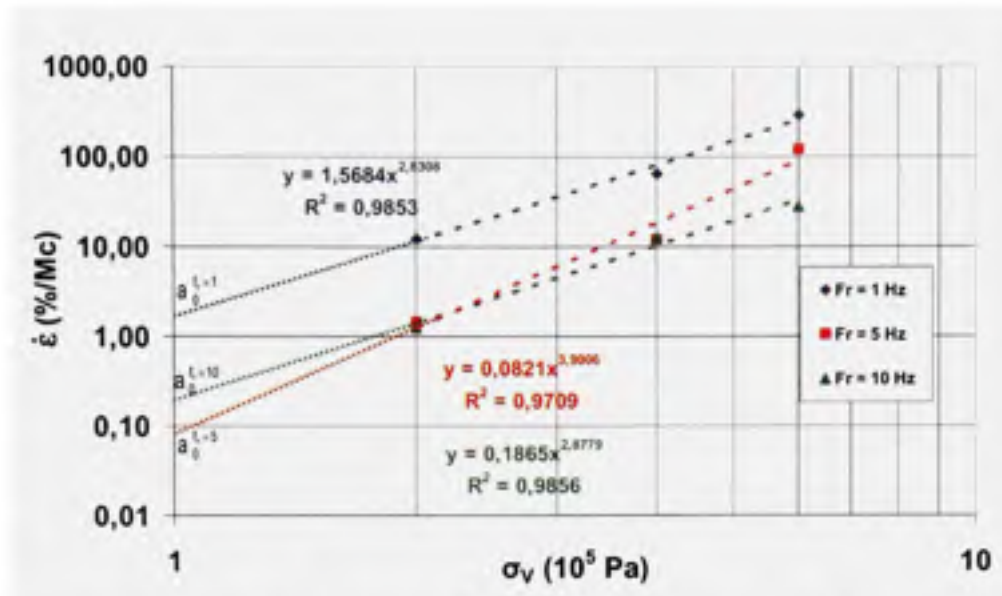


Figure 6.12 *Pente de la déformation $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_v pour trois fréquences différentes ($\sigma_H = 0$, $T = 40^\circ\text{C}$, ESG-10).*

Certaines valeurs de $\dot{\epsilon}_{\text{mesurée}}$ quatre semblent douteuses. En effet, les fréquences de 5 et 10 hertz, les valeurs de $\dot{\epsilon}_{\text{mesurée}}$ sont similaires pour les contraintes verticales de 0,2 MPa et 0,4 MPa. Après avoir analysé les courbes de résultats de déformation permanente (β_{tN} vs N) pour ces quatre essais, on constate que les pentes des deux essais à la contrainte verticale 0,4MPa sont des essais qui ont assez de cycles rendant difficile de cerner avec précision les valeurs correspondantes de $\dot{\epsilon}_{\text{mesurée}}$. Par ailleurs, pour les deux essais à $\sigma_v = 0,2$ MPa, l'analyse détaillée des résultats bruts de l'évolution de la déformation permanente (β_{tN} vs N) nous permet de constater qu'il manque des cycles pour atteindre la troisième phase et de s'assurer de la validité de la pente $\dot{\epsilon}_{\text{mesurée}}$. Quoi qu'il en soit, à partir des valeurs a_0^f obtenues et malgré l'incertitudes des valeurs de $\dot{\epsilon}_{\text{mesurée}}$, la relation a_0^f en fonction de la fréquence est tracée à la Figure 6.13.

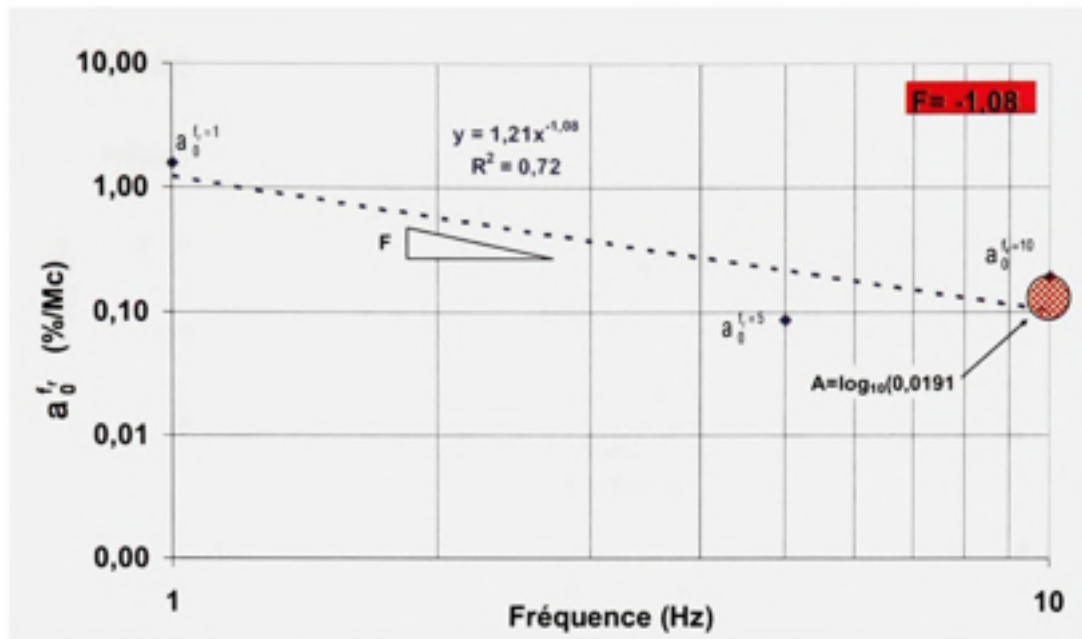


Figure 6.13 Courbe de a_0^f en fonction de f , ($\sigma_H = 0$, $T = 40^\circ\text{C}$, ESG-10).

À partir de l'approximation par la loi de puissance $y=1,21x^{-1,08}$, la constante $F_{40^\circ\text{C}}$ est alors estimée égale à -1,08.

Température fixée à 50°C

Pour la troisième et dernière température, la même relation est tracée entre $\dot{\epsilon}_{\text{mesurée}}$ et σ_V . Elle est présentée à la Figure 6.14.

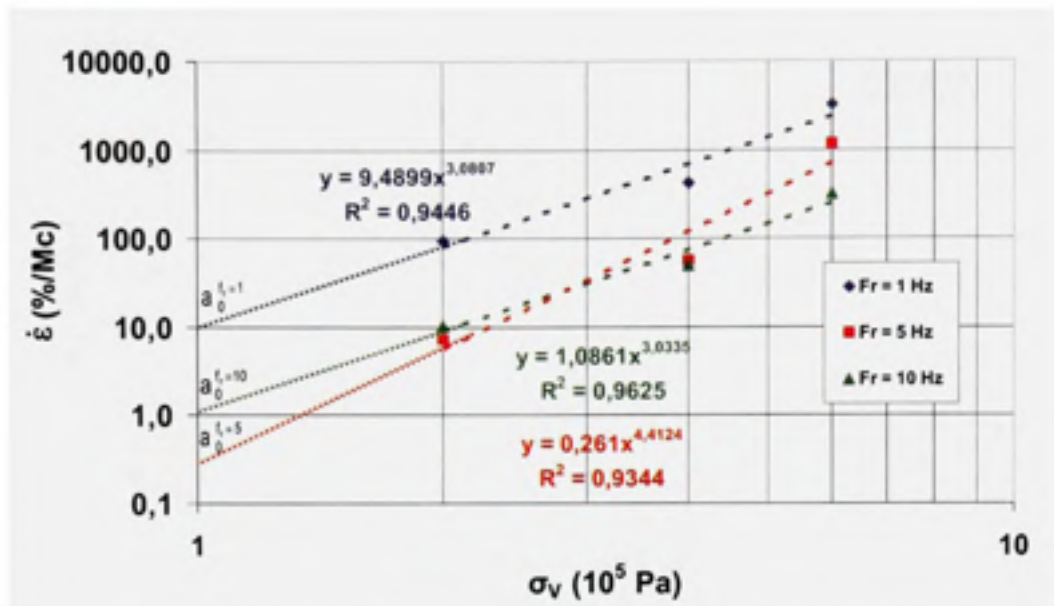


Figure 6.14 Pente de la déformation $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_v pour trois fréquences différentes ($\sigma_H = 0$, $T = 50^\circ\text{C}$, ESG-10).

Encore une fois, on observe que certaines droites se croisent. Quatre valeurs $\dot{\epsilon}_{\text{mesurée}}$ semblent douteuses. Après avoir analysé les courbes de résultats de ces essais, comme pour la température 30°C , pour deux essais à $\sigma_v = 0,2 \text{ MPa}$ aux fréquences 10 et 5 hertz, il manque de cycles pour atteindre la troisième phase et de s'assurer de la validité de la pente $\dot{\epsilon}_{\text{mesurée}}$. À partir des résultats de la Figure 6.14, a_0^f est tracé en fonction de f_r à la Figure 6.15.

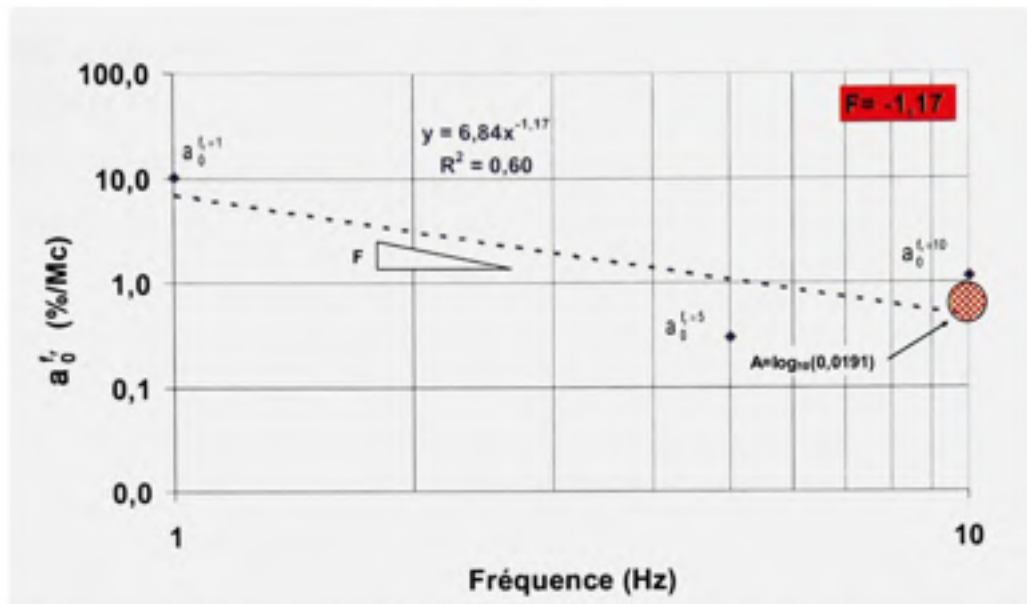


Figure 6.15 Courbe de a_0^f en fonction de f , ($\sigma_H = 0$, $T = 50^\circ\text{C}$, ESG-10).

La constante $F_{50^\circ\text{C}}$ est établie à partir de la relation puissance $y=6,84x^{-1,17}$ et laquelle correspond à -1,17. La synthèse de toutes les constantes F calculées est présentée au Tableau 6.5.

Tableau 6.5

Synthèse des constantes F calculées selon la température pour l'enrobé ESG-10

Température	F
30 °C	-0,80
40 °C	-1,08
50 °C	-1,17

On constate que la constante F varie avec la température. De plus, elle tend à diminuer avec une augmentation de la température. Cette tendance contredit l'hypothèse d'Aussedat sur l'indépendance de la constante F . Tout comme pour la constante D , on

s'interroge sur la valeur de F à utiliser. De manière à demeurer cohérent avec la loi de déformation permanente proposée par Aussedat, la constante $F_{30^{\circ}\text{C}}$ sera utilisée lors des simulations de calcul de $\dot{\epsilon}_{\text{calculé}}$. Le Tableau 6.6 présente la synthèse à jour des constantes de l'enrobé ESG-10 et des constantes établies par Aussedat.

Tableau 6.6

Synthèse des constantes calculées pour l'enrobé ESG-10

Constantes	ESG-10	Aussedat
A	-1,67	-2,04
B	2,93	4,33
C	-0,83	-0,72
D_{1Hz}	0,090	N/A
D_{5Hz}	0,046	N/A
D_{10Hz}	0,081	0,093
F_{30°C}	-0,80	-1,43
F_{40°C}	-1,08	N/A
F_{50°C}	-1,17	N/A

Les constantes calculées pour l'enrobé ESG-10 varient considérablement de celles obtenues par Aussedat. Les constantes A, C et F sont toutes de signes négatifs et les constantes B, et D sont de signes positifs.

6.2 Calcul des constantes A, B, C, D et F de la loi d'ESSO pour l'enrobé EB-14

Pour le calcul des constantes de la loi de déformation permanente de l'enrobé EB-14, le même processus que pour l'enrobé ESG-10 a été réalisé. Les résultats utilisés pour le calcul des constantes de la loi de déformation permanente de l'enrobé EB-14 sont présentés au Tableau 5.2 du chapitre précédent. Par ailleurs, la Figure 6.16 présente la

synthèse des courbes utilisées pour le calcul des constantes de l'enrobé EB-14 et le détail des calculs de toutes les constantes est présenté à l'annexe VII.

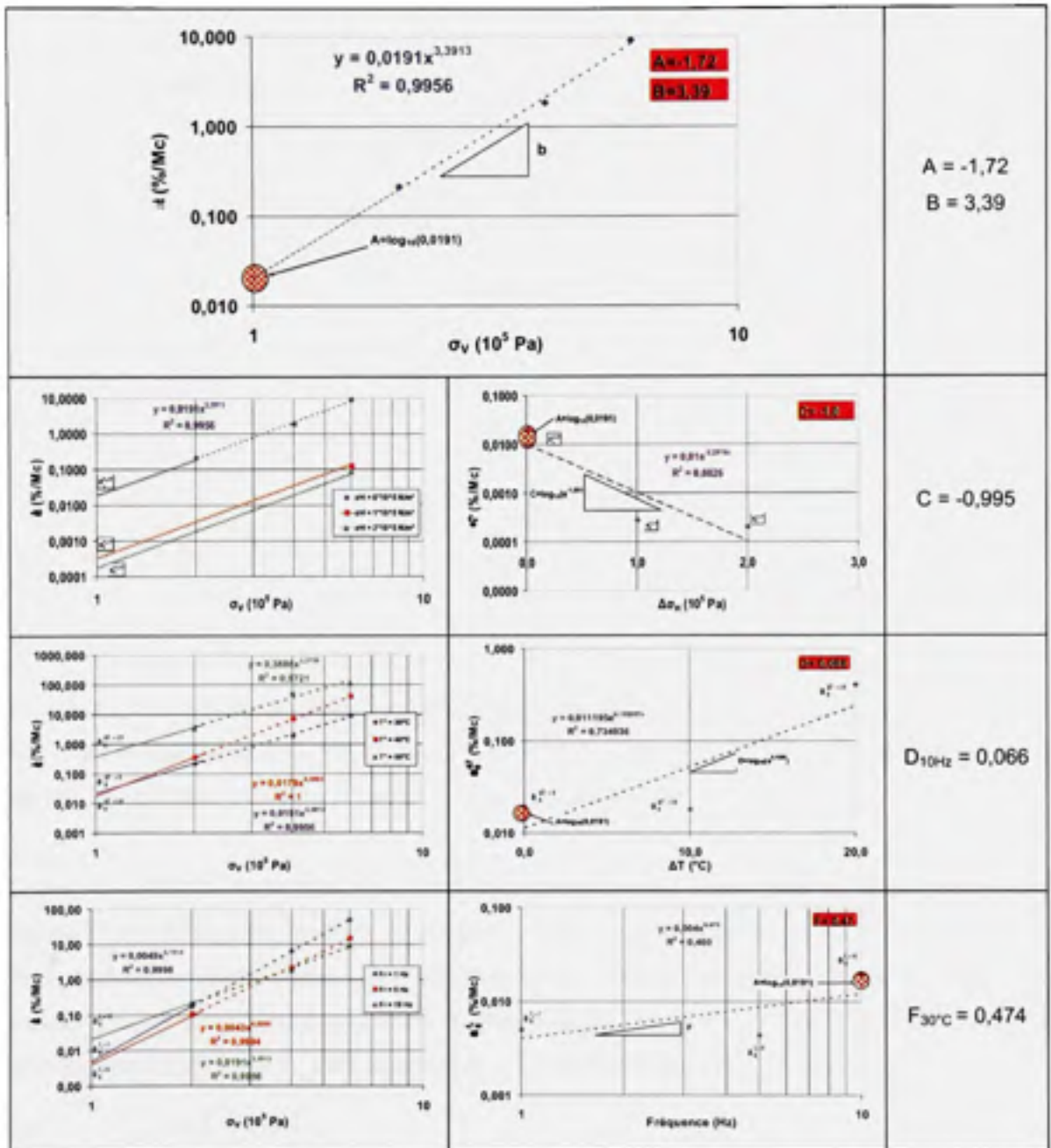


Figure 6.16 Cheminement du calcul des constantes principales de la loi de déformation permanente de l'enrobé EB-14.

Tableau 6.7

Synthèse des constantes calculées pour l'enrobé ESG-10 et EB-14

Constantes	ESG-10	EB-14	Aussedat
A	-1,67	-1,72	-2,04
B	2,93	3,39	4,33
C	-0,83	-1,00	-0,72
D_{1Hz}	0,090	0,118	N/A
D_{5Hz}	0,046	0,085	N/A
D_{10Hz}	0,081	0,066	0,093
F_{30°C}	-0,80	0,47	-1,43
F_{40°C}	-1,08	0,06	N/A
F_{50°C}	-1,17	-0,61	N/A

6.3 Indépendance des constantes B, D et F

Maintenant que la loi générale de déformation permanente, établie selon la méthodologie utilisée par Aussedat 1977 pour nos deux enrobés bitumineux testés est obtenue, est-ce qu'il y a possibilité d'améliorer cette loi facile d'utilisation?

Dans ses travaux, Aussedat propose l'indépendance des constantes A, B, C, D et F par rapport aux différentes conditions d'essai. Par manque d'essai, il n'a pas vérifié cette indépendance. Dans notre cas, l'étendue du programme expérimental nous permet de valider s'il y a une dépendance ou non. Nous avons choisi d'analyser l'indépendance que des constantes B, D et F. Les constantes C et A ont été laissées de côté.

Pour déterminer la constante C de chaque enrobé testé, seulement deux essais ont été réalisés. Cette quantité d'essais ne permet pas de vérifier l'influence de la température ou de la fréquence sur cette constante.

