

CHAPITRE 5

SYNTHÈSE ET ANALYSE DES RÉSULTATS

À partir de l'ensemble des résultats présentés dans le Chapitre 4, l'analyse de ces résultats sera présentée suivant quatre sections distinctes. Dans un premier temps, nous observerons la relation entre l'amplitude de la force horizontale en fonction du nombre de cycles verticaux. Dans un deuxième temps, nous analyserons l'influence du type de substrat utilisé en cours d'essai sur les résultats de la remontée des fissures. Ensuite, nous étudierons l'influence de l'épaisseur sur les résultats d'essai et finalement nous comparerons les performances des trois systèmes de resurfaçage soumises aux essais à $+5^{\circ}\text{C}$ et -5°C , tenant compte de la rigidité globale de chaque système.

Dans la perspective d'élaborer une analyse la plus complète possible et de pouvoir éventuellement comparer les résultats des essais avec certaines données de la littérature, il convient de bien préciser les paramètres de sollicitation relatifs aux conditions d'essai auxquelles les différentes éprouvettes testées ont été soumises. Deux paramètres de sollicitation vont s'avérer particulièrement déterminants :

- 1) La déformation horizontale maximale imposée, ϵ_{\max}
- 2) La vitesse moyenne à laquelle cette déformation est imposée au système, $\overline{\dot{\epsilon}}_{\max}$

Par ailleurs, il serait intéressant de comparer l'ensemble des résultats obtenus pour chacun des domaines de température étudiés sur une même base de comparaison. À cet effet, nous proposons de mettre en application le principe d'équivalence temps-température (PETT) pour déterminer un facteur de translation, a_T , permettant la transposition des résultats d'un domaine de température donnée vers un autre domaine ciblé.

5.1 Facteur de translation, a_T , permettant de transposer les résultats d'un domaine de température à un autre

Dans le but de transposer les résultats obtenus à $+5^\circ\text{C}$ dans le domaine de $T_{\text{REF}} = -5^\circ\text{C}$, on peut en première approximation se référer au principe d'équivalence temps-température (PETT). Le PETT permet, sur la base des propriétés intrinsèques des matériaux bitumineux, de calculer une fréquence de sollicitation équivalente, pour laquelle la réponse de l'enrobé à une sollicitation donnée demeure la même pour un autre domaine de température. En effet, on observe, pour un enrobé testé suivant un couple de sollicitation donné (fréquence-température : f_1-T_1), une réponse équivalente lorsqu'on le sollicite dans un autre domaine de température de référence pourvu que l'on ajuste la fréquence de sollicitation ($a_T \cdot f_1 - T_{\text{REF}}$).

La figure 62 montre de façon explicite le principe d'équivalence temps-température à partir des résultats de la mesure des modules complexes de l'enrobé ESG-10 établie en petites déformations ($\epsilon_o < 100 \mu\text{strain}$). Notons que le PETT est valable pour les essais conduits en petites déformations, soit lorsque l'enrobé présente un comportement viscoélastique linéaire. Toutefois, l'équipe de recherche de l'ÉNTPE de Lyon a récemment mis en relief l'applicabilité potentielle du PETT pour des essais à grandes déformations (essais d'orniérage en conditions homogènes). De surcroît, les premiers résultats de leurs essais portent à croire que les facteurs de translation (valeurs d' a_T) demeurent les mêmes que ceux établis en petites déformations (Di Benedetto, 2005).