La constante A ne peut être vérifiée dans le processus de l'indépendance des constantes puisqu'elle est le point de départ de la loi de déformation permanente. A est fixée pour les conditions de référence ($\sigma_H = 0$ MPa, $T = 30^\circ\text{C}$ et $f_r = 10\text{Hz}$). À partir des résultats obtenus, il est évident que la constante A varie en fonction du confinement latéral, de la température et de la fréquence. C'est justement cette variation qui est calculée à l'aide des constantes C, D et F. Or, la constante A sera fixée à A obtenue aux conditions de référence et ce sera les constantes C, D et F qui donneront la variation du $\log \dot{\epsilon}$ pour toutes variations de confinements, de températures et de fréquences sur la loi de déformation permanente de base (équation 2.11)

6.3.1 Indépendance de la constante B

Dans cette section, l'indépendance de la constante B par rapport à la fréquence et la température sera vérifiée. Dans un premier temps, l'influence de la fréquence sera analysée pour les deux enrobés testés et sera suivie de la vérification de l'indépendance de la constante B avec la température.

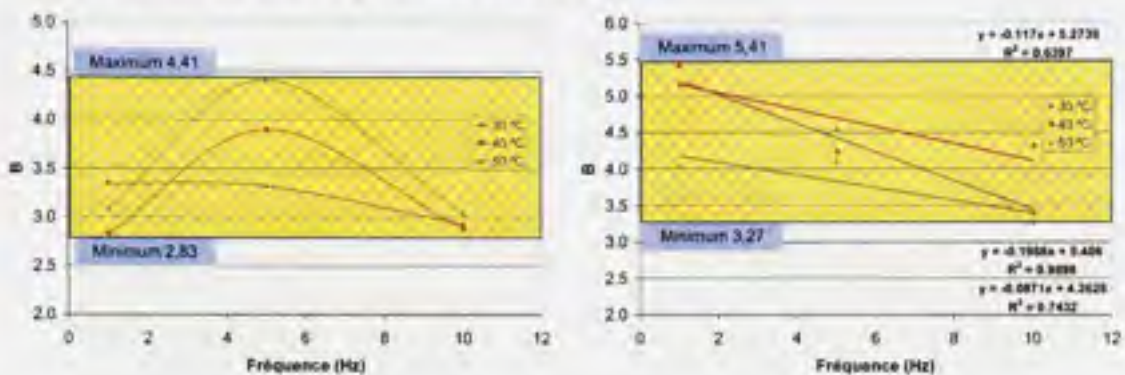
Tableau 6.8

Synthèse des constantes B utilisées pour l'indépendance des constantes

Enrobé ESG-10			
Température	$f_r=1\text{Hz}$	$f_r=5\text{Hz}$	$f_r=10\text{Hz}$
30 °C	3,3437	3,3173	2,9289
40 °C	2,8308	3,9006	2,8779
50 °C	3,0807	4,4124	3,0335
Enrobé EB-14			
Température	$f_r=1\text{Hz}$	$f_r=5\text{Hz}$	$f_r=10\text{Hz}$
30 °C	5,1514	4,5256	3,3913
40 °C	5,4104	4,2322	4,3063
50 °C	4,028	4,0934	3,2739

Indépendance de B en fonction de la fréquence

La Figure 6.17 illustre pour les enrobés ESG-10 et EB-14 la tendance de la variation de B en fonction de la fréquence pour trois températures.



a) ESG-10

b) EB-14

Figure 6.17 Tendance de B en fonction de la fréquence.

Pour l'enrobé ESG-10, B varie de façon linéaire à la température 40°C. Cependant, pour les températures 30 et 50°C, la constante B est quasi constante aux fréquences 1 et 10 hertz. À la fréquence 5 Hz, B est beaucoup plus élevée. Une courbe ayant une forme de cloche représente les courbes de B en fonction de la fréquence pour les températures 30 et 50°C. Ces variations de la constante B contredisent l'hypothèse de départ proposée par Aussedat dans la méthodologie ESSO que chaque constante est indépendante.

Comme pour l'enrobé ESG-10, les résultats pour l'enrobé EB-14 contredisent l'indépendance de la constante B avec une variation de la fréquence. Pour cet enrobé, la constante B tend à diminuer lorsque la fréquence augmente et ce, pour les trois températures étudiées. Bien que les résultats de la figure 6.17 montrent l'interdépendance, le nombre de données actuellement disponibles ne permet pas d'établir clairement la relation d'interdépendance. Par conséquent, lors des simulations de calculs, pour la constante B, qu'aucune influence de la fréquence ne sera pris en compte pour la fréquence, et ce, pour les deux enrobé bitumineux testés. Lors des simulations de calculs à partir de la loi de déformation permanente, la constante B utilisée sera celle calculée aux

conditions de référence ($T=30^{\circ}\text{C}$, $f_r=10\text{Hz}$ et $\sigma_H=0$). B sera 2,929 pour l'enrobé ESG-10 et 3,39 pour l'enrobé EB-14.

Indépendance de B en fonction de la température

La Figure 6.18 montre pour les enrobés ESG-10 et EB-14 la tendance de la variation de B en fonction de la température pour trois fréquences.

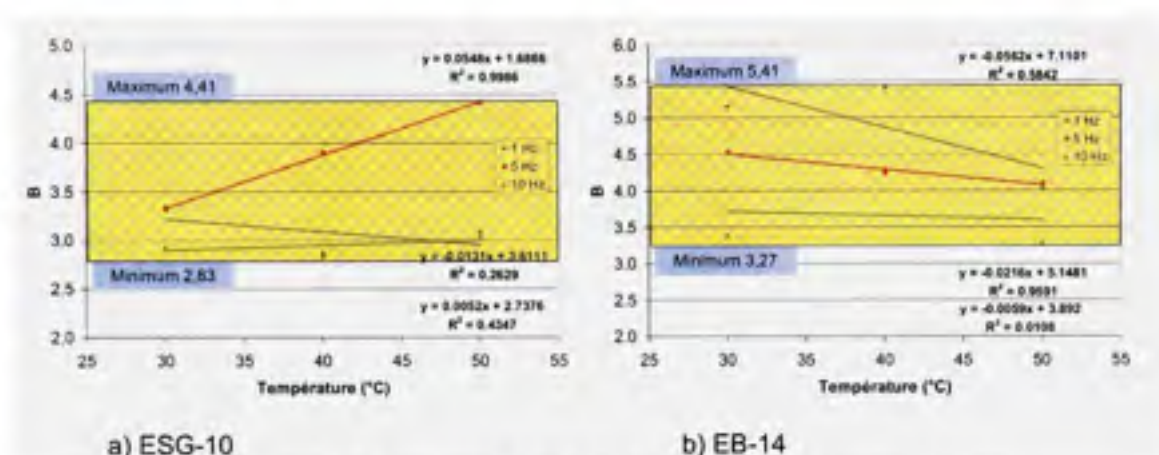


Figure 6.18 Tendence de B en fonction de la température.

La constante B des deux enrobés testés est loin d'être indépendante de la température ou de la fréquence. L'hypothèse de B indépendant est contredite. La constante B de l'enrobé ESG-10 n'a pas une évolution constante en fonction de la température pour les trois fréquences analysées. Du côté de l'enrobé EB-14, B tend à diminuer lorsque la température augmente pour la fréquence 1 hertz. Les fréquences 5 et 10 hertz ont plus l'apparence d'une forme de cloche. Bien que l'interdépendance soit évidente, le nombre de données disponible ne permet pas d'établir clairement la relation d'interdépendance selon la température. Pour les deux enrobés bitumineux testés, aucune tendance ne sera prise en compte lors des simulations du calcul des pentes ϵ . La plage acceptable de la constante B pour l'enrobé ESG-10 se situe entre 2,83 et 4,41 et celle de l'enrobé EB-14 est 3,27 à 5,41.

6.3.2 Indépendance de la constante D

Dans cette section, l'indépendance de la constante D versus la fréquence sera étudiée. La Figure 6.19 montre la relation entre D et la fréquence pour les enrobés ESG-10 et EB-14.

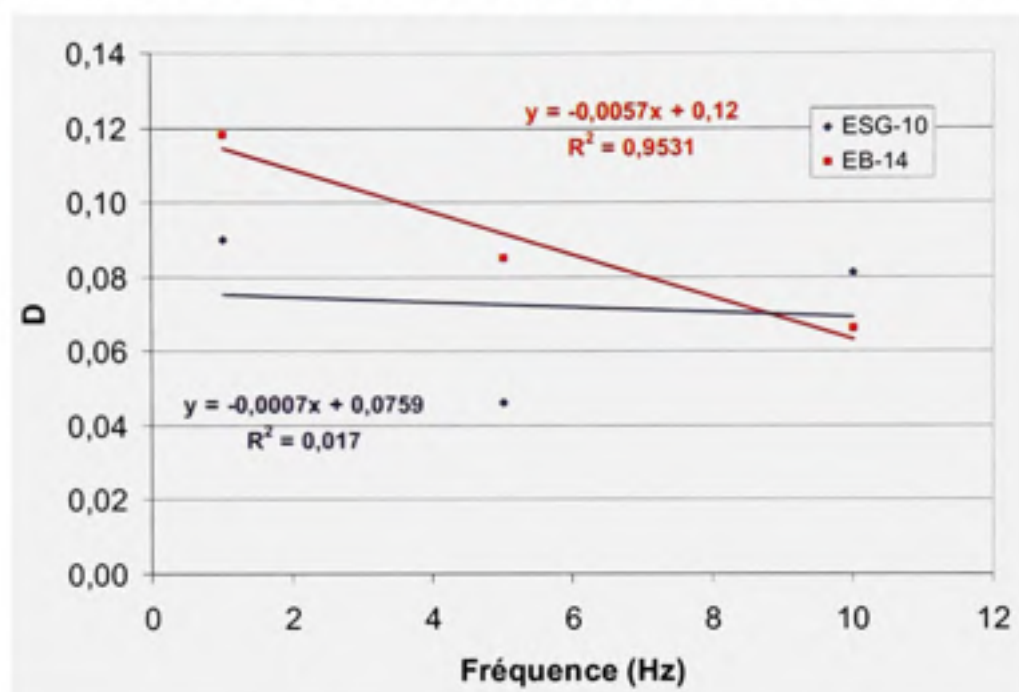


Figure 6.19 *Tendance de D en fonction de la fréquence.*

Pour l'enrobé ESG-10, une influence quasi absente de la fréquence entre D et f, est observable. Du côté de l'enrobé EB-14, il est possible de définir une relation à tendance linéaire entre la variation de D et la fréquence. Par conséquent, lors des simulations de calcul de la pente, il y aura un ajustement de la constante D pour les deux enrobés. Les facteurs de corrections proposées sont donnés au Tableau 6.9.

Tableau 6.9

Fonctions de correction des constantes D utilisées pour les enrobés ESG-10 et EB-14

Enrobé	Fonctions de correction
ESG-10	$D = -0,0007 f_r + 0,08$
EB-14	$D = -0,0057 f_r + 0,12$

6.3.3 Indépendance de la constante F

La dernière vérification de l'indépendance des constantes se dessine autour de la constante F. La Figure 6.20 présente la variation de F en fonction de la température pour l'enrobé ESG-10 et EB-14.

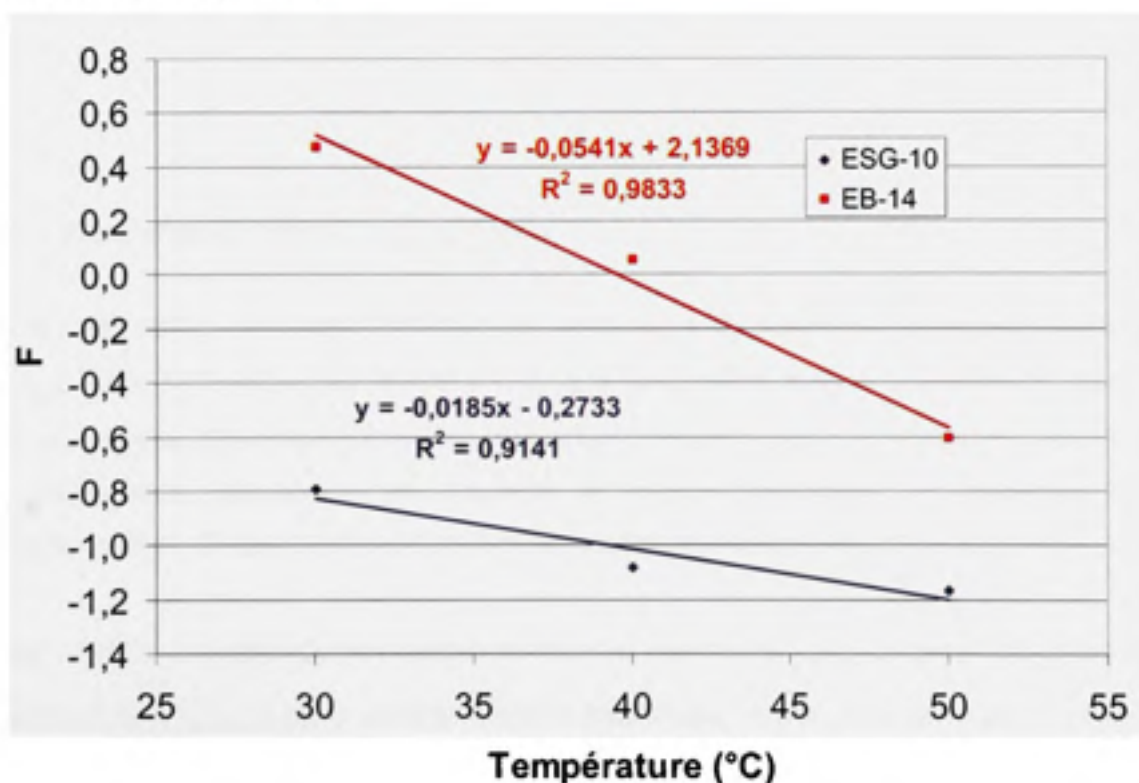


Figure 6.20 Tendence de F en fonction de la température.

La figure ci-dessus permet de constater que F est dépendant de la température. Pour les deux enrobés, la constante F diminue linéairement avec l'augmentation de la température avec un coefficient de régression $R^2 > 0,9$. Par conséquent, il est possible de considérer cette interrelation dans le calcul de $(\dot{\epsilon}_{calculée})$ par la loi de déformation permanente modifiée. Nous traiterons cet aspect en détail à la section 6.4. Les fonctions de correction de la constante F pour les deux enrobés sont présentées au tableau 6.10.

Tableau 6.10

Fonctions de correction de la constante F pour les deux enrobés testés

Enrobé	Fonctions de correction
ESG-10	$F = -0,0185 T - 0,27$
EB-14	$F = -0,0541 T + 2,14$

6.4 Simulation de calcul $\dot{\epsilon}_{mesurée}$ versus $\dot{\epsilon}_{calculée}$

Dans cette section, on vise à optimiser les constantes de manière à minimiser l'erreur de $\dot{\epsilon}_{calculée}$ pour l'ensemble des résultats. La quantité d'essai réalisée a permis de calculer des constantes différentes lorsque les conditions d'essais varient. Cela montre que la loi de déformation permanente est imprécise et que le phénomène est beaucoup plus complexe. Par ailleurs, la loi est simple d'application et permet une estimation réaliste.

Cette section apporte une comparaison entre la valeur de $\dot{\epsilon}_{mesurée}$ à partir des résultats d'essai et de $\dot{\epsilon}_{calculée}$ à partir de la loi d'ESSO établie pour chacun des enrobés bitumineux. Pour chacun des mélanges à l'étude, 5 analyses sont effectuées. $\dot{\epsilon}_{mesurée}$ est comparée à $\dot{\epsilon}_{calculée}$ avec $\dot{\epsilon}_{calculée}$ de la loi de déformation permanente. Ensuite, le même processus

est réalisé avec la loi modifiée sur la constante D, sur la constante F, la constante D et F en simultanée et avec une optimisation des constantes B, C, D et F à partir d'un indice de qualité pour juger de l'effet des corrections proposées. L'indice de qualité met simplement en relief l'écart entre les valeurs mesurées de celles calculées pour les différentes lois de déformation permanente, et ce, pour chaque conditions de simulation étudiées.

6.4.1 Indice de qualité :IQ

L'indice de qualité est calculé pour chaque essai réalisé à l'essai de déformation permanente. Il correspond à :

$$\text{Indice de qualité} = \frac{|\dot{\epsilon}_{\text{mesuré}} - \dot{\epsilon}_{\text{calculé}}|}{\dot{\epsilon}_{\text{mesuré}}}$$

Notons qu'une valeur voisine de zéro indique que le modèle donne une bonne précision de $\dot{\epsilon}$.

6.4.2 $\dot{\epsilon}_{\text{mesurée}}$ versus les différents $\dot{\epsilon}_{\text{calculée}}$

Dans cette section seront comparées, la pente mesurée $\dot{\epsilon}_{\text{mesurée}}$ à celle calculée $\dot{\epsilon}_{\text{calculée}}$ à partir des lois de déformation de chaque enrobé testé. Cela permettra d'évaluer l'écart entre la valeur de la pente de la deuxième phase pour un essai de déformation permanente et la valeur de la pente calculée. Les tableaux 6.11 et 6.12 montre les pentes calculées et mesurées des enrobés ESG-10 et EB-14 respectivement.