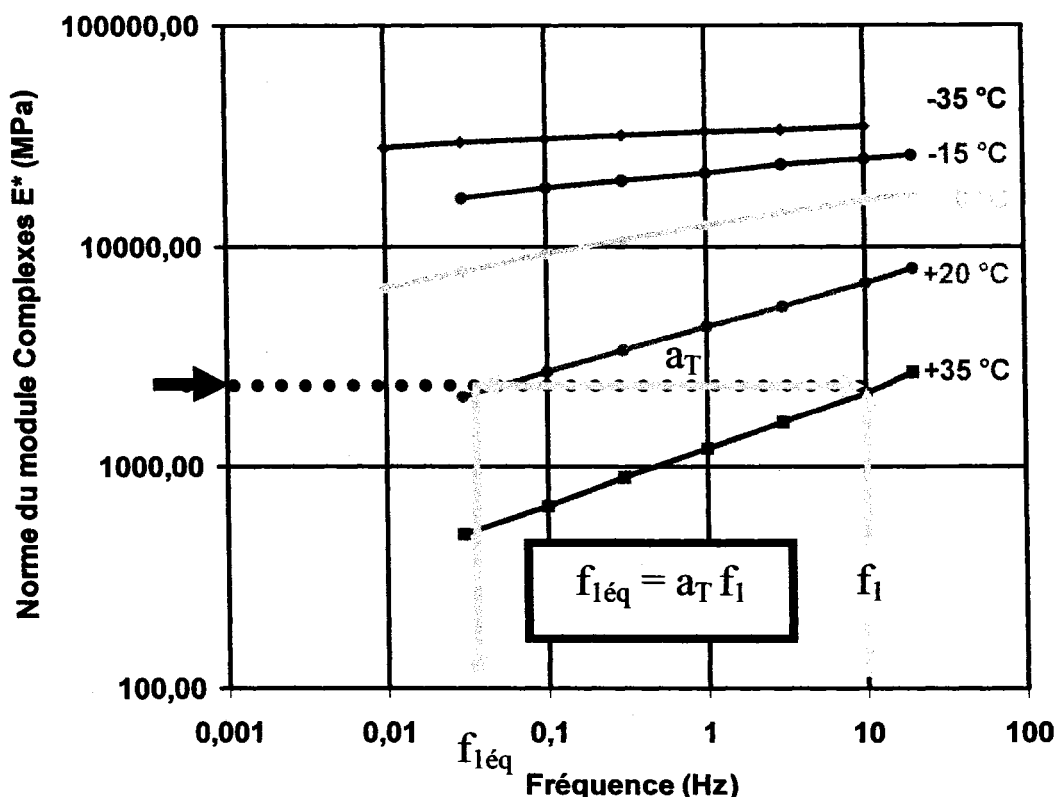


Figure 62 Relation entre la norme du module complexe et la fréquence de sollicitation (le temps de sollicitation), établie en petites déformations pour l'enrobé ESG-10, permettant d'illustrer le principe d'équivalence temps-température (PETT)

Le calcul de la fréquence équivalente se fait à partir de facteurs de translation, a_T , établis expérimentalement. Les facteurs a_T sont inférieurs à l'unité lorsqu'on veut transposer les résultats d'un domaine de température plus élevé à la température de référence (T_{REF}) alors qu'ils sont supérieurs à l'unité dans le cas de la transposition des résultats d'un domaine de plus basse température vers le domaine de référence (T_{REF}). Les facteurs de translation pour l'enrobé ESG-10 et CH-10, ont été déterminés à partir de la mesure des modules complexes dans le cadre d'un autre projet de recherche (Pierre P. et coll, 2005) et sont présentés dans le Tableau XVII.

Pour connaître la valeur d' a_T à appliquer dans le cas des essais de simulation de la remontée des fissures, on se réfère aux relations suivantes :

$$\tau(T) = e^{a+bT+cT^2} \quad \text{avec} \quad \tau(T) = \tau_0 a_T,$$

où, τ_0 correspond au temps de relaxation du matériau à la température de référence.

À partir des valeurs des paramètres a,b et c déterminées pour l'enrobé ESG-10 (Tableau XVII), on estime que la valeur d' a_T correspondante, pour transposer les valeurs de $T = +5^\circ\text{C}$ à la température de référence, en l'occurrence fixée à -5°C ($T_{\text{REF}} = -5^\circ\text{C}$), est égale à 0,0176. En appliquant directement ce facteur de translation aux fréquences de sollicitation des essais réalisés à $+5^\circ\text{C}$, on en déduit alors la fréquence équivalente qu'il convient d'associer aux réponses de ces essais au domaine de température de référence (ici $T_{\text{REF}} = -5^\circ\text{C}$).

Comme nous l'avons indiqué au Tableau V, la fréquence de sollicitation horizontale est constante pour les deux températures d'essai et correspond à une valeur de $3,2 \times 10^{-4}$ Hz. En appliquant le facteur de translation établi précédemment, la fréquence de sollicitation équivalente à -5°C pour les essais conduits à $+5^\circ\text{C}$ est de $5,6 \times 10^{-6}$ Hz, donc nettement plus faible que celle appliquée pour les essais conduits à -5°C . De la même façon, pour le mouvement vertical, la fréquence de sollicitation imposée pour les deux températures d'essais a été fixée à 1 Hz. En conséquence, la fréquence de sollicitation équivalente à -5°C pour les essais conduits à $+5^\circ\text{C}$ est d'environ 0,02 Hz.

5.2 Déformation horizontale maximale imposée, ϵ_{max}

Certes la fréquence et la vitesse auxquelles on impose une déformation à un enrobé influencent la performance de ce dernier: une vitesse lente lui permet de «s'adapter» (caractère visqueux des matériaux bitumineux) de sorte que le processus d'endommagement sera différent de celui associé à une vitesse de sollicitation plus

rapide. Par ailleurs, dans le cas d'une sollicitation cyclique, la déformation maximale imposée va représenter un paramètre déterminant quant à la performance escomptée puisque tout matériau présente une limite admissible de déformation avant rupture. Notamment dans le cas d'essais cycliques, tels que les essais de fatigue, il est admis que la durée de vie d'une éprouvette sera d'autant plus courte que l'amplitude de déformation imposée, de façon répétitive, sera élevée. À ce titre, des amplitudes de déformation de l'ordre de 80 à 100 μ déformation (μ strain), imposées à une fréquence de 10 Hz (condition usuelle pour les essais de fatigue) conduisent à des durées de vie de l'ordre du million de cycles (Pierre P et coll., 2005).

Dans le processus de la remontée des fissures, on peut admettre que l'intensité des efforts de traction induits au niveau de l'interface, dans la zone à proximité de l'entaille, va gouverner essentiellement la durée de vie du resurfaçage quant au phénomène de la remontée de la fissure. Dans ce contexte l'exercice visant à calculer le degré de déformation du matériau et la vitesse à laquelle elle est imposée, sera conduit par rapport aux données relatives à l'interface seulement. Comme souligné précédemment, pour chacun des essais, un capteur de déplacement (un extensomètre) a été placé au niveau de l'interface pour mesurer en continu le degré de sollicitation.

Pour calculer les déformations correspondantes aux déplacements mesurés, il faut connaître avec précision la longueur référentielle de mesure ($\varepsilon = \Delta L/L$ avec ΔL donné par l'extensomètre à l'interface). La valeur de L à prendre en considération est difficile à établir. Bien que la longueur physique correspondante à l'espacement des repères collés à la surface de l'éprouvette pour permettre de fixer l'extensomètre soit connue, $L = 55\text{mm}$, cette longueur couvre plusieurs zones pour lesquelles les conditions limites sont variables. La Figure 63 illustre la situation.

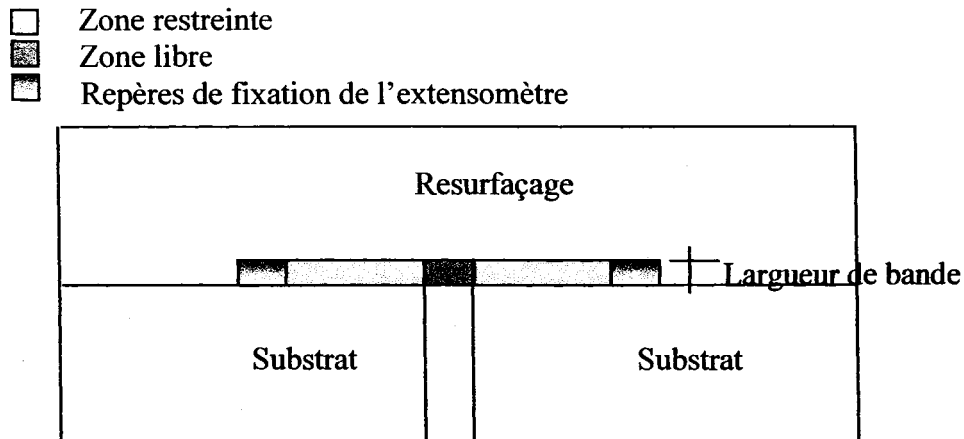


Figure 63 Croquis illustrant les différentes zones existantes entre les repères de fixation de l'extensomètre

D'autre part, il est important de souligner ici que la largeur de la bande de mesure n'est pas négligeable et qu'elle n'intègre pas uniquement les déformations de l'interface. Finalement, il ne faut pas oublier que le positionnement des repères est ponctué d'une certaine incertitude : il conviendra ultimement de définir une méthode plus rigoureuse quant au positionnement de ces repères.

En définitive pour calculer la déformation horizontale maximale imposée, deux cas de figures s'imposent en faisant l'hypothèse que:

- le déplacement horizontal mesuré à l'interface est représentatif du cumul d'une déformation uniforme sur l'ensemble de la zone de mesure délimitée par la position des 2 repères de fixation : $L = 55\text{mm}$, ε_{\max}^a
- le déplacement horizontal mesuré à l'interface est uniquement réparti sur la zone libre, au droit de l'entaille : $L = 5\text{mm}$, ε_{\max}^b

Dans ces conditions, le calcul de la déformation horizontale maximale imposée se fait en référence aux déplacements maximaux mesurés à l'interface pour chacune des

épreuves testées. Ces déplacements sont donnés aux Tableaux XXI et XXII et les valeurs des déformations maximales imposées correspondantes ont été calculées.