Tableau 6.11

Pente $\dot{\epsilon}$ mesurée et calculée à partir des lois de déformation permanente correspondantes de l'enrobé ESG-10

Condition d'essai					$\dot{\epsilon}$ calculée				
T (°C)	t_r (Hz)	σ_v (10^5 Pa)	σ_H (10^5 Pa)	$\dot{\epsilon}$ mesurée	Loi de base ^(A)	Influence D ^(B)	Influence F ^(C)	Influence D et F ^(D)	Optimi- sation
30	1	2	0	2,234	1,093	1,020	1,096	1,096	2,045
40	1	2	0	10,274	7,132	5,764	10,953	9,489	11,654
50	1	2	0	95,600	46,531	32,576	109,407	82,110	66,398
30	1	4	0	30,393	8,325	7,766	8,350	8,350	13,291
40	1	4	0	62,739	54,315	43,893	83,410	72,260	75,727
50	1	4	0	431,455	354,359	248,082	833,188	625,310	431,45
30	1	6	0	61,960	27,300	25,466	27,381	27,381	39,720
40	1	6	0	285,850	178,106	143,932	273,514	236,950	226,30
50	1	6	0	3097,260	1161,992	813,497	2732,141	2050,482	1289,3
30	5	2	0	0,360	0,289	0,283	0,289	0,289	0,312
40	5	2	0	1,432	1,884	1,499	2,144	1,742	1,779
50	5	2	0	7,352	12,294	7,943	15,903	10,491	10,133
30	5	4	0	1,369	2,200	2,154	2,202	2,202	2,028
40	5	4	0	11,326	14,351	11,414	16,329	13,263	11,557
50	5	4	0	56,046	93,626	60,486	121,106	79,895	65,847
30	5	6	0	13,608	7,213	7,063	7,219	7,219	6,062
40	5	6	0	118,226	47,058	37,430	53,544	43,490	34,538
50	5	6	0	1145,141	307,012	198,343	397,125	261,987	196,78
30	10	2	0	0,234	0,163	0,163	0,163	0,163	0,139
40	10	2	0	1,075	1,062	0,796	1,062	0,796	0,792
50	10	2	0	9,822	6,930	3,891	6,930	3,891	4,510
30	10	4	0	0,378	1,240	1,240	1,240	1,240	0,903
40	10	4	0	12,585	8,089	6,062	8,089	6,062	5,143
50	10	4	0	48,291	52,777	29,634	52,777	29,634	29,305
50	10	4	0	49,193	52,777	29,634	52,777	29,634	29,305
30	10	6	0	13,555	4,066	4,066	4,066	4,066	2,698
40	10	6	0	28,405	26,526	19,877	26,526	19,877	15,371
50	10	6	0	308,376	173,063	97,175	173,063	97,175	87,575
30	10	6	1	0,288	0,606	0,796	0,796	0,796	0,402
30	10	6	2	0,090	0,090	0,156	0,156	0,156	0,060

A) Application de la loi décrite à l'équation 2.2 à partir des constantes mesurées au tableau 6.7

B) Équation 2.7 en intégrant les fonctions de correction établies pour le paramètre D telles que présentées au tableau 6.9

C) Équation 2.7 en intégrant les fonctions de correction établies pour le paramètre F telles que présentées au tableau 6.10

D) Équation 2.7 en intégrant les fonctions de correction établies pour le paramètre D telles que présentées pour B et D.

Tableau 6.12

Pente $\dot{\epsilon}$ mesurée et calculée à partir des lois de déformation permanente correspondantes de l'enrobé EB-14

Condition d'essai					$\dot{\epsilon}$ calculée				
T (°C)	f _v (Hz)	σ_v (10 ⁵ Pa)	σ_H (10 ⁵ Pa)	$\dot{\epsilon}$ mesurée	Loi de base ^(A)	Influence D ^(B)	Influence F ^(C)	Influence D et F ^(D)	Optimisation
30	1	2	0	0,171	0,067	0,067	0,061	0,061	0,171
40	1	2	0	0,636	0,306	0,930	0,970	2,948	0,782
50	1	2	0	19,316	1,398	12,927	15,403	142,427	3,573
30	1	4	0	6,474	0,701	0,701	0,640	0,640	1,694
40	1	4	0	45,930	3,206	9,750	10,164	30,909	7,742
50	1	4	0	401,642	14,655	135,514	161,467	1493,081	35,386
30	1	6	0	48,496	2,773	2,773	2,529	2,529	6,477
40	1	6	0	219,064	12,675	38,542	40,182	122,189	29,604
50	1	6	0	1540,253	57,934	535,714	638,312	5902,456	135,31
30	5	2	0	0,102	0,143	0,143	0,140	0,140	0,183
40	5	2	0	0,366	0,656	1,180	0,928	1,670	0,836
50	5	2	0	3,870	2,998	9,701	6,173	19,976	3,822
30	5	4	0	2,127	1,504	1,504	1,463	1,463	1,812
40	5	4	0	18,597	6,875	12,368	9,731	17,504	8,281
50	5	4	0	56,185	31,426	101,694	64,714	209,411	37,850
30	5	6	0	15,001	5,946	5,946	5,784	5,784	6,928
40	5	6	0	31,666	27,180	48,893	38,467	69,198	31,666
50	5	6	0	358,246	124,235	402,017	255,828	827,843	144,74
30	10	2	0	0,211	0,199	0,199	0,199	0,199	0,188
40	10	2	0	0,352	0,911	0,850	0,911	0,850	0,861
50	10	2	0	3,301	4,164	3,627	4,164	3,627	3,934
30	10	4	0	1,821	2,089	2,089	2,089	2,089	1,865
40	10	4	0	7,100	9,550	8,912	9,550	8,912	8,524
50	10	4	0	51,919	43,650	38,017	43,650	38,017	38,964
50	10	4	0	51,677	43,650	38,017	43,650	38,017	38,964
30	10	6	0	9,012	8,259	8,259	8,259	8,259	7,132
40	10	6	0	38,810	37,751	35,232	37,751	35,232	32,598
50	10	6	0	109,839	172,557	150,291	172,557	150,291	149,00
30	10	6	1	0,118	0,835	0,835	0,835	0,835	0,118
30	10	6	2	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085	0,002

A) Application de la loi décrite à l'équation 2.2 à partir des constantes mesurées au tableau 6.7

B) Équation 2.7 en intégrant les fonctions de correction établies pour le paramètre D telles que présentées au tableau 6.9.

C) Équation 2.7 en intégrant les fonctions de correction établies pour le paramètre F telles que présentées au tableau 6.10.

D) Équation 2.7 en intégrant les fonctions de correction établies pour le paramètre D telles que présentées pour B et D.

6.4.3 Comparaison des indices de qualité

Les constantes de chaque loi sont reportées au tableau 6.13. Les indices de qualité des différentes simulations de l'enrobé ESG-10 sont regroupés au tableau 6.14 et à la Figure 6.21. En ce qui a trait à l'enrobé EB-14, les indices de qualité des différentes simulations sont regroupés au tableau 6.15 et à la Figure 6.22. Un outil visuel permet de mieux voir les essais ayant un bon indice de qualité. Il s'agit d'une plage comprise entre 0,2 et 0,8. Les essais sous la limite inférieure 0,2 signifient un petit écart entre la valeur mesurée en laboratoire de celle calculée par la loi de déformation permanente. Un indice de qualité supérieur à 0,8 signifie un grand écart entre les valeurs mesurées et calculées.

Tableau 6.13

Constantes de chaque loi utilisée dans le calcul des indices de qualité

ESG-10					
	Loi de base	Influence D	Influence F	Influence D et F	Loi optimisée
Constante					
A	-1,670	-1,670	-1,670	-1,670	-1,670
B	2,929	2,929	2,929	2,929	2,929
C	-0,708	-0,708	-0,708	-0,708	-0,708
D	0,081	-0,0007*f, + 0,07592	0,081	-0,0007*f, + 0,07592	0,066
F	-0,797	-0,797	-0,0185*T -0,2733	-0,0185*T - 0,2733	0,040
EB-14					
	Loi de base	Influence D	Influence F	Influence D et F	Loi optimisée
Constante					
A	-1,721	-1,721	-1,721	-1,721	-1,721
B	3,390	3,390	3,390	3,390	3,307
C	-0,995	-0,995	-0,995	-0,995	-1,781
D	0,066	0,0057*fr + 0,12	0,066	-0,0057*fr + 0,12	0,066
F	0,474	0,474	-0,0541*T + 2,1369	-0,0541*T + 2,1369	0,040

Tableau 6.14

Pente $\dot{\epsilon}$ mesurée et calculée à partir des lois de déformation permanente correspondantes de l'enrobé ESG-10

Condition d'essai					Indice de qualité				
#	T (°C)	f _i (Hz)	σ_v (10 ⁵ Pa)	σ_H (10 ⁵ Pa)	Loi de base	Influence D	Influence F	Influence D et F	Optimisation
1	30	1	2	0	0,511	0,544	0,509	0,509	0,084
2	40	1	2	0	0,306	0,439	0,066	0,076	0,134
3	50	1	2	0	0,513	0,659	0,144	0,141	0,305
4	30	1	4	0	0,726	0,744	0,725	0,725	0,563
5	40	1	4	0	0,134	0,300	0,329	0,152	0,207
6	50	1	4	0	0,179	0,425	0,931	0,449	0,000
7	30	1	6	0	0,559	0,589	0,558	0,558	0,359
8	40	1	6	0	0,377	0,496	0,043	0,171	0,208
9	50	1	6	0	0,625	0,737	0,118	0,338	0,584
10	30	5	2	0	0,198	0,214	0,197	0,197	0,133
11	40	5	2	0	0,316	0,047	0,497	0,216	0,242
12	50	5	2	0	0,672	0,080	1,163	0,427	0,378
13	30	5	4	0	0,607	0,573	0,608	0,608	0,482
14	40	5	4	0	0,267	0,008	0,442	0,171	0,020
15	50	5	4	0	0,671	0,079	1,161	0,426	0,175
16	30	5	6	0	0,470	0,481	0,469	0,469	0,555
17	40	5	6	0	0,602	0,683	0,547	0,632	0,708
18	50	5	6	0	0,732	0,827	0,653	0,771	0,828
19	30	10	2	0	0,304	0,304	0,304	0,304	0,406
20	40	10	2	0	0,012	0,260	0,012	0,260	0,264
21	50	10	2	0	0,294	0,604	0,294	0,604	0,541
22	30	10	4	0	2,280	2,280	2,280	2,280	1,388
23	40	10	4	0	0,357	0,518	0,357	0,518	0,591
24	50	10	4	0	0,093	0,386	0,093	0,386	0,393
25	50	10	4	0	0,073	0,398	0,073	0,398	0,404
26	30	10	6	0	0,700	0,700	0,700	0,700	0,801
27	40	10	6	0	0,066	0,300	0,066	0,300	0,459
28	50	10	6	0	0,439	0,685	0,439	0,685	0,716
29	30	10	6	1	1,103	1,765	1,765	1,765	0,395
30	30	10	6	2	0,002	0,733	0,733	0,733	0,335
Somme					14,187	16,860	16,278	15,970	12,659

Tableau 6.15

Pente $\dot{\epsilon}$ mesurée et calculée à partir des lois de déformation permanente correspondantes de l'enrobé EB-14

Condition d'essai					Indice de qualité				
#	T (°C)	f_r (Hz)	σ_v (10^5 Pa)	σ_H (10^5 Pa)	Loi de base	Influence D	Influence F	Influence D et F	Optimisation
1	30	1	2	0	0,609	0,609	0,643	0,643	0,000
2	40	1	2	0	0,519	0,462	0,525	3,636	0,229
3	50	1	2	0	0,928	0,331	0,203	6,374	0,815
4	30	1	4	0	0,892	0,892	0,901	0,901	0,738
5	40	1	4	0	0,930	0,788	0,779	0,327	0,831
6	50	1	4	0	0,964	0,663	0,598	2,717	0,912
7	30	1	6	0	0,943	0,943	0,948	0,948	0,866
8	40	1	6	0	0,942	0,824	0,817	0,442	0,865
9	50	1	6	0	0,962	0,652	0,586	2,832	0,912
10	30	5	2	0	0,407	0,407	0,368	0,368	0,793
11	40	5	2	0	0,792	2,223	1,536	3,562	1,284
12	50	5	2	0	0,225	1,507	0,595	4,162	0,013
13	30	5	4	0	0,293	0,293	0,312	0,312	0,148
14	40	5	4	0	0,630	0,335	0,477	0,059	0,555
15	50	5	4	0	0,441	0,810	0,152	2,727	0,326
16	30	5	6	0	0,604	0,604	0,614	0,614	0,538
17	40	5	6	0	0,142	0,544	0,215	1,185	0,000
18	50	5	6	0	0,653	0,122	0,286	1,311	0,596
19	30	10	2	0	0,055	0,055	0,055	0,055	0,108
20	40	10	2	0	1,588	1,415	1,588	1,415	1,445
21	50	10	2	0	0,261	0,099	0,261	0,099	0,192
22	30	10	4	0	0,147	0,147	0,147	0,147	0,024
23	40	10	4	0	0,345	0,255	0,345	0,255	0,201
24	50	10	4	0	0,159	0,268	0,159	0,268	0,250
25	50	10	4	0	0,155	0,264	0,155	0,264	0,246
26	30	10	6	0	0,084	0,084	0,084	0,084	0,209
27	40	10	6	0	0,027	0,092	0,027	0,092	0,160
28	50	10	6	0	0,571	0,368	0,571	0,368	0,357
29	30	10	6	1	6,080	6,080	6,080	6,080	0,000
30	30	10	6	2	0,006	0,006	0,006	0,006	0,977
Somme					21,354	22,141	20,033	42,255	14,590

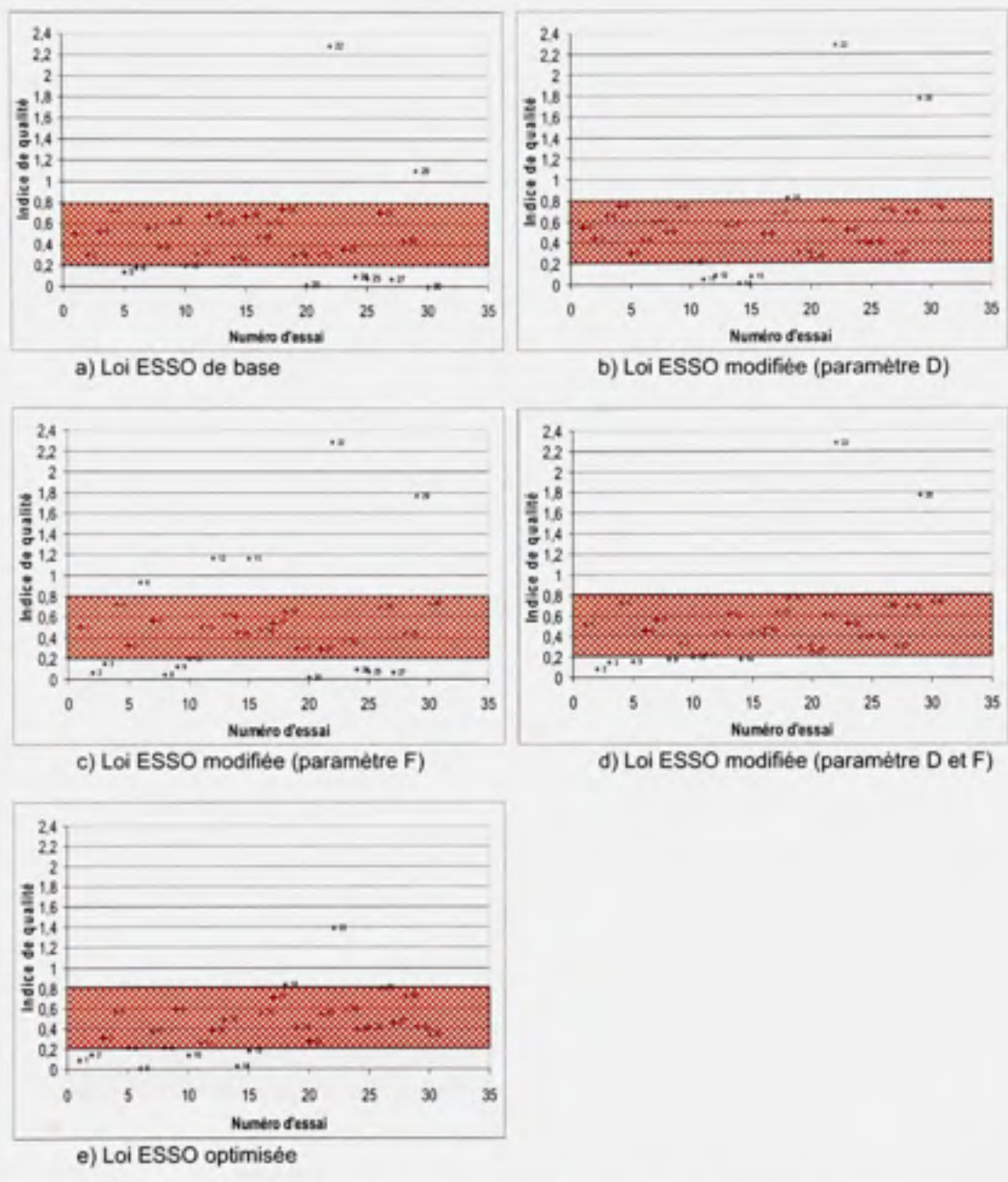


Figure 6.21 Comparaison des indices de qualité de chaque essai réalisé pour l'enrobé ESG-10.

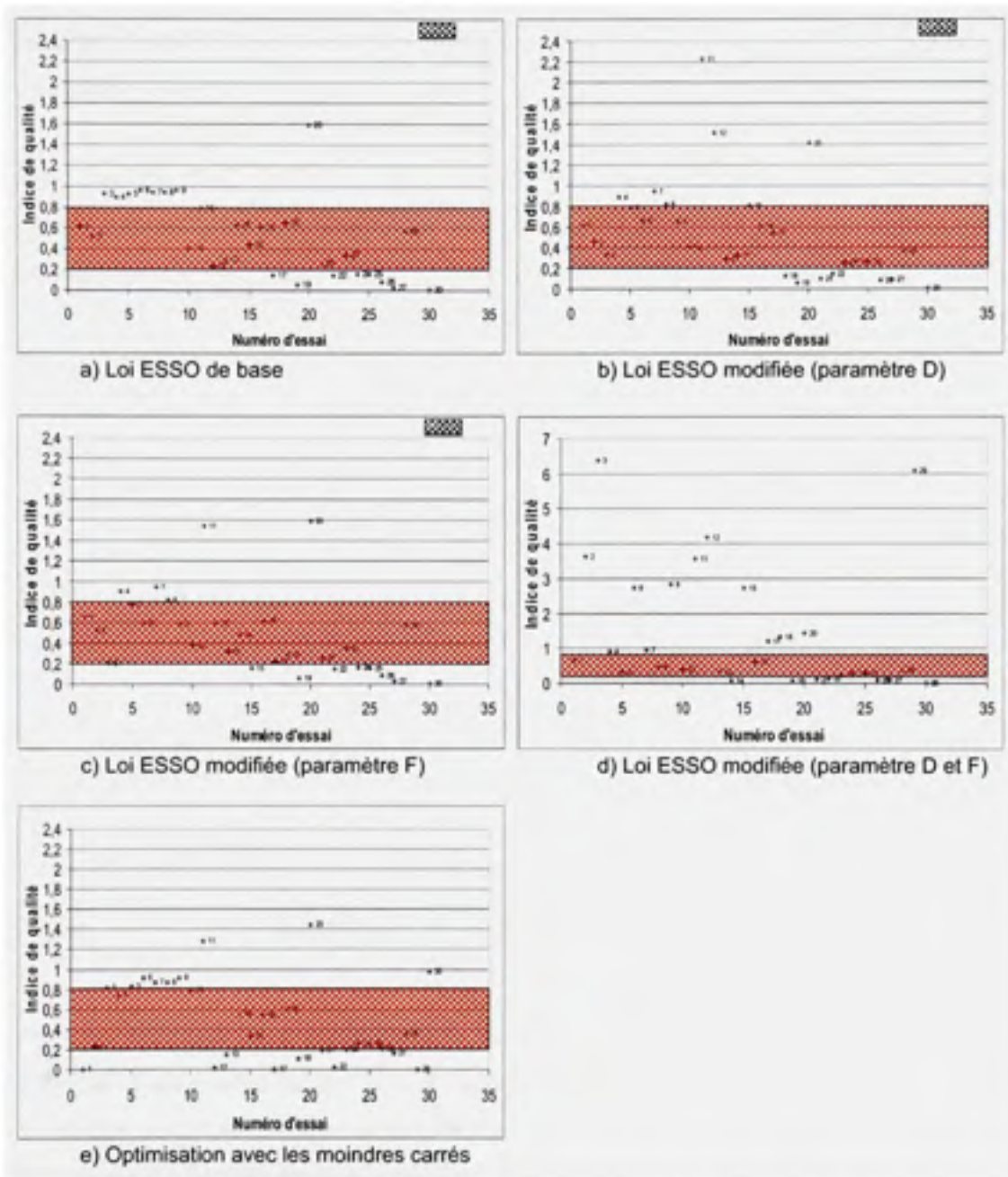


Figure 6.22 Comparaison des indices de qualité de chaque essai réalisé pour l'enrobé EB-14 (tous les essais).

À partir des tableaux et des figures des indices de qualité, on peut voir que pour les deux enrobés, la loi optimisée est celle qui apporte le moins d'écart entre les valeurs calculées de celles mesurées.

Pour l'enrobé ESG-10, à partir de la loi de base, il y a deux valeurs seulement au dessus d'un indice de qualité de 0,8 et huit valeurs sous la valeur de 0,2 et la somme des indices de qualité est 14,2. Pour la loi modifiée selon la constante D, trois valeurs se retrouvent au dessus de 0,8 et quatre sous la barre de 0,2 et la somme des indices de qualité a augmentée pour atteindre 16,7. À ce stade, la loi de base est plus précise que la loi modifiée suivant la constante D. Pour la loi modifiée selon la constante F, cinq valeurs sont maintenant au dessus de 0,8 et neuf sous 0,2 et la somme des IQ est 16,3. La loi modifiée suivant la constante F tend à éloigner les différentes valeurs des indices de qualité. La loi de base demeure plus précise que cette loi modifiée. Pour la loi modifiée selon les constantes D et F, deux valeurs sont au dessus de 0,8 et six en dessous de 0,2 et la somme des indices de qualité est 16,0. La loi de base est toujours plus précise que cette loi modifiée. Pour la loi optimisée, deux valeurs sont au dessus de la barre de 0,8 et six sont en dessous de 0,2. La somme des indices de qualité est 12,6. Cette loi engendre moins d'erreur que toutes les autres lois.

La loi final de l'enrobé ESG-10 sera la loi optimisée et elle correspond à :

$$\log \epsilon = -1,67 + 2,7 \log \sigma_v - 0,827 \sigma_w + 0,076 (T - 30) - 1,168 \log \left(\frac{f_c}{10} \right)$$

Pour l'enrobé EB-14, à partir de la loi de base, il y a deux valeurs seulement au dessus d'un indice de qualité de 0,8 et huit valeurs sous la valeur de 0,2 et la somme des indices de qualité est 21,4. Pour la loi modifiée selon la constante D, huit valeurs se retrouvent au dessus de 0,8 et sept sous la barre de 0,2 et la somme des indices de qualité a augmentée pour atteindre 22,1. Plusieurs points s'éloignent au dessus de la zone délimitée par 0,8 et la somme des indices de qualité est plus grande que celle de la loi de base. Pour la loi modifiée selon la constante F, six valeurs sont maintenant au dessus de 0,8 et huit sous 0,2 et la somme des IQ est 20,0. Le numéro 11 s'éloigne considérablement de 0 mais la majorité des points se rapproche de 0. La somme des indices de qualité diminue par

rapport à la loi de base. Pour la loi modifiée selon les constantes D et F, treize valeurs sont au dessus de 0,8 et sept en dessous de 0,2 et la somme des indices de qualité est 42,3. L'utilisation des fonctions corrections suivant les constantes D et F engendre beaucoup d'erreur entre les valeurs calculées de celle mesurées. Plus de huit indices de qualité sont au dessus de 2,5. Cette loi est beaucoup trop imprécise pour être considérée. Pour la loi optimisée, huit valeurs sont au dessus de la barre de 0,8 et dix sont en dessous de 0,2. La somme des indices de qualité est 14,6. Cette loi permet d'optimiser la constante C qui n'est pas effectuée avec les autres lois modifiées. La somme des valeurs modifiées passe 6 à 1 pour donner l'avantage à cette loi. Comme pour l'enrobé ESG-10, c'est la loi optimisée qui engendre le moins d'erreur.

La loi final de l'enrobé EB-14 sera la loi optimisée et elle correspond à :

$$\log \dot{\epsilon} = -1,781 + 3,308 \log \sigma_v - 1,781 \sigma_u + 0,066 (T - 30) + 0,042 \log \left(\frac{f}{10} \right)$$

Le tableau 6.16 présente la synthèse des constantes entre les lois à priori selon la loi de déformation permanente de base, optimisées à partir de l'indice de qualité et les constantes obtenues par Aussedat.

Tableau 6.16

Synthèse des constantes à priori et optimisée des enrobés
ESG-10 et EB-14 ainsi que celles d'Aussedat

Constantes	ESG-10		EB-14		Aussedat
	À priori	Optimisée	À priori	Optimisée	
A	-1,67	-1,67	-1,72	-1,78	-2,04
B	2,93	2,70	3,39	3,31	4,33
C	-0,83	-0,83	-1,00	-1,78	-0,72
D _{10Hz}	0,081	0,076	0,066	0,066	0,093
F _{30°C}	-0,80	-1,17	0,47	0,04	-1,43

CONCLUSION

La réalisation d'essais de compression cyclique a conduit à l'obtention de la loi de déformation permanente pour les deux enrobés testés. Afin de minimiser l'ampleur du programme expérimental, un seul essai par combinaison de conditions d'essai (σ_v , σ_H , T et f_c) a été réalisé.

La première phase du programme expérimental est la caractérisation des deux enrobés pour obtenir la loi de déformation permanente. La réalisation d'essai de compression cyclique a permis d'obtenir cette loi. Suite à l'analyse des résultats des essais, la loi à priori de déformation permanente pour l'enrobé ESG-10 est la suivante :

$$\log \dot{\epsilon} = -1,67 + 2,7 \log \sigma_v - 0,82 \sigma_H + 0,076 (T - 30) - 0,80 \log \left(\frac{f_c}{10} \right)$$

et celle de l'enrobé EB-14 (à priori) est :

$$\log \dot{\epsilon} = -1,78 + 3,31 \log \sigma_v - 1,00 \sigma_H + 0,066 (T - 30) + 0,47 \log \left(\frac{f_c}{10} \right)$$

La seconde phase du programme expérimental est de vérifier l'indépendance des constantes pour les deux enrobés tel que proposé par les travaux d'Aussedat. Il est possible de conclure :

Que peu importe l'enrobé à l'étude, dans le cadre de ce projet, la température et la fréquence n'ont pas d'influence constante et notable sur l'évolution de la constante B. La constante D n'est pas indépendante, mais aucune tendance linéaire n'est notable. Pour la constante F, Une certaine tendance linéaire est observable entre F et la température. Lorsque la température augmente, plus la constante F diminue. La loi optimisée minimise l'indice de qualité de l'ensemble des essais et l'indépendance des constantes ne sera pas utilisée pour la loi de déformation permanente finale de chaque enrobé.

La troisième phase du programme expérimental est de comparer la pente de la deuxième phase des essais réels ($\dot{\epsilon}_{mesurée}$) avec le calcul de la pente à partir de la loi de déformation permanente ($\dot{\epsilon}_{calculée}$). Pour les deux enrobés bitumineux testés, c'est la loi optimisée qui engendre le moins d'écart de l'indice de qualité.

La quatrième et dernière phase du programme expérimental est de vérifier la tendance des constantes obtenue dans ce mémoire par rapport aux constantes établie par Aussedat. Les constantes de la loi de déformation permanente obtenue des deux enrobés étudiés sont du même ordre de grandeur aux constantes calculées par Aussedat.

RECOMMANDATIONS

Dans le but de poursuivre la prédiction de l'orniérage suivant la méthodologie ESSO, il faudrait compléter la caractérisation des deux enrobés testés dans cette étude en ajoutant quelques essais de confinement afin d'évaluer la constante C de la loi de déformation permanente avec quatre valeurs supplémentaires.

Il faudrait doubler la plupart des résultats des deux nouveaux enrobés testés afin de s'assurer de la validité des résultats obtenus.

Une fois que la loi de déformation permanente de ces deux enrobés sera complétée, réaliser la caractérisation de deux nouveaux enrobés bitumineux, soit un enrobé semi grenu ESG-14 et une grave bitume GB-20. Les quatre matériaux caractérisés permettront de réaliser plusieurs combinaisons de structure de chaussée. Les enrobés EB-14, ESG-14 et GB-20 sont généralement utilisés en couche de base et l'enrobé ESG-10 en couche de roulement.

Ensuite vérifier l'indépendance des constantes B, D et F et vérifier si la tendance obtenue dans ce mémoire est valable pour les deux nouveaux enrobés. Donc, vérifier si B varie selon la température ou la fréquence, si D varie selon la fréquence ou F selon la température.

Dans le cas où il y a une dépendance entre les constantes et les conditions d'essai jugé indépendante par Aussedat, modifier la loi de déformation permanente en introduisant la tendance des constantes et vérifier si l'ajout de cette dépendance permet de minimiser l'écart entre epsilon mesuré et epsilon calculé.

Un point marquant a été observé lors de l'analyse des résultats. Il s'agit du nombre de cycle appliqué lors d'un essai de déformation permanente. Sur certain essais, la troisième phase n'a pas été atteinte. Lors d'essais futur, il faudrait s'assurer d'atteindre la fin de la deuxième phase ou le début de la troisième pour que la pente mesurée à partir des résultats d'essai soit valide. Le tableau suivant présente une suggestion du nombre de

cycles minimaux et le temps requis pour réaliser cet essai en fonction des différentes conditions d'essai.

Tableau R.1

Suggestion du nombre de cycles de sollicitation minimal pour différentes conditions d'essai à l'essai de déformation permanente

σ_v (MPa)	T (°C)	Durée des essais					
		1 hertz		5 hertz		10 hertz	
		Cycles	Temps	Cycles	Temps	Cycles	Temps
0,2	50	1,5M	17j	600k	1,4j	300k	8,3h
	40	2,5M	28j	1,5M	3,5j	4,0M	4,6j
	30	5,0M	56j	2,0M	4,6j	8,0M	9,3j
0,4	50	80k	1j	75k	4,2h	100k	2,8h
	40	200k	2,3j	300k	16,7h	500k	13,9h
	30	400k	4,6j	450k	25h	3,0M	3,5j
0,6	50	20k	5,6h	25k	2h	30k	0,8h
	40	50k	13,9h	150k	8,4h	125k	3,4h
	30	125k	1,5j	300k	16,7h	400k	11,1h

ANNEXE I

MÉTHODE DES MOINDRES CARRÉS D'APPROXIMATION

À partir des données des contraintes et des déformations sous forme discrète en fonction du temps, il s'agit de transformer ce système discret en un système continu. On désigne par X la variable à transposer (X peut désigner soit la contrainte ou la déformation). Après avoir enlevé la constante du signal à X (pour une moyenne de deux cycles), l'amplitude du signal s'écrit:

$$\Delta X(t) = X(t) - \bar{X} \quad (\text{A1.1})$$

$$\Delta X(t) = a_x \sin(\omega t) + b_x \cos(\omega t) \quad (\text{A1.2})$$

Il faut maintenant déterminer les inconnus a_x et b_x . Afin d'alléger l'écriture, on notera \sin pour $\sin(\omega t)$ et \cos pour $\cos(\omega t)$. En décomposant les deux termes du numérateur et en remplaçant $\Delta X(t)$ par son équivalent, on obtient :

$$\sum \Delta X(t) \sin \sum \cos^2 = a_x \sum \sin^2 \sum \cos^2 + b_x \sum \sin \cos \sum \cos \quad (\text{A1.3})$$

$$\sum \Delta X(t) \cos \sum \sin \cos = a_x (\sum \sin \cos)^2 + b_x \sum \cos^2 \sum \sin \cos \quad (\text{A1.4})$$

D'où:

$$a_x = \frac{\sum \Delta X(t) \sin(\omega t) \sum \cos^2(\omega t) - \sum \Delta X(t) \cos(\omega t) \sum \sin(\omega t) \cos(\omega t)}{\sum \sin^2(\omega t) \sum \cos^2(\omega t) - (\sum \sin(\omega t) \sum \cos(\omega t))^2} \quad (\text{A1.5})$$

$$b_x = \frac{\sum \Delta X(t) \cos(\omega t) \sum \sin^2(\omega t) - \sum \Delta X(t) \sin(\omega t) \sum \sin(\omega t) \cos(\omega t)}{\sum \sin^2(\omega t) \sum \cos^2(\omega t) - (\sum \sin(\omega t) \sum \cos(\omega t))^2} \quad (\text{A1.6})$$

Connaissant les amplitudes a_x et b_x du signal, on se ramène à une expression sinusoïdale de la forme $X(t) = X_0 \sin(\omega t + \varphi)$ avec :

$$X_0 = \sqrt{a_x^2 + b_x^2} \quad (\text{A1.7})$$

$$\varphi = \pm \arccos\left(\frac{a_x}{X_0}\right) \quad (\text{A1.8})$$

ANNEXE II

MÉTHODE INTÉGRALE D'APPROXIMATION

La méthode intégrale est un outil qui permet de transformer un système de données sous forme discrète, de signal sinusoïdal discret combiné avec une droite en un signal continue. À l'aide de cette méthode, seront retrouvés la pente, la constante, l'amplitude et l'angle de phase du signal.

Dans cette étude le signal sinusoïdal suivant est considéré :

$$X(t) = \alpha t + \beta + a \sin(\omega t + \varphi) \quad (\text{AII.1})$$

Où :

α , la pente de la composante linéaire;

β , la constante du signal;

a , l'amplitude du signal;

φ , l'angle de phase;

$\omega = 2 \pi f$

f , la fréquence du signal.

1 – Calcul de la pente alpha

Dans le calcul de la pente de la composante linéaire du signal, l'intégrale suivante est considérée :

$$I = \int_{\tau_1}^{\tau_2} X(t) \sin(\pi f t) dt \quad (\text{AII.2})$$

En prenant $\tau_2 - \tau_1 = 2nT$ où T est la période du signal ($T=1/f$) et n un entier naturel, l'expression suivante de I est obtenue :

$$I = -\frac{2}{\pi} nT^2 \alpha \quad (\text{AII.3})$$

d'où

$$\alpha = -\frac{\pi I}{2nT^2} \quad (\text{AII.4})$$

I est alors approché par l'expression suivante :

$$I \approx \sum_{i=0}^{i=p-1} \frac{[X_i \sin(\pi f t_i) + X_{i+1} \sin(\pi f t_{i+1})](t_{i+1} - t_i)}{2} \quad (\text{All.5})$$

où X_i sont les valeurs du signal discret, $i=0$ correspond à τ_1 , et $i=p$ correspond à τ_2 ($\tau_2 = \tau_1 + 2nT$). (All.6)

2 – Calcul de la constante beta

Dans le calcul de l'amplitude du signal sinusoïdal, le signal suivant est considéré :

$$Y(t) = X(t) - at = \beta + a \sin(2\pi ft + \varphi) \quad (\text{All.7})$$

Ensuite l'intégrale suivante est considérée :

$$I' = \int_{\tau_1}^{\tau_2} Y(t) dt \quad (\text{All.8})$$

En prenant $\tau_2 - \tau_1 = nT$ ou T est la période du signal ($T=1/f$) et n un entier naturel, on obtient l'expression suivante :

$$I' = nT\beta \quad (\text{All.9})$$

d'où

$$\beta = \frac{I'}{nT} \quad (\text{All.10})$$

I' est approché par l'expression suivante

$$I' = \sum_{i=0}^{i=p-1} \frac{(Y_i + Y_{i+1})(t_{i+1} - t_i)}{2} \quad (\text{All.11})$$

avec $Y_i = X_i - at_i$ où X_i sont les valeurs du signal discret. $i=0$ correspond à τ_1 et $i=p$ correspond à τ_2 (avec $\tau_2 = \tau_1 + nT$).

3 – Calcul de l'amplitude a

Pour calculer l'amplitude de la composante sinusoïdale, on considère d'abord le signal suivant :

$$Z(t) = X(t) - at - \beta = a \sin(2\pi ft + \varphi) \quad (\text{All.12})$$

Ensuite on considère l'intégrale suivante :

$$I'' = \int_{\tau_1}^{\tau_2} Z(t) Z(t) dt \quad (\text{All.13})$$

En prenant $\tau_2 - \tau_1 = nT$ ou T est la période du signal ($T=1/f$) et n un entier naturel, on obtient l'Expression suivante :

$$I'' = \frac{1}{2} nT a^2 \quad (\text{All.14})$$

d'où

$$a = \sqrt{\frac{2I''}{nT}} \quad (\text{All.15})$$

I'' est approché par l'expression suivante :

$$I'' = \sum_{i=0}^{p-1} \frac{(Z_i^2 + Z_{i+1}^2)(t_{i+1} - t_i)}{2} \quad (\text{All.16})$$

avec $Z_i = X_i - at_i - \beta$ où X_i sont les valeurs du signal discret. $i = 0$ correspond à τ_1 et $i = p$ correspond à τ_2 (avec $\tau_2 = \tau_1 + nT$).