Le tableau XXIII présente la synthèse des résultats des essais de remontée des fissures pour le groupe d'éprouvettes dont l'épaisseur de resurfaçage en enrobé ESG-10 est égal à 55mm.

Tableau XXIII

Synthèse des résultats des essais de simulation de la remontée des fissures pour le groupe d'éprouvettes dont l'épaisseur de resurfaçage (ESG-10) est égale à 55mm

			ΔH	f_r	ϵ_{max}^a	ϵ_{max}^b	$\overline{\epsilon}_{max}$	a_T	f_r^{equiv}	$\overline{\epsilon}_{max}^{equiv}$	N_f	F_H
			(μm)	(Hz)	($\mu strain$)	($\mu strain$)	($\mu strain/h$)		(Hz)	($\mu strain/h$)	(cycles)	(N)
-5°C	EB-14	REF-Labo	72	320	1309	14400	3020	1	320	3016	35000	4890
		Chape	110	320	2000	22000	4615	1	320	4608	180000	4160
		SAMI	30	320	545	5995	1258	1	320	1256	320000	1356
	EB-10S	REF-InSitu	66	320	1200	13200	2769	1	320	2765	32500	4382
+5°C	EB-14	REF-Labo	78	320	1418	15598	3272	0,018	6	58	25000	4080
		Chape	279	320	5072	55792	11705	0,018	6	206	22000	6357
		SAMI	147	320	2673	29403	6169	0,018	6	108	178000	2810
	EB-10S	REF-InSitu	304	320	5527	60797	12755	0,018	6	224	4000	7755

- (a) ϵ_{max} est calculé en présumant que le déplacement horizontal à l'interface est uniformément réparti entre les repères de mesure : espacement entre les repères = 55mm
- (b) ϵ_{max} est calculé en présumant que le déplacement horizontal à l'interface est uniquement réparti au droit de la fissure : ouverture de la fissure = 5mm

5.3 Vitesse moyenne de la déformation horizontale maximale imposée, $\overline{\mathcal{E}}_{\max}$

À partir du moment où la valeur de \mathcal{E}_{\max} est connue, le calcul de la vitesse va dépendre directement de la fréquence de sollicitation imposée. Cependant, la vitesse de sollicitation varie en cours d'essai du fait que le déplacement est imposé suivant un profil sinusoïdal (courbe en rouge de la Figure 64). Pour avoir une idée de l'ordre de grandeur de la vitesse de déformation imposée pour chacun des essais, il est proposé de calculer une vitesse moyenne par la linéarisation du profil du déplacement imposé (courbe en bleu de la Figure 64). En conséquence, la vitesse de déformation horizontale maximale imposée est déterminée en faisant l'hypothèse que la déformation maximale est imposée progressivement de façon linéaire pour une période de sollicitation fixe de 3120 sec., soit :

$$\overline{\mathcal{E}}_{\max} (\mu\text{strain/h}) = \frac{2 \mathcal{E}_{\max} (\mu\text{strain})}{T_c (\text{h})} = \frac{2 \cdot 3600 \mathcal{E}_{\max} (\mu\text{strain})}{T_c (\text{sec})} = 7200 f_r (\text{Hz}) \mathcal{E}_{\max} (\mu\text{strain})$$

À partir de la relation précédente, on pourra également transposer la vitesse de sollicitation des essais réalisés à +5°C au domaine de T_{REF} (-5°C) en calculant une vitesse équivalente de déformation, soit :

$$\overline{\mathcal{E}}_{\max} (\mu\text{strain/h}) = 7200 f_r a_T \mathcal{E}_{\max} (\mu\text{strain})$$