4 – Calcul de l'angle de phase

Pour calculer l'angle de phase φ , on considère l'intégrale suivante :

$$I''' = \int_{\tau_1}^{\tau_2} Z(t) \sin(2\pi ft) dt = \frac{anT \cos(\varphi)}{2} \quad (\text{All.17})$$

d'où :

$$\cos(\varphi) = \frac{2I'''}{anT} \quad (\text{All.18})$$

avec :

$$I''' = \sum_{i=0}^{p-1} \frac{(Z_i \sin(2\pi ft_i) + Z_{i+1} \sin(2\pi ft_{i+1}))(t_{i+1} - t_i)}{2} \quad (\text{All.19})$$

ANNEXE III

**MÉTHODE D'ÉCHANTILLONNAGE DE MASSE D'ENROBÉS BITUMINEUX
À L'USINE D'ENROBAGE**

La procédure d'échantillonnage de masse à e est présentée à la Figure All.1. Elle présente les différentes étapes suivies durant l'échantillonnage. Au départ, le malaxage s'effectue à l'usine d'enrobage. Suite au malaxage, la gâchée l'enrobé est prélevé à la sortie du malaxeur par la benne de la chargeuse qui avait été légèrement lubrifiée pour éviter les pertes de bitume ou d'enrobé sur les parois de la benne. Ensuite, des contreplaqués servent de plancher pour déposer l'enrobé durant l'échantillonnage. Ces contreplaqués furent sélectionnés à cause de leur surface non adhésive et non absorbante. L'enrobé est distribué aléatoirement dans l'échantillonneur de 25 boîtes conçu au LUCREB. 150 boîtes sont ainsi prélevées de la gâchée et entreposées au laboratoire avant la réalisation des essais de caractérisation de l'enrobé. Il est à noter que la répartition de l'enrobé à travers les 25 boîtes et la prise d'enrobés à différents endroit dans la réserve ont agi comme séparateur mécanique pour assurer un échantillonnage le plus homogène possible (Meunier 2005)



Figure All.1 Échantillonnage de masse en usine d'enrobage.

ANNEXE IV

ATTESTATION DE CONFORMITÉ DU BITUME

ATTESTATION DE CONFORMITÉ
LIANT BITUMINEUX

		No. ID LOT 71233	No. attestation 3398	
INFORMATIONS GÉNÉRALES		RECOMMANDATIONS-		
Distributeur et lieu d'entreposage et d'expédition Sorel – Tracy (Québec)		Température d'utilisation(1)		
Fabricant et lieu de fabrication Kildair Services Ltée – Sorel-Tracy		Entreposage (°C)	140	175
Classe de bitume PG 70-28	Nom commercial	Malaxage (°C)	156	170
Date de fabrication 2005/11/08	No. de lot L113			
ESSAIS CONVENTIONNELS		EXPÉDITION		
Date de la caractérisation	2005/11/08	Numéro et nom de la centrale d'enrobage		
Masse volumique @ 25°C (g/cm ³)	1.0233	Transporteur	Transport DJL	
Stabilité au stockage (°C)	0.6			
Recouvrance d'élasticité @ 10°C (%)	79	No. de la citerne 218	Date chargement 2005/11/10	Quantité livrée 32 100 TM
Viscosité Brookfield @ 135°C (Pa.s)	0.885	Notes (1) : Températures calculées selon LC 25--007		
Viscosité Brookfield @ 165°C (Pa.s)	0.240			
T _e (°C)	66.9			
T _s (°C)	-25.0			
Module de rigidité S _e (MPa)	105.9			
Pente m _e	0.431			
TBA moy	n/a			
ESSAIS DE CONTRÔLE				
Date du contrôle	2005/11/08			
Recouvrance d'élasticité @ 10°C (%)	75			
T _e (°C)	66.5			
Module de rigidité S _e (MPa)	105.6			
Pente m _e	0.431			
G* / sin (δ) (kPa)	n/a			
Point éclair (°C)	n/a			
REMARQUES				
Préparé et approuvé par : 		Date : 2005/11 /10		
ESPACE RÉSERVÉ AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS				
No. du contrat		Soumis par (organisme de contrôle)		
Prélevé par	Date			
No. du réservoir à la centrale d'enrobage	Température	À l'usage du laboratoire	Date reçu	

ANNEXE V

**COURBES DES RÉSULTATS OBTENUS POUR L'ENROBÉ ESG-10 ET
TABLEAU DE RÉSULTATS POUR TOUS LES ESSAIS**

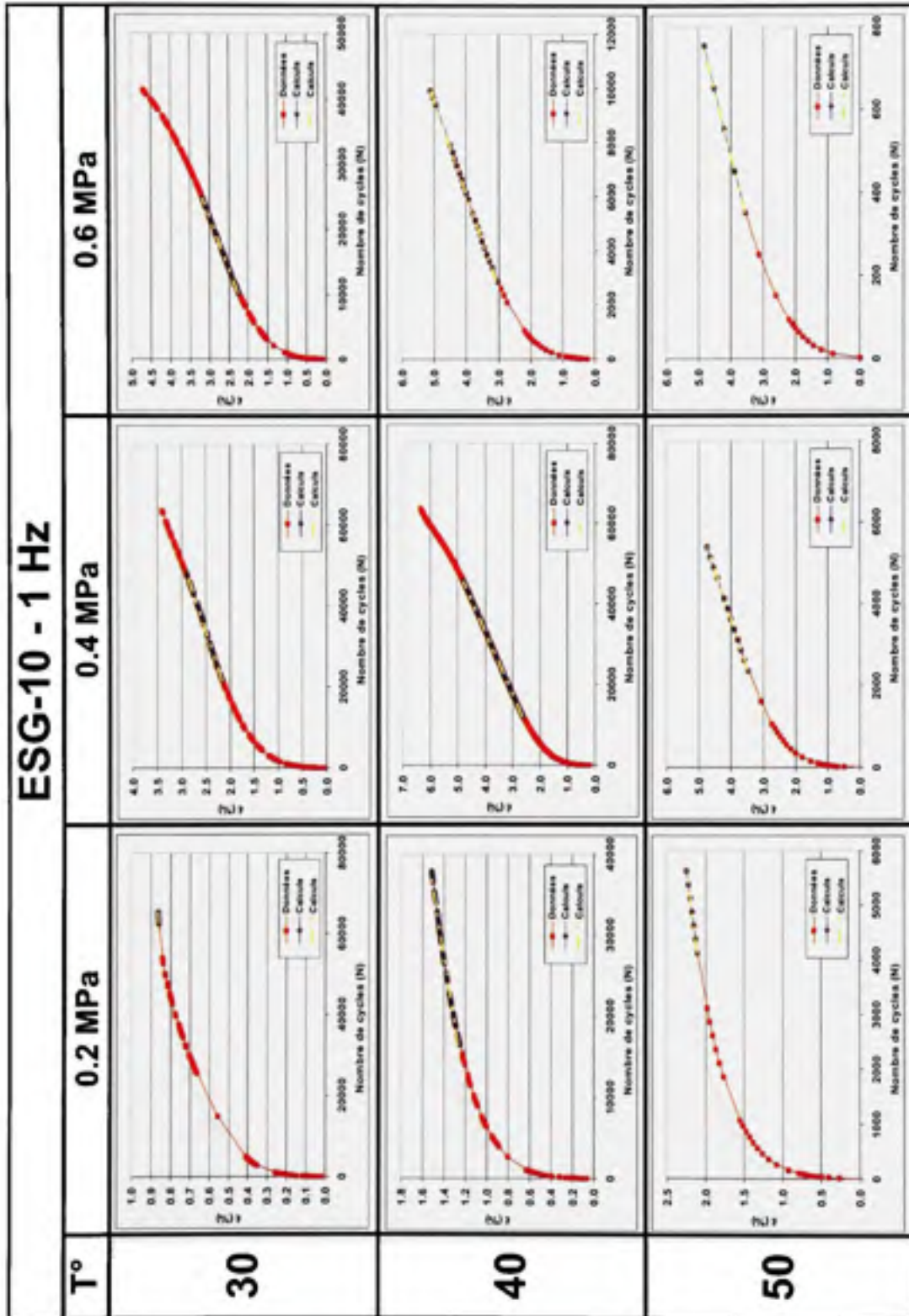


Figure AV.1 Courbe de résultats des essais de l'enrobé ESG-10 à la fréquence 1 hertz.

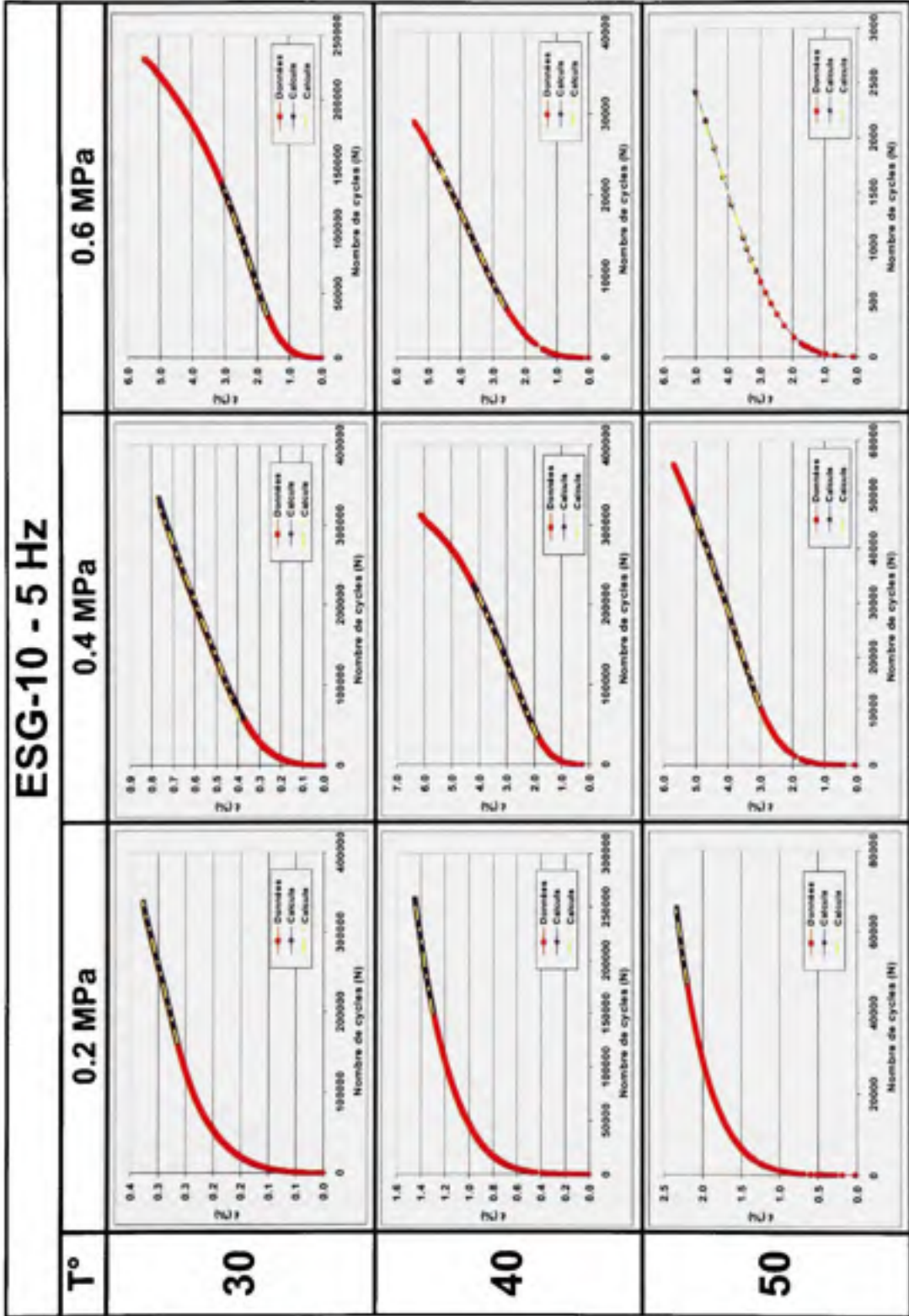


Figure AV.2 Courbe de résultats des essais de l'enrobé ESG-10 à la fréquence 5 hertz.

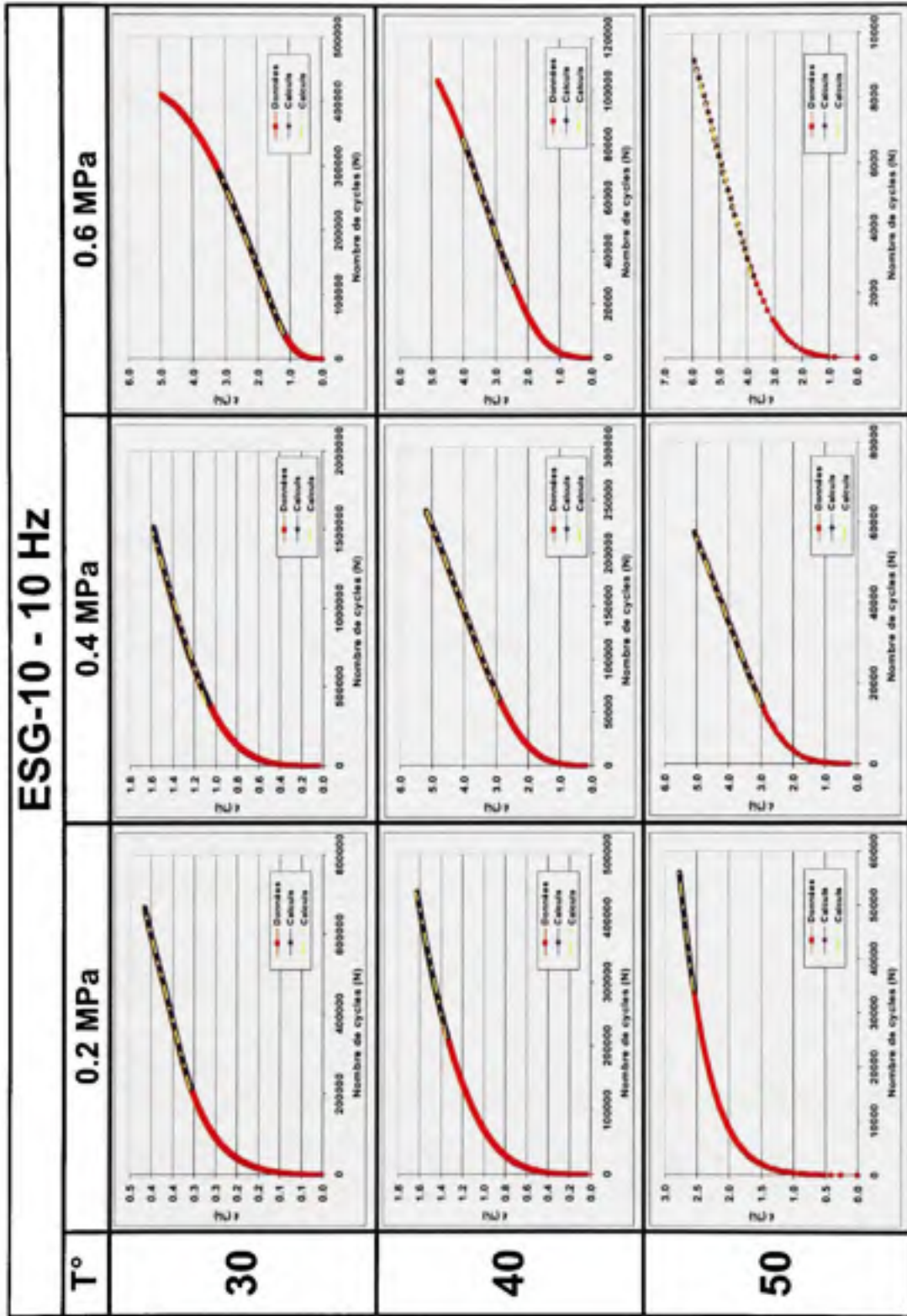


Figure AV.3 Courbe de résultats des essais de l'enrobé ESG-10 à la fréquence 10 hertz.

Tableau AV.1

Résultats aux essais de déformation permanente pour l'enrobé ESG-10

ESG-10 1 Hz 0,2 MPa							
#	Date	T*	ϵ_0	Pente $\dot{\epsilon}$	Pente(%/Mc)	N _{50%}	% vides
ESG-10 A5-3	270108	30	0,72103	0,0000022	2,234	2362880	4,2
ESG-10 B5-3	280108	40	1,13030	0,0000102	10,274	474001	4,3
ESG-10 C5-1	050208	50	1,71138	0,0000956	95,600	44860	4,3
ESG-10 1 Hz 0,4 MPa							
#	Date	T*	ϵ_0	Pente $\dot{\epsilon}$	Pente(%/Mc)	N _{50%}	% vides
ESG-10 C5-3	290108	30	1,46436	0,0000303	30,393	149234	5,2
ESG-10 B3-2	110707	40	1,91975	0,0000627	62,739	65035	5,6
ESG-10 A5-2	60208	50	2,45318	0,0004314	431,455	8221	4,8
ESG-10 1 Hz 0,6 MPa							
#	Date	T*	ϵ_0	Pente $\dot{\epsilon}$	Pente(%/Mc)	N _{50%}	% vides
ESG-10 B5-2	050208	30	1,64404	0,0000619	61,960	70302	4,5
ESG-10 C5-2	080208	40	2,25037	0,0002858	285,850	13117	4,3
ESG-10 D5-1	070208	50	2,49716	0,0030972	3097,260	1131	5,0
ESG-10 5 Hz 0,2 MPa							
#	Date	T*	ϵ_0	Pente $\dot{\epsilon}$	Pente(%/Mc)	N _{50%}	% vides
ESG-10 A5-1	220108	30	0,20679	0,0000003	0,360	16113575	4,2
ESG-10 D5-3	040208	40	1,08770	0,0000014	1,432	3429187	4,9
ESG-10 D5-2	140208	50	1,85891	0,0000073	7,352	563229	4,4
ESG-10 5 Hz 0,4 MPa							
#	Date	T*	ϵ_0	Pente $\dot{\epsilon}$	Pente(%/Mc)	N _{50%}	% vides
ESG-10 A6-1	090208	30	0,31943	0,0000013	1,369	4148528	4,6
ESG-10 B3-1	100707	40	1,54861	0,0000113	11,326	393033	4,9
ESG-10 D6-1	180208	50	2,40980	0,0000560	56,046	64058	4,8
ESG-10 5 Hz 0,6 MPa							
#	Date	T*	ϵ_0	Pente $\dot{\epsilon}$	Pente(%/Mc)	N _{50%}	% vides
ESG-10 C6-1	140208	30	1,21468	0,0000136	13,608	351661	4,3
ESG-10 B6-2	190208	40	1,88471	0,0001182	118,226	34809	5,0
ESG-10 C6-2	190208	50	2,26723	0,0011451	1145,141	3260	4,9
ESG-10 10 Hz 0,2 MPa							
#	Date	T*	ϵ_0	Pente $\dot{\epsilon}$	Pente(%/Mc)	N _{50%}	% vides
ESG-10 B5-1	220108	30	0,26130	0,0000002	0,234	24553772	4,9
ESG-10 A6-2	180208	40	1,15869	0,0000010	1,075	4504910	4,9
ESG-10 A6-3	200208	50	2,22919	0,0000088	9,822	383926	4,7
ESG-10 10 Hz 0,4 MPa							
#	Date	T*	ϵ_0	Pente $\dot{\epsilon}$	Pente(%/Mc)	N _{50%}	% vides
ESG-10 C3-1	040707	30	1,01045	0,0000003	0,378	13216294	4,8
ESG-10 B2-2	120407	40	2,16115	0,0000125	12,585	305044	4,5
ESG-10 D3-2	210607	50	2,31288	0,0000491	49,193	74952	6,0
ESG-10 10 Hz 0,6 MPa							
#	Date	T*	ϵ_0	Pente $\dot{\epsilon}$	Pente(%/Mc)	N _{50%}	% vides
ESG-10 D4-2	151207	30	1,23735	0,0000135	13,555	351348	4,2
ESG-10 C3-2	030707	40	1,67944	0,0000284	28,405	152103	5,6
ESG-10 B6-1	130208	50	3,08835	0,0003083	308,376	9442	4,5