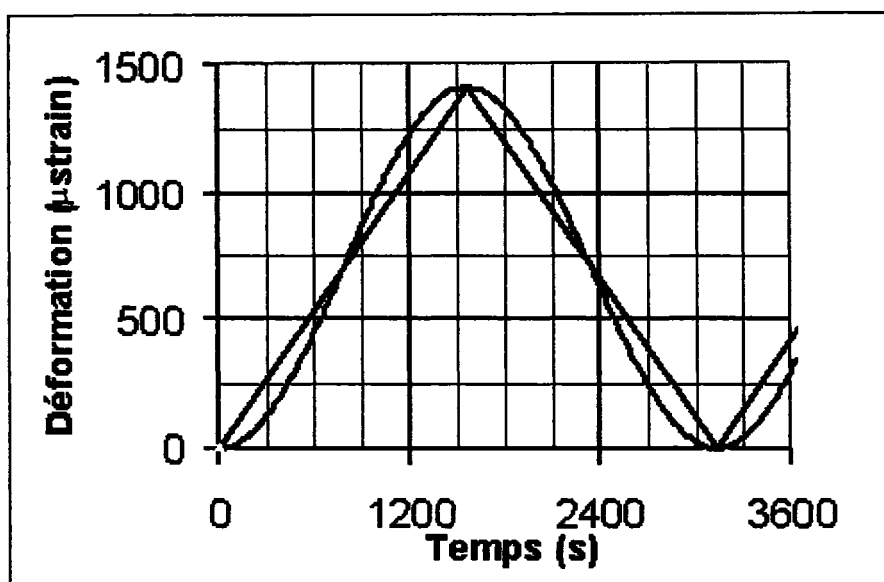


Figure 64 Évolution de déplacement horizontal imposé en cours d'essai

5.4 Analyse des résultats pour les deux températures mises à l'essai

À partir de l'ensemble des résultats présentés aux Tableaux XXI et XXII, nous pouvons mettre en relief la performance des différents systèmes testés vis-à-vis de la remontée des fissures en cherchant à regrouper les résultats sur une même base de référence, en l'occurrence $T_{REF} = -5^{\circ}\text{C}$. Pour cet exercice visant à mettre en commun l'ensemble des résultats, nous nous limiterons au traitement des résultats associés aux éprouvettes dont l'épaisseur du resurfaçage était de l'ordre de 55mm. En effet, compte tenu du mode de rupture observé pour ce groupe d'éprouvettes, on peut admettre que leur durée de vie se rapporte essentiellement au phénomène de la remontée des fissures (rupture en mode B – voir Tableaux XXI et XXII). Par contre, il est clair que la durée de vie mesurée pour le groupe d'éprouvettes de forte épaisseur (100mm) était plutôt tributaire de la qualité de la compaction en bas de couche que de leur performance vis-à-vis de la remontée des fissures proprement dite (rupture suivant un plan parallèle à l'interface substrat-

resurfaçage : rupture en mode C). Ce dernier aspect sera traité plus en détail à la section §5.8.

La Figure 65 présente la relation entre la durée de vie et la fréquence de sollicitation équivalente en référence à la température de référence, T_{REF} , pour l'ensemble des résultats des éprouvettes ayant une épaisseur de resurfaçage de 55mm. Pour chacun des points, la valeur de la vitesse de déformation correspondante est indiquée. Il est difficile de porter une appréciation éclairée sur l'ensemble des résultats puisque d'une part la vitesse de déformation varie d'un essai à l'autre et, d'autre part, la déformation maximale imposée diffère également d'un essai à l'autre (voir Tableau XXIII – $\bar{\epsilon}_{max}$). Cette dernière est relativement critique dans le cadre des essais réalisés puisque les déformations maximales imposées sont importantes, soit de l'ordre de grandeur des limites des déformations admissibles à la rupture d'un enrobé type soumis à des efforts de traction. À cet effet, la Figure 66 présente la relation contrainte-déformation établie en traction directe sur éprouvettes cylindriques ($\phi 80 \times 120 \text{ mm}^2$) pour diverses températures et vitesses de sollicitation pour un enrobé bitumineux confectionné à partir d'un bitume standard d'indice de pénétration 50-70. À titre d'indication, une vitesse de déformation de $300 \times 10^{-6} \text{ m/m/h}$ ($300 \mu\text{stain/h}$) correspond environ à la vitesse de sollicitation en jeu lors de l'essai de retrait thermique empêché (TSRST) alors que la vitesse de déformation de $45\,000 \times 10^{-6} \text{ m/m/h}$ ($45\,000 \mu\text{stain/h}$) s'apparente plutôt à la vitesse de chargement lorsque l'on évalue la performance d'un bitume pur à basse température (mesure de la déformation à la rupture traction directe).

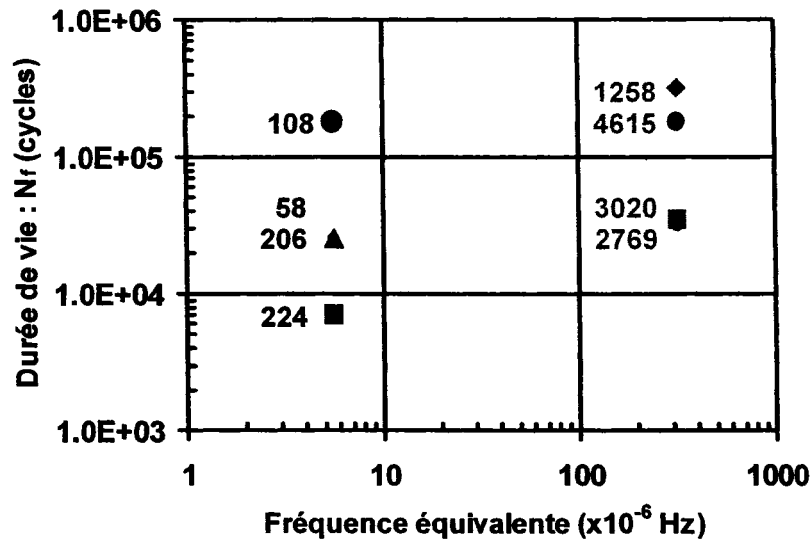


Figure 65 Relation entre la durée de vie, N_f , et la fréquence équivalente de sollicitation pour l'ensemble des éprouvettes ayant une épaisseur de resurfaçage de 55mm en référence à une température de -5°C ($\epsilon_{r\text{ReSurf}} = 55\text{mm}$; $\text{ReSurf} = \text{ESG-10}$)

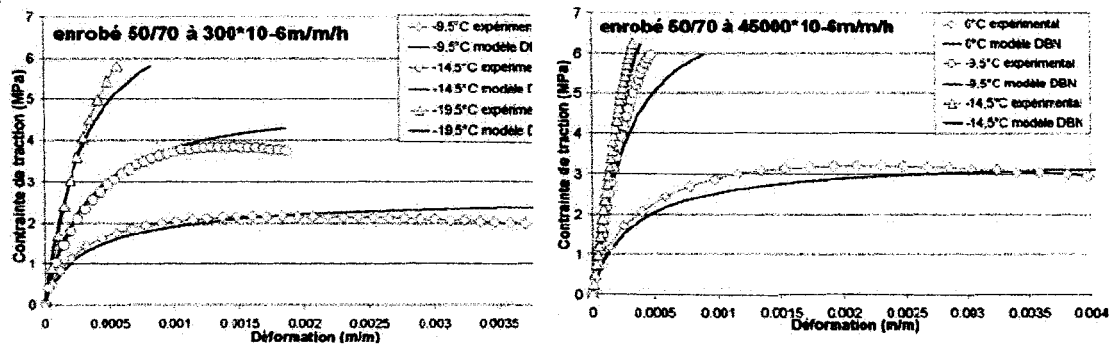


Figure 66 Relations contrainte-déformation établies en traction directe sur éprouvettes cylindriques ($\phi 80 \times 120\text{mm}^2$) pour diverses températures et vitesses de sollicitation (Ollard 2003)

Selon les résultats présentés à la figure 66, on constate que pour une vitesse de déformation voisine de $300 \mu\text{stain/h}$ et une température d'essai de $-9,5^\circ\text{C}$, la contrainte

admissible est relativement faible, inférieure à 2,2 MPa, et qu'elle est décroissante (début de l'endommagement dans la masse) pour des déformations supérieures à 0,15% (0,0015). En considérant les données du Tableau XXIII, le niveau de déformation imposée à -5°C pour les essais de simulation, de la remontée d'une fissure est comprise, entre 0,13% (ε_{\max}^a) et 1,39% (ε_{\max}^b), c'est-à-dire passablement élevée.

D'autre part, les résultats présentés à la Figure 66, témoignent de l'influence de la vitesse de déformation imposée quant à la réponse de l'enrobé. À -9,5°C, les résultats indiquent que pour une vitesse rapide de sollicitation la contrainte admissible de l'enrobé augmente par rapport à une vitesse lente (de 2,2 MPa à 6,0 MPa). De plus, le matériau présente un changement radical de comportement passant de ductile pour une vitesse lente (300 μ strain/h) à fragile pour une vitesse rapide (45000 μ strain/h). En effet, la Figure 66 montre pour la vitesse rapide à -9,5°C une rupture de l'enrobé à moins de 0,05% (0,0005).

En appliquant le PETT aux résultats obtenus pour les essais réalisés à +5°C, on peut calculer la vitesse de déformation équivalente à -5°C. Les vitesses de déformation équivalente (Tableau XXIII) sont nettement plus faibles (58/210/111 et 229) comparativement à celles correspondantes aux essais réalisés à -5°C (3020/4615/1258 et 2769) de sorte que le niveau de sollicitation des éprouvettes testées à +5°C est nettement moins sévère. Cependant, à +5°C, on constate que l'intensité de la déformation imposée, ε_{\max} , est particulièrement critique avec une moyenne de l'ordre de 0,37% et 4,04% (pour ε_{\max}^a et ε_{\max}^b respectivement) donnant lieu à des conditions d'essai nettement plus sévères que celles établies pour les essais à -5°C (valeurs de 0,13% et 1,39% pour ε_{\max}^a et ε_{\max}^b respectivement) de sorte que dans l'ensemble les durées de vie des éprouvettes testées à +5°C sont nettement moindres que celles établies pour les essais à -5°C.

5.5 Relation entre la force horizontale, F_H , et la durée de vie, N_f , et la vitesse de déformation imposée

La Figure 67 présente la relation entre l'amplitude maximale de la force horizontale de transfert dans le resurfaçage mesurée dans le premier cycle horizontal (~3500 secondes) et la vitesse de déformation imposée. La force horizontale est induite par les mouvements imposés horizontalement et verticalement. On constate à la figure 68a que l'augmentation de la vitesse de déformation imposée horizontalement à une incidence directe sur la force horizontale induite dans l'enrobé de resurfaçage. Le niveau de corrélation est relativement acceptable pour les essais conduits à la température de -5°C ($R^2 = 0,75$) et de $+5^{\circ}\text{C}$ ($R^2 = 0,85$). À titre indicatif, nous avons porté en graphique (Figure 68b) l'ensemble des résultats en retranchant les valeurs de l'essai REF-labo ($+5^{\circ}\text{C}$). En conséquence, le degré de corrélation est nettement amélioré ($R^2=0,98$).

Il apparaît donc que la vitesse de déformation imposée représente un paramètre déterminant quant à la performance des essais de simulation de la remontée de la fissure pour les essais réalisés. Pour mettre en perspective l'importance de ce paramètre, la Figure 68 présente la relation entre la durée de vie et la vitesse de déformation imposée en cours d'essai. Tout comme précédemment, en excluant du groupe les valeurs de l'essai REF-Labo à $+5^{\circ}\text{C}$ (Figure 68c), la relation entre la vitesse de déformation et la durée de vie est excellente ($R^2 = 0,99$).

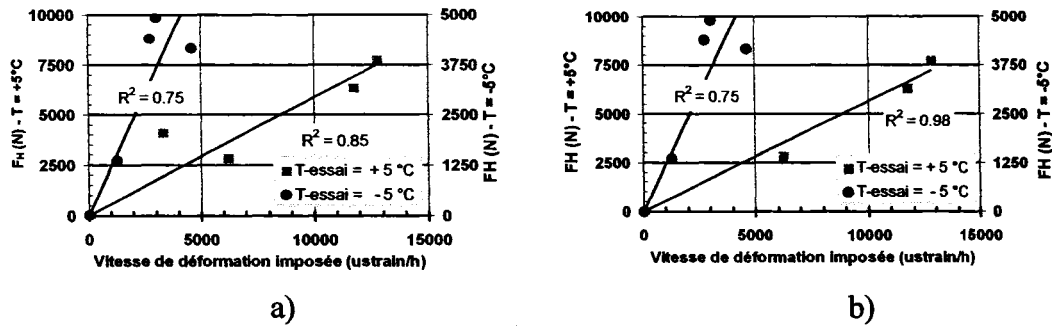


Figure 67 Relation entre la force horizontale et la vitesse de déformation imposée pour l'ensemble des éprouvettes ayant une épaisseur de resurfaçage de 55mm ($\epsilon_{rReSurf} = 55\text{mm}$; $ReSurf = \text{ESG-10}$)