Source : Réalisé par Kevin Bilodeau à partir des résultats d'essai

ANNEXE VI

**COURBES DES RÉSULTATS OBTENUS POUR L'ENROBÉ EB-14 ET
TABLEAU DE RÉSULTATS POUR TOUS LES ESSAIS**

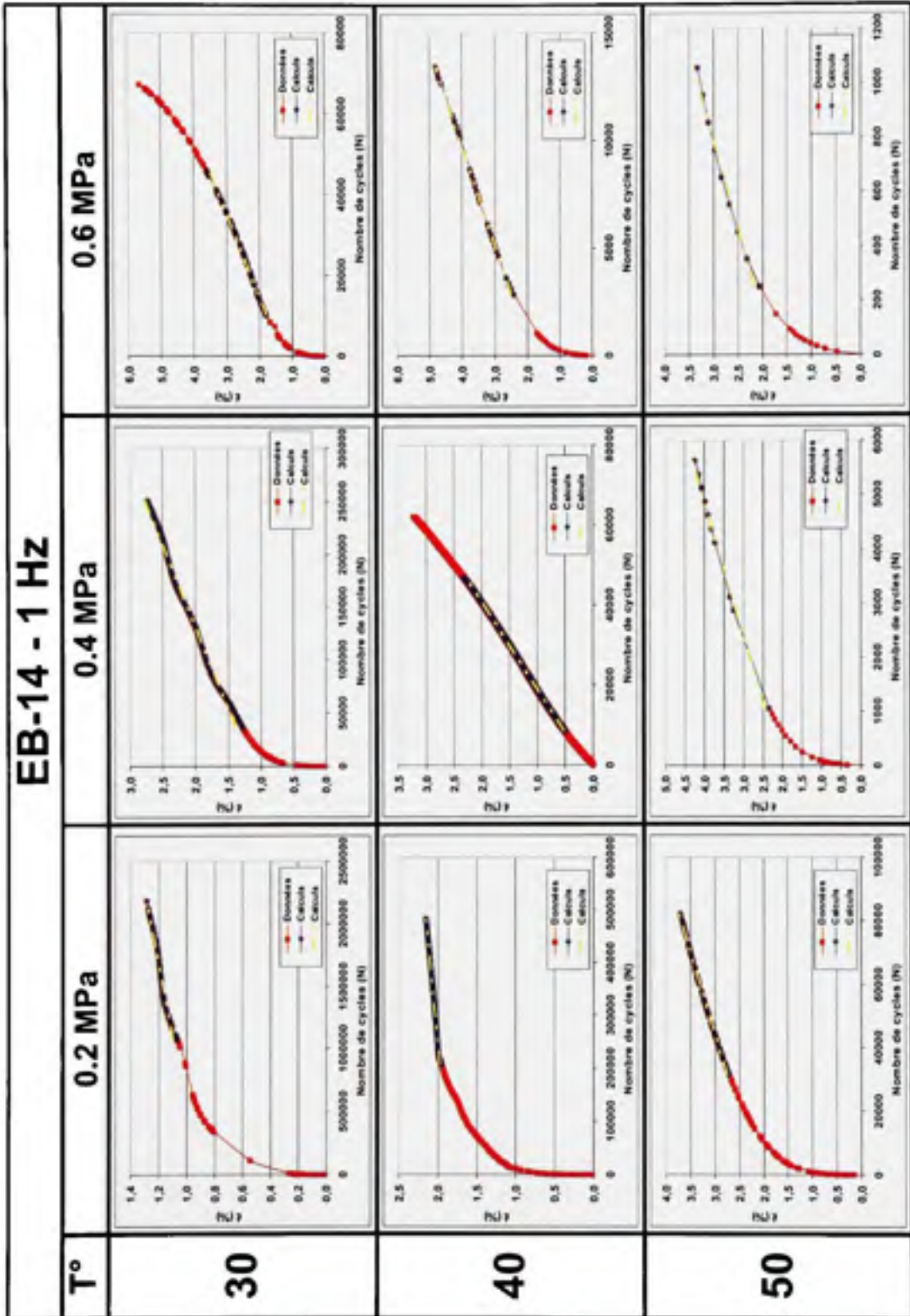


Figure AVI.1 Courbe de résultats des essais de l'enrobé B-14 à la fréquence 1 hertz.

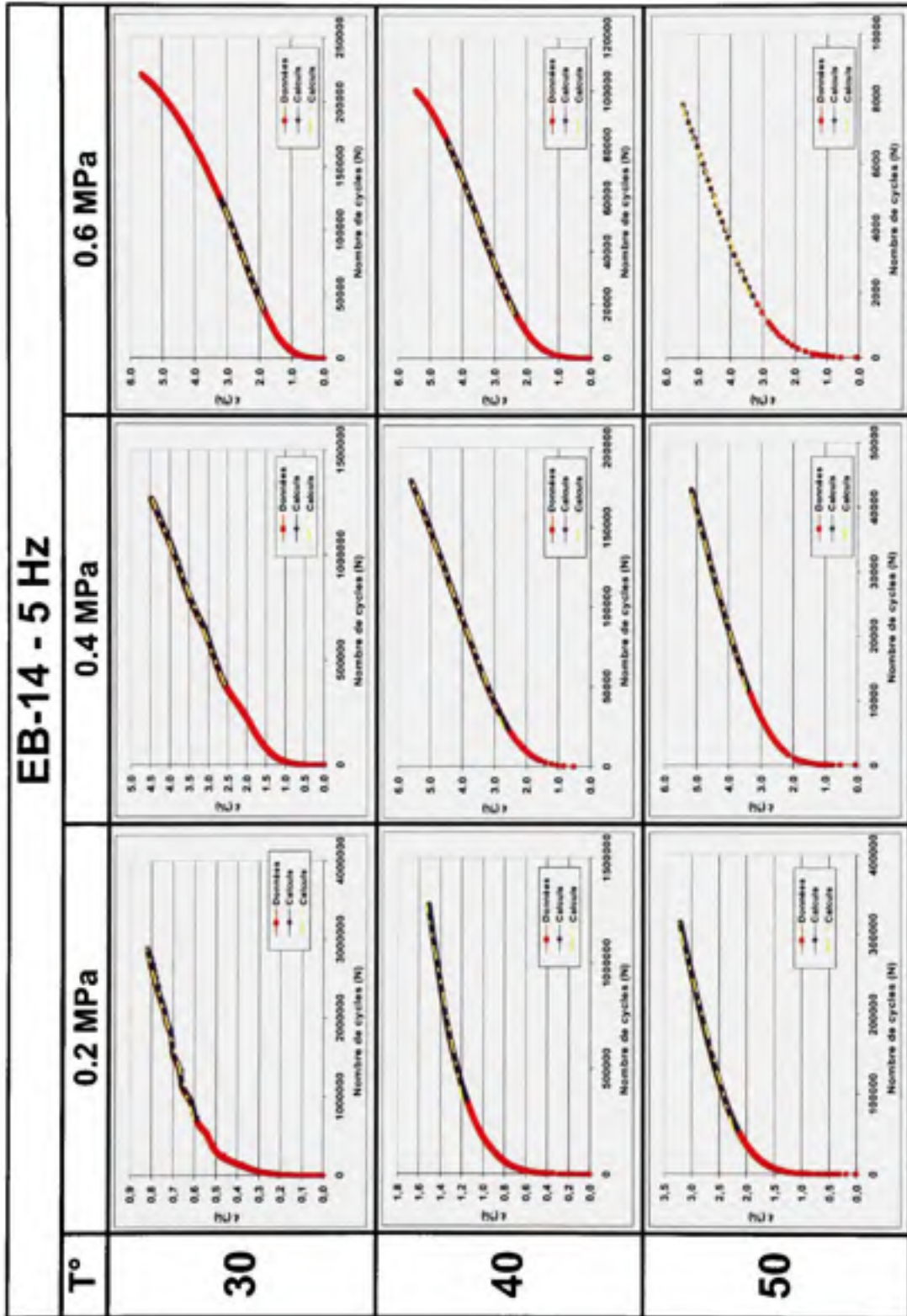


Figure AVI.2 Courbe de résultats des essais de l'enrobé EB-14 à la fréquence 5 hertz.

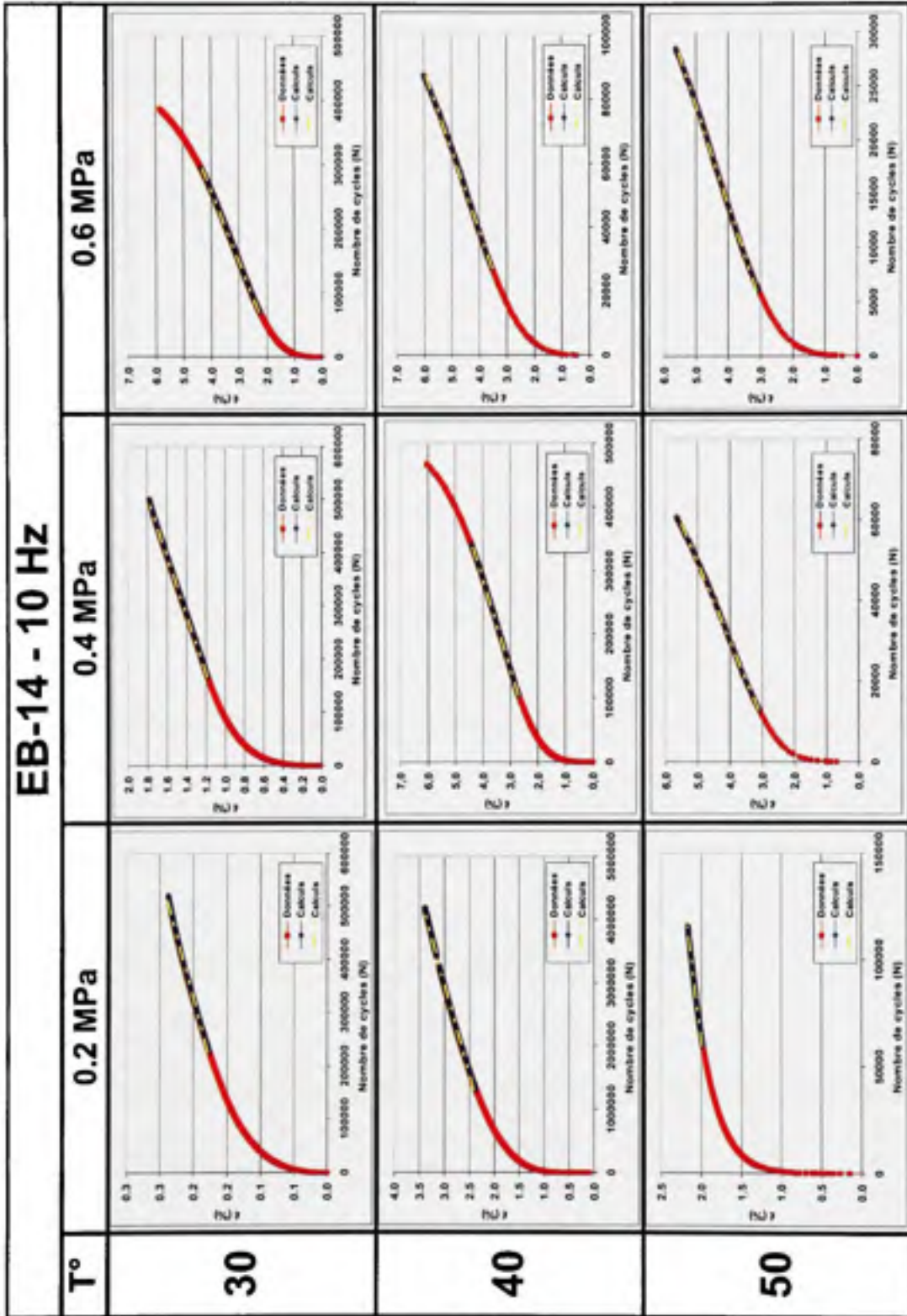


Figure AVI.3 Courbe de résultats des essais de l'enrobé EB-14 à la fréquence 10 hertz.

Tableau AVI.1

Résultats aux essais de déformation permanente pour l'enrobé EB-14

EB-14 1 Hz 0,2 MPa							
#	Date	T*	ϵ_0	Pente ϵ	Pente(%/Mc)	N _{95%}	% vides
EB14 A6-1	180108	30	0,89807	0,0000001	0,179	28523654	4,2
EB14 B5-2	020108	40	1,84686	0,0000006	0,633	6561471	4,3
EB14 C6-1	170108	50	2,14908	0,0000019	1,929	1995980	4,3
EB-14 1 Hz 0,4 MPa							
#	Date	T*	ϵ_0	Pente ϵ	Pente(%/Mc)	N _{95%}	% vides
EB14 A5-3	110108	30	1,00458	0,0000080	8,025	622469	5,2
EB14 A3-4	220607	40	0,10631	0,0000467	46,750	126068	5,6
EB14 B6-2	170108	50	2,25623	0,0003538	353,856	10580	4,8
EB-14 1 Hz 0,6 MPa							
#	Date	T*	ϵ_0	Pente ϵ	Pente(%/Mc)	N _{95%}	% vides
EB14 A5-1	020108	30	1,36402	0,0000451	45,105	102782	4,5
EB14 A5-2	291208	40	1,87744	0,0002178	217,835	18925	4,3
EB14 D5-2	140108	50	2,21736	0,0010301	1030,178	3672	5,0
EB-14 5 Hz 0,2 MPa							
#	Date	T*	ϵ_0	Pente ϵ	Pente(%/Mc)	N _{95%}	% vides
EB14 B5-1	191207	30	0,25839	0,0000002	0,295	19438947	4,2
EB14 D5-3	261207	40	1,13940	0,0000009	0,989	4913586	4,9
EB14 D6-1	160108	50	2,15434	0,0000033	3,394	1133092	4,4
EB-14 5 Hz 0,4 MPa							
#	Date	T*	ϵ_0	Pente ϵ	Pente(%/Mc)	N _{95%}	% vides
EB14 B4-2	121207	30	1,06418	0,0000055	5,513	885276	4,6
EB14 C3-3	260607	40	2,35130	0,0000179	17,903	203807	4,9
EB14 B5-3	020108	50	2,85171	0,0000546	54,644	57615	4,8
EB-14 5 Hz 0,6 MPa							
#	Date	T*	ϵ_0	Pente ϵ	Pente(%/Mc)	N _{95%}	% vides
EB14 C6-3	120208	30	1,29292	0,0000152	15,294	307782	4,3
EB14 C5-2	100108	40	1,88356	0,0000314	31,416	131032	5,0
EB14 C5-3	100108	50	2,76918	0,0003502	350,221	9225	4,9
EB-14 10 Hz 0,2 MPa							
#	Date	T*	ϵ_0	Pente ϵ	Pente(%/Mc)	N _{95%}	% vides
EB-14 D6-2	210108	30	0,13156	0,0000002	0,209	28032518	4,9
EB14 D3-3	140607	40	1,96995	0,0000003	0,346	11653117	4,9
EB14 D5-1	150108	50	1,75460	0,0000038	3,854	1101468	4,7
EB-14 10 Hz 0,4 MPa							
#	Date	T*	ϵ_0	Pente ϵ	Pente(%/Mc)	N _{95%}	% vides
EB14 B6-1	130208	30	0,87926	0,0000018	1,821	2811660	4,8
EB14 B2-2	120407	40	1,98644	0,0000070	7,009	572591	4,5
EB14 A2	200108	50	2,52677	0,0000475	47,547	73049	6,0
EB14 C3-1	090707	50	2,54922	0,0000486	48,668	70904	
EB-14 10 Hz 0,6 MPa							
#	Date	T*	ϵ_0	Pente ϵ	Pente(%/Mc)	N _{95%}	% vides
EB14 D4-2	151207	30	1,65487	0,0000090	9,012	482171	4,2
EB14 D3-2	130607	40	2,48265	0,0000388	38,810	90630	5,6
EB14 C5-1	140108	50	2,45839	0,0001098	109,839	32244	4,5

Source : Réalisé par Kevin Biodeau à partir des résultats d'essai

ANNEXE VII

DÉTAIL DU CALCUL DES CONSTANTES DE L'ENROBÉ EB-14

Lors du calcul des constantes correspondant à l'enrobé EB-14, le même protocole de calcul que pour l'enrobé ESG-10 a été réalisé.

Les constantes A et B

Les paramètres A et B de la loi de déformation permanente de la méthode ESSO sont obtenus en traçant $\dot{\epsilon}$ versus σ_v dans les axes log $\dot{\epsilon}$ et log σ_v . La Figure AVII.1 illustre cette relation pour les conditions de référence de la loi, soient $\sigma_H = 0$, $T = 30^\circ\text{C}$ et $f_r = 10\text{Hz}$.

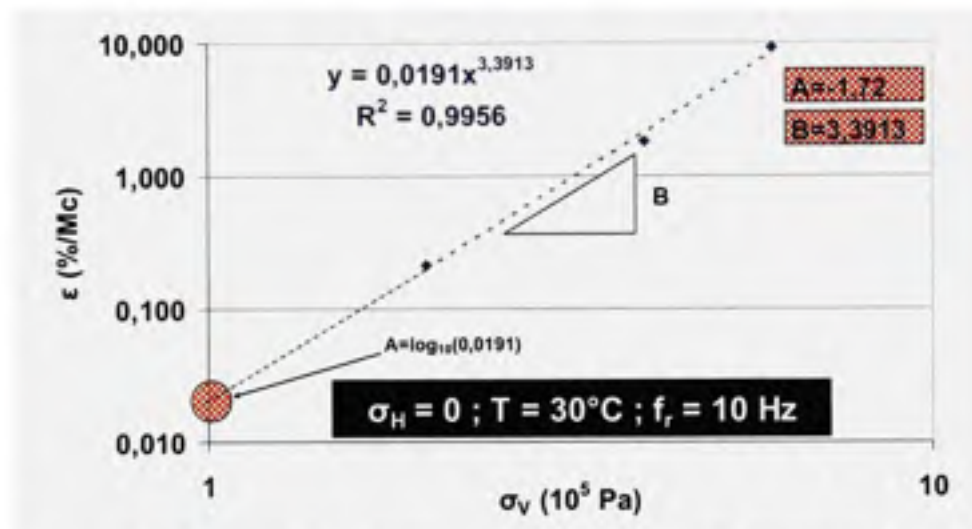


Figure AVII.1 Pente de la déformation $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_v pour l'enrobé EB-14 aux conditions d'essai ($\sigma_H = 0$, $T = 30^\circ\text{C}$ et $f_r = 10\text{Hz}$)

La loi de puissance approximée pour les conditions de référence est $\dot{\epsilon} = 0,0191 \sigma_v^{3,3913}$. La constante B est donc 3,391 et A le $\log_{10}(0,0191) = -1,72$

La constante C

Le paramètre C représente l'effet que le confinement de l'éprouvette a sur la pente $\dot{\epsilon}$ durant un essai de déformation permanente. Lors du calcul de C, la fréquence est fixée à 10 hertz et la température à 30°C . La Figure AVII.2 présente la relation entre la pente $\dot{\epsilon}$ et

la contrainte verticale appliquée durant l'essai pour trois pressions de confinement différent.