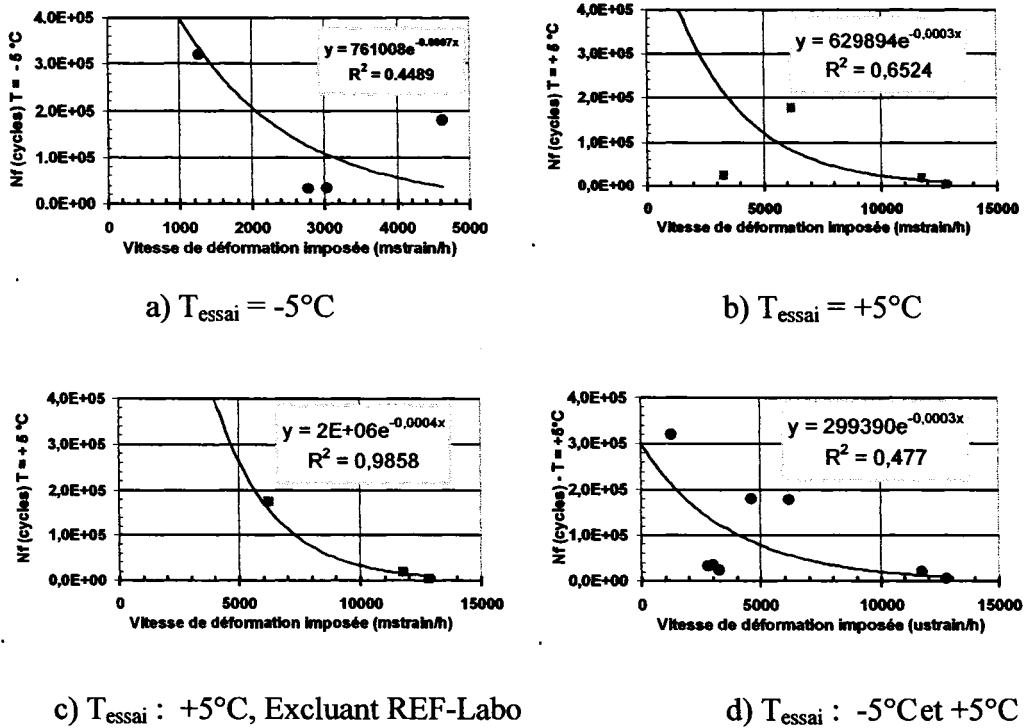


Figure 68 Relation entre la durée de vie et la vitesse de déformation imposée pour l'ensemble des éprouvettes ayant une épaisseur de resurfaçage de 55mm ($\epsilon_{rReSurf} = 55\text{mm}$; $ReSurf = \text{ESG-10}$)

5.6 Influence du type de substrat utilisé en cours d'essai

Une série d'essais a été réalisée en utilisant un substrat prélevé sur route, soit le EB-10S. Les Figures 69 et 70 présentent la relation entre la force horizontale en fonction du type de substrat utilisé.

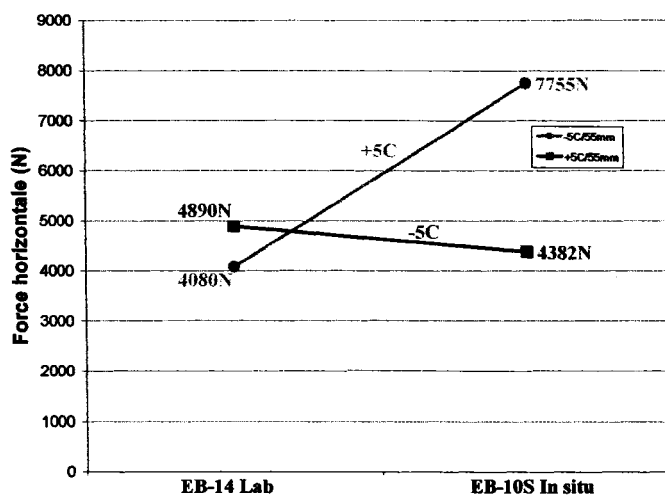


Figure 69 Force horizontale en fonction du type de substrat ($e_r=55\text{mm}$; resurfaçage=ESG-10)

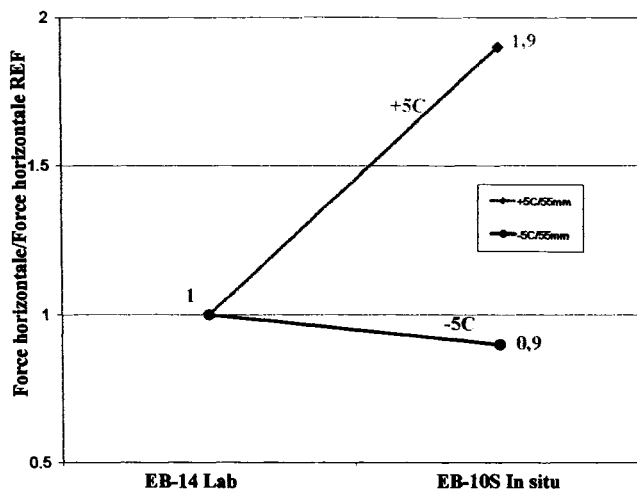


Figure 70 Force horizontale relative au substrat référence en fonction du type de substrat ($e_r=55\text{mm}$; resurfaçage=ESG-10)

Les résultats des essais effectués avec de resurfaçages de 100 mm d'épaisseur sont exclus des graphiques pour la même raison que celle évoquée précédemment (§5.4 – rupture mode C pour $e_r=100$ mm). Il est à noter que pour le même resurfaçage, le fait que le substrat soit plus rigide dû notamment à l'oxydation du bitume en condition in situ (EB-10S) entraîne une augmentation de la force de transfert. Cette augmentation est nettement plus marquée pour les essais effectués à $+5^\circ\text{C}$ (Figures 69 et 70). Comme nous l'avons mentionné précédemment, les essais à $+5^\circ\text{C}$ sont plus sévères et mettent en relief de façon plus significative un raidissement du substrat.

5.7 Relation entre l'amplitude du mouvement horizontal imposé (Δ_H) et le type de substrat

Les Figures 71 et 72 présentent la relation entre le déplacement horizontal à l'interface et en surface