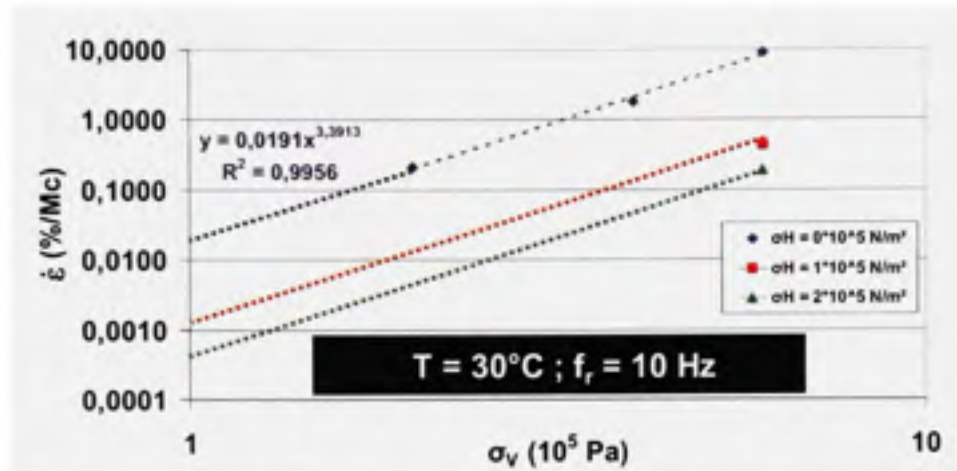
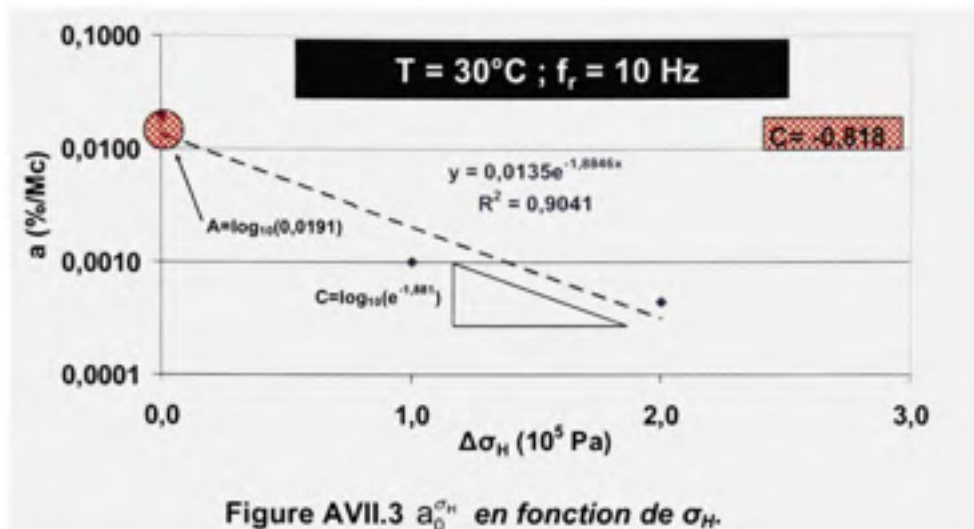


Figure AVII.2 Pente de la déformation $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_v pour trois σ_H différents.

Par manque d'essai réalisé pour plusieurs σ_v à différent σ_H , le paramètre b de la relation pour $\dot{\epsilon} = a \sigma_v^b$ sera présumé constant peu importe le confinement latéral utilisé pour les essais. D'ailleurs, Aussedat conclut cela tel que présenté dans la loi d'ESSO. Or, pour obtenir le facteur de translation pour $\Delta \sigma_H$, la constante a est calculée pour le couple ($\sigma_v = 6 \cdot 10^5$ Pa ; $\dot{\epsilon} = 0,438$) lorsque $\sigma_H = 1 \cdot 10^5$ Pa ainsi que le couple ($\sigma_v = 6 \cdot 10^5$ Pa ; $\dot{\epsilon} = 0,193$) pour $\sigma_H = 2 \cdot 10^5$ Pa. La valeur a est 0,0010 pour $\sigma_H = 1 \cdot 10^5$ Pa tandis que la valeur de a est 0,0004 pour $\sigma_H = 1 \cdot 10^5$ Pa.

Maintenant, on veut savoir le taux de variation en fonction de σ_H . Pour ce faire, on trace la relation a en fonction de σ_H . La Figure AVII.3 montre la relation en les valeurs de a de la loi de puissance correspondant à chacun des σ_H .



Cette relation peut être approchée par la loi exponentielle $a = 0,0135 * e^{-1,885\sigma_H}$ et la constante C est égale à $\log e^{-1,885}$, soit -0,818. La loi ESSO à jour en tenant compte des constantes A, B et C s'écrit alors :

$$\log \dot{\epsilon} = -1,690 + 2,929 \log \sigma_V - 0,818 \sigma_H$$

La constante D

Lors du calcul de la constante D, la pression de confinement est fixée à $0 \cdot 10^5$ Pa et la fréquence à 10 hertz. Cependant, afin de vérifier que la température a une influence similaire à différentes fréquences, le cheminement de calcul de la constante D réalisé à 10 Hz fut répété pour les fréquences 1 et 5 hertz.

Fréquence fixée à 10 hertz

Pour la fréquence 10 hertz et sans pression de confinement latéral, la Figure AVII.4 présente l'évolution de la pente $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_V pour les températures 30, 40 et 50°C.

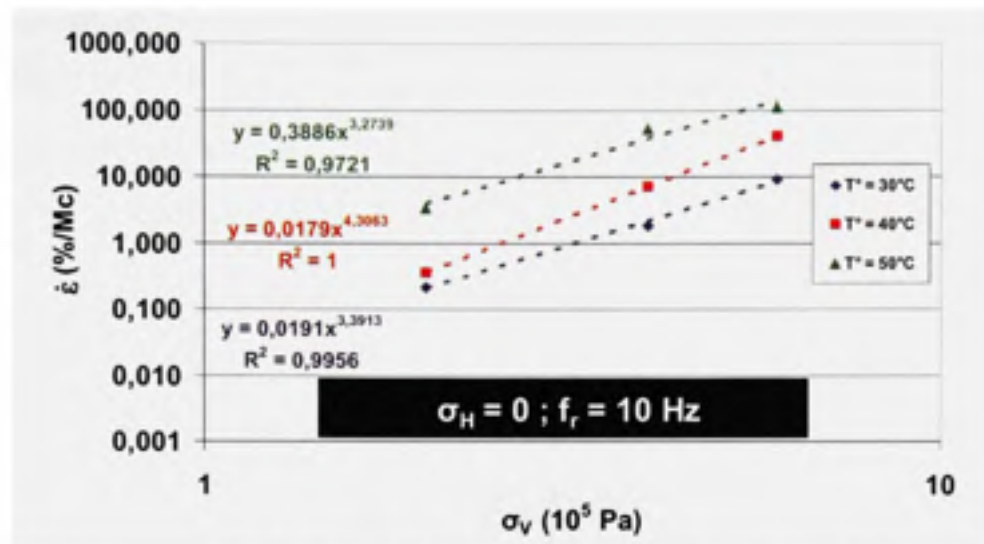


Figure AVII.4 Pente de la déformation $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_V pour trois températures différentes ($\sigma_H = 0$; $f_r = 10$ Hz).

À partir des valeurs a de chaque delta de température, la relation a et ΔT est tracée à la Figure AVII.5. Rappelons que la température de référence est 30°C. Alors, les ΔT correspondent à 0,10 et 20°C pour les températures 30,40 et 50°C.

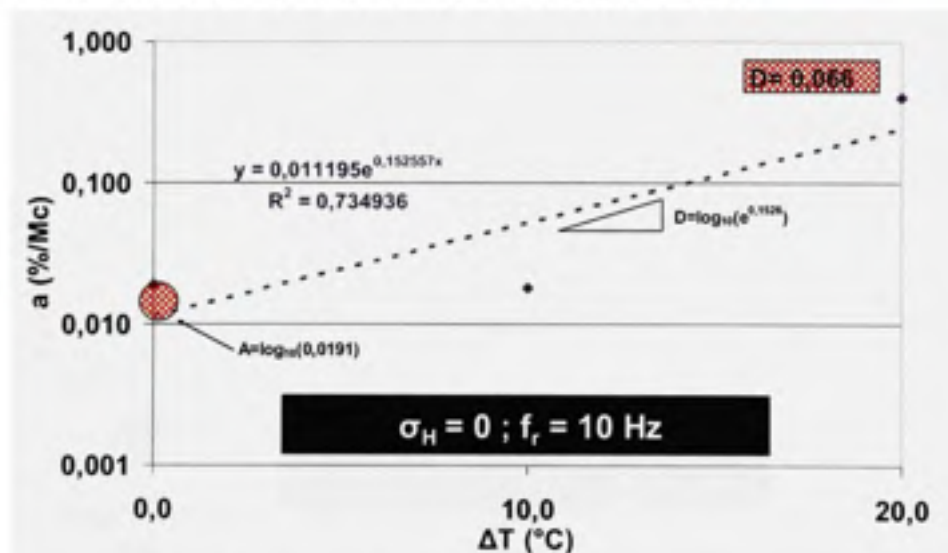


Figure AVII.5 $a_0^{\Delta T}$ en fonction de ΔT .

La constante D pour la fréquences 10 hertz est égale à $\log_{10}(e^{0,1526}) = 0,066$.

Fréquence fixée à 5 hertz

Pour les essais réalisés à 5 hertz et sans confinement, la Figure AVII.6 présente l'évolution de la pente $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_v pour les températures 30, 40 et 50°C.

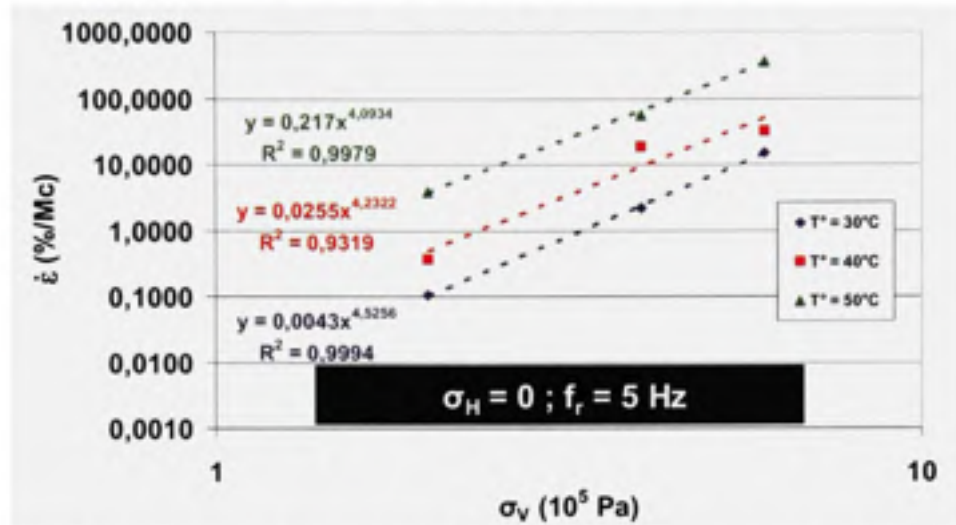


Figure AVII.6 Pente de la déformation $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_v pour trois températures différentes.

Dès trois lois de puissance ci-dessus, la relation a et ΔT peut être réalisée. Elle est présentée à la Figure AVII.7.

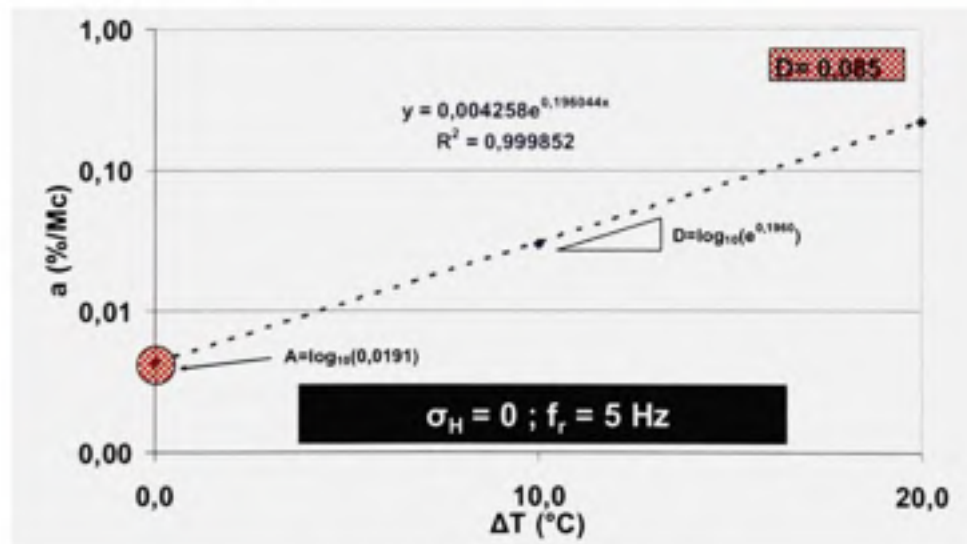


Figure AVII.7 $a_0^{\Delta T}$ en fonction de ΔT .

Pour la fréquence 5 hertz, la constante D est 0,085 ($\log_{10}(e^{0,1960})$)

Fréquence fixée à 1 hertz

La troisième et dernière fréquence à laquelle on veut vérifier l'influence de la température est 1 hertz. La Figure AVII.8 présente l'évolution de la pente $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_v pour les températures 30, 40 et 50°C.

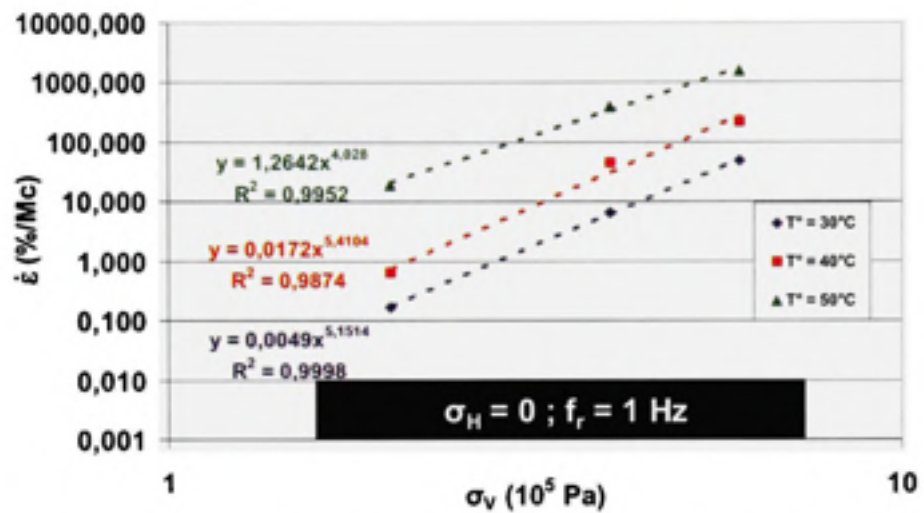


Figure AVII.8 Pente de la déformation $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_v pour trois températures différentes.

Comme pour les autres fréquences, la relation a versus ΔT est présenté à la Figure AVII.9.

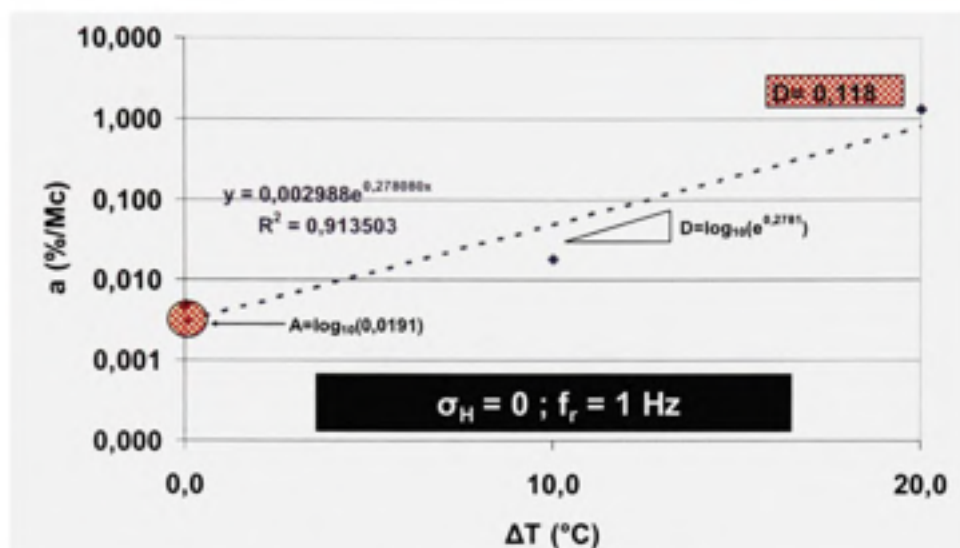


Figure AVII.9 $a_0^{\Delta T}$ en fonction de ΔT .

La constante D peut être calculé à partir de la loi exponentielle de la figure ci-dessus.
 $D = \log_{10}(e^{0,2781}) = 0,118$.

La constante F

Le calcul de la constante F est réalisé à la température 30°C et sans pression de confinement. Comme pour la paramètre D, de manière à connaître l'évolution de F en fonction de la température, la constante F a été calculée pour les températures 30, 40 et 50°C.

Température fixée à 30°C

La Figure AVII.10 montre la relation $\dot{\epsilon}$ et σ_V pour $T=30^\circ\text{C}$ et $\sigma_H = 0 \cdot 10^5$ pa.

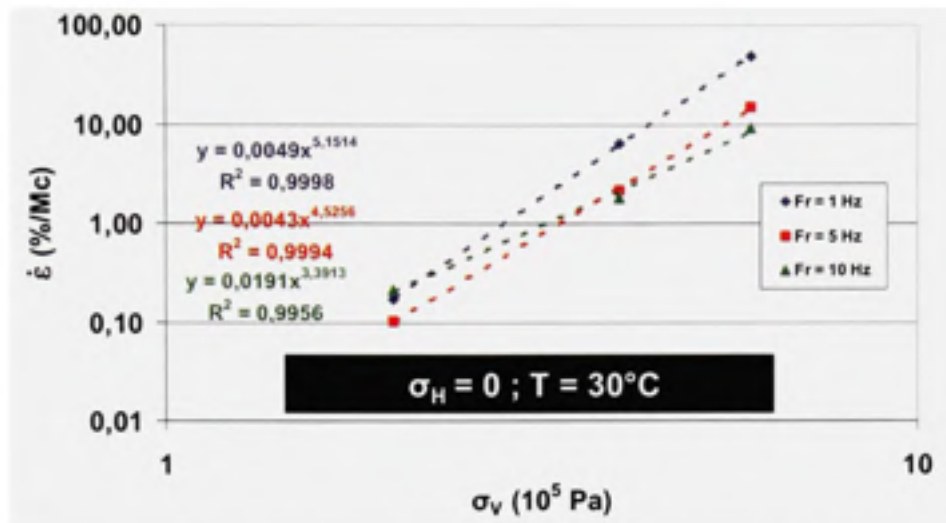


Figure AVII.10 Pente de la déformation $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_v pour trois fréquences différentes.

La variation en fonction de la fréquence est mesurée à l'aide des a de chaque fréquence. La Figure AVII.11 montre la relation de a versus la fréquence.

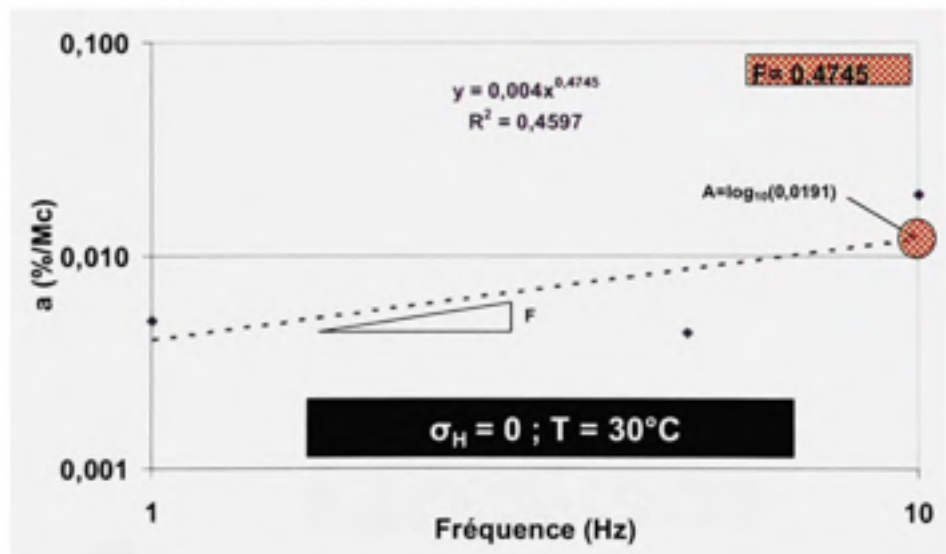


Figure AVII.11 a_0^f en fonction de f_r .

La pente F est tirée directement du paramètre B de la loi de puissance approchée. Alors F est égale à 0,474.

Température fixée à 40°C

Pour la température 40°C et toujours sans confinement, la Figure AVII.12 illustre la relation $\dot{\epsilon}$ et σ_v pour les trois fréquences testées.

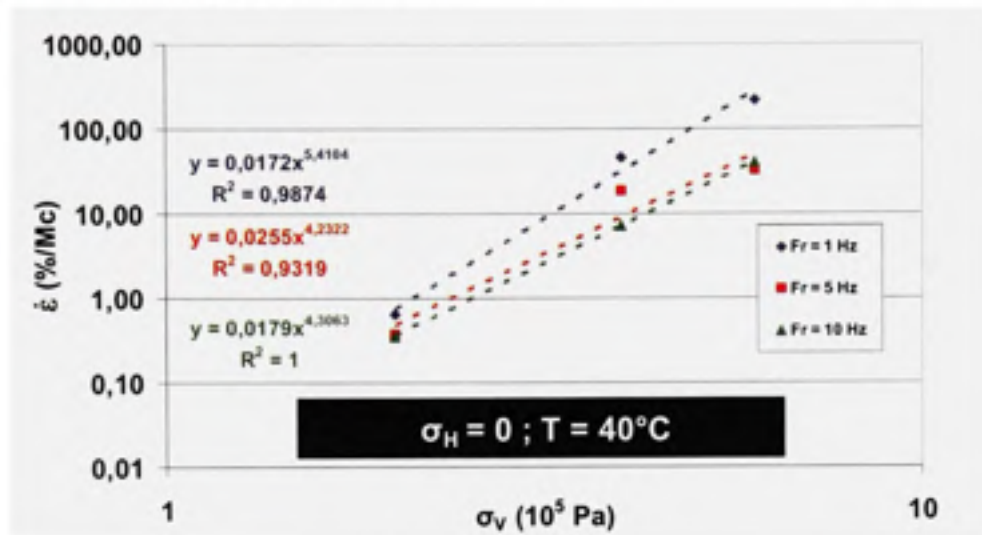


Figure AVII.12 Pente de la déformation $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_v pour trois fréquences différentes.

La corrélation de a en fonction de la fréquence est reportée à la Figure AVII.13.

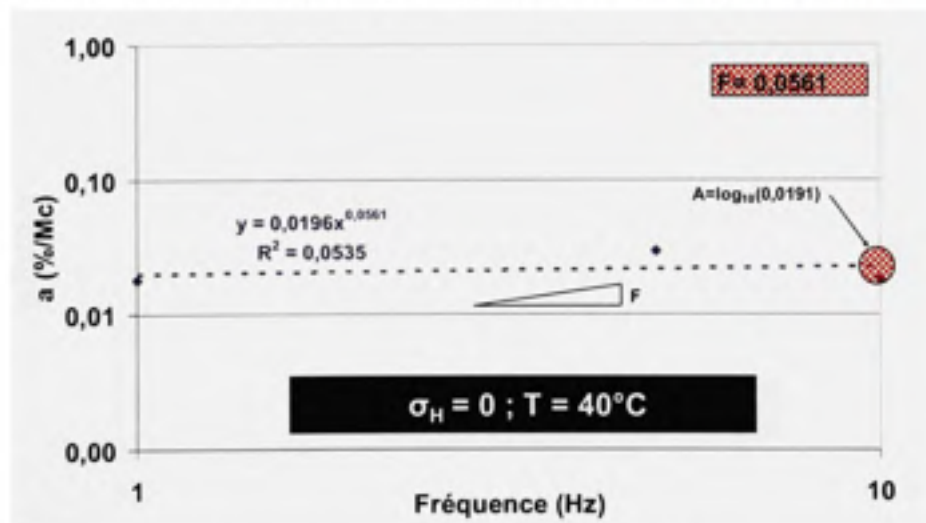


Figure AVII.13 a_0^f en fonction de f_r .

De l'approximation par la loi de puissance, la constante F est 0,0561.

Température fixée à 50°C

À la troisième et dernière température, la même relation est tracée entre $\dot{\epsilon}$ et σ_V . Elle est présentée à la Figure AVII.14.

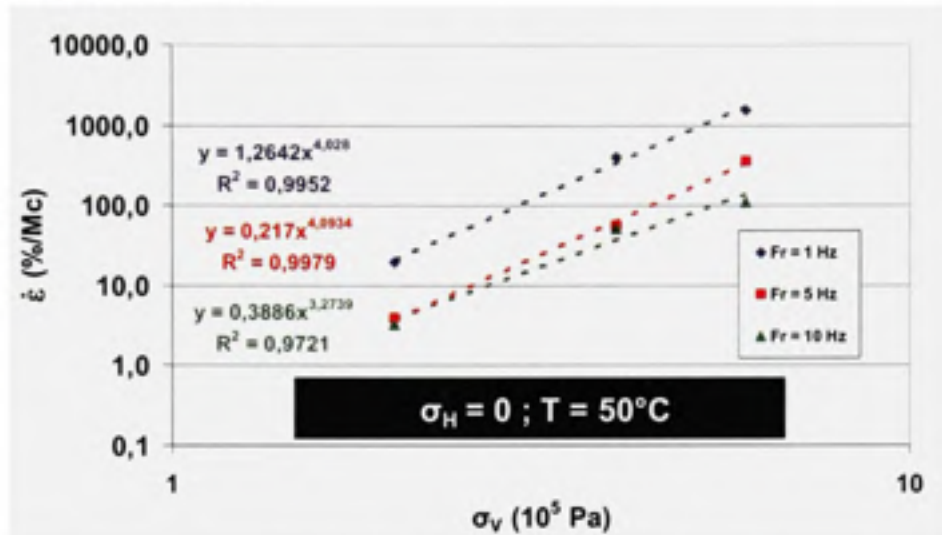


Figure AVII.14 Pente de la déformation $\dot{\epsilon}$ en fonction de σ_V pour trois fréquences différentes.

À partir des résultats ci-dessus, a est tracé en fonction de f_r à la Figure AVII.15.

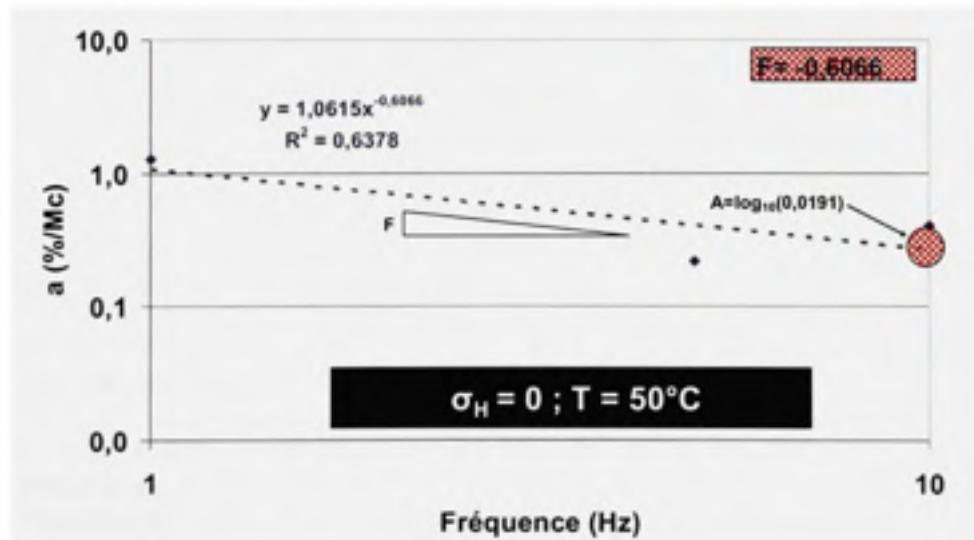


Figure AVII.15 a_0^f en fonction de f_r .

La constante F pour la température 50°C est -0,607

BIBLIOGRAPHIE

- Ali, H. A. and S. D. Tayabji (1998). "Evaluation of mechanistic-empirical performance prediction models for flexible pavements." *Transportation Research Record*(1629): 169-180.
- Ali, H. A., S. D. Tayabji, et al. (1998). "Calibration of mechanistic-empirical rutting model for in-service pavements." *Transportation Research Record*(1629): 159-168.
- Al-Suleiman, T. I., M. Taleb Obaidat, et al. (2000). "Field inspection and laboratory testing of highway pavement rutting." *Canadian Journal of Civil Engineering* 27: 1109-1119.
- Archilla, A. R. and S. Madanat (2000). "Development of a pavement rutting model from experimental data." *Journal of Transportation Engineering* 126(4): 291-299.
- Archilla, A. R. and S. Madanat (2001). "Estimation of rutting models by combining data from different sources." *Journal of Transportation Engineering* 127(5): 379-389.
- Archilla, A. R. and S. Madanat (2001). "Statistical model of pavement rutting in asphalt concrete mixes." *Transportation Research Record*(1764): 70-77.
- Aschenbrener, T. (1994). "Comparison of results obtained from the LCPC rutting tester with pavements of known field performance." *Transportation Research Record*(1454): 66-73.
- Aussedat, G. (1977). "L'essai de fluage dynamique dans la formulation des enrobés et le dimensionnement des chaussées." *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées Décembre Spécial V*: 139-151.
- Balba, R. (2006). "Évaluation en laboratoire des différents systèmes anti-remontés de fissures pour le resurfaçage des chaussées souples" Montréal, École de Technologie Supérieure (Canada), 2006, 274 pages.
- Baldwin, G., (2005). "Trop de camion sur les routes ?" Document analytique Mai No. 11-621_MIF2005028 10 p.
- Barksdale, R.D. (1972). "Laboratory evaluation of rutting in base course materials." *Proceeding 3rd International Conference on Structure Design of Asphalt Pavements*, University of Michigan, 161-174.
- Bilodeau, K (2008). "Étude de variabilité des propriétés des enrobés bitumineux", projet synthèse, Montréal, École de Technologie Supérieure (Canada), LUCREB, 38 pages.

- Brosseaud, Y. and R. Hiernaux (1998). "Étude de sensibilité aux déformations permanentes de bétons bitumineux européens et japonais par l'ornièr LPC."
- Brown, S. F. (1977). "Essais triaxiaux sur enrobés bitumineux en chargement répété ou en fluage." Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées Décembre Spécial V: 125-138.
- Chen, J.-S., C.-H. Lin, et al. (2004). "Development of a mechanistic-empirical model to characterize rutting in flexible pavements." Journal of Transportation Engineering 130(4): 519-525.
- Collop, A. C., D. Cebon, et al. (1995). "Viscoelastic approach to rutting in flexible pavements." Journal of Transportation Engineering 121(1): 82-93.
- Corté, J.-F., Di Benedetto, H. (2005). "Matériaux bitumineux routiers 1, Description et propriétés des constituants" Éditions Lavoisier, Hermes Science, Paris, 234 pages.
- Di Benedetto, H., Corté, J.-F. (2005). "Matériaux bitumineux routiers 2, Constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges" Éditions Lavoisier, Hermes Science, Paris. 283 pages.
- FHWA (2005). "FHWA report" Site internet consulté le 16 juin 2008, <http://www.gomdot.com/Divisions/Highways/Resources/pdf/Research/Reports/InterimFinal/SS167.pdf>.
- Gouvernement du Québec (2007). "Orientation ministérielle sur le choix des types de chaussées" Site internet consulté le 27 juin 2008, http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/entreprises/zone_fournisseurs/reseau_routier/chaussee/orientation_ministerielle_choix_types_chaussees.
- Hornych P., Corté J. F., Pauté J. L. (1993). "Étude des déformations permanentes sous chargements répétés de trois graves non traitées", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 1993, No. 184, pp. 45-55.
- Huang, Y.H. (2004). "Pavement analysis and design", Second edition, Pearson Education Inc, Pearson Prentice Hall, NJ, USA, 318-333.
- Kenis, W.J. (1977). "Predictive design procedures, VESYS users manual."; Report No. FHWA-RD-77-154, Federal Highway Administration, McLean, Va.
- Lekarp, F. and Dawson, A. (1997). "Analysis of permanent deformation behaviour of unbound granular material." International Symposium on Thin Pavement, Surface Treatment, Unbound roads, Fredericton, New Brunswick, Canada, pages 91-99.

- Lin, C.-H. and W.-C. Chen (2005). "Developing a four-layer system rutting model in highway." *Journal of the Chinese Institute of Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers, Series A/Chung-kuo Kung Ch'eng Hsueh K'an* 28(2): 371-374.
- Lytton, R. L., et al. (1993). "Development and Validation of Performance Prediction Models and Specifications for Asphalt Binders and Paving Mixes". The Strategic Highway Research Program, SHRP-A-357, National Research Council, DC.
- Majidzadeh et coll.(1980). "Evaluation of permanent deformation in asphalt concrete pavements." *Transp. Res. Rec. TRB*, 715 pp 21-31, 1980.
- Meunier (2005). "Contribution à la mise au point des critères de formulation pour les enrobés SMA adaptés à la formulation du laboratoire des chaussées du ministère des Transports du Québec", Montréal, École de Technologie Supérieure (Canada), 2005, 254 pages.
- Monismith, C.L., Ogawa, N. et Freeme, C.R. (1975). "Permanent deformation characterization of subgrade soils due to repeated loading". *Transportation Research Record (537)*, Transportation Research Board, Washington D.C.; 1-17.
- MTQ, (2005). "Budget, Fonds de conservation et d'amélioration du réseau routier : Investissements routiers 2006-2007" Site internet consulté le 10 novembre 2005, <http://www1.mtq.gouv.qc.ca/fr/ministere/investissements.asp>
- MTQ, (2006). "Chaussée, Les chaussées et le climat québécois" Site internet consulté le 1 mai 2006, <http://www1.mtq.gouv.qc.ca/fr/reseau/chaussee/chaussee.asp>.
- SHENTON M.J. (1974). "Deformation of railway ballast under repeated loading (triaxial test) ", Rapport RP 5, British, Railways Research Departement.
- SAAQ (2005-1). Société de l'assurance automobile du Québec, "2004 en bref, Profil statistiques", 2005, 48 pages.
- SAAQ (2005-2). Société de l'assurance automobile du Québec, *Bilan 2004*, "Accidents, parc automobile, permis de conduire", ISBN 2-550-44186-9, mai 2005, 209 pages.
- SWEERE G.T.H.(1990). *Unbound granular bases for roads*, Thèse de doctorat, Université de Delft, 1990, 431 pages.
- Tseng, K.H., Lytton, R.L. (1989). "Prediction of permanent deformation in flexible pavement materials, in implication of aggregate in the design, construction, and performance of flexible pavements", STP 106, Éditions H.G. Schreuders et C.R. Marek, ASTM, Philadelphia, 154-172.

- Witczak, M. W., K. Kaloush, et al. (2002). Simple performance test for superpave mix design. NCGRP Report. N. C. H. R. Program. Washington D.C.: 105.
- Zhou, F., Scullion, T., Sun, L. (2004). "Verification and modeling of three-stage permanent deformation behaviour of asphalt mixes", *Journal of Transportation Engineering*, American Society of Civil Engineers, Reston, United States, vol 130, issue 4, 486-494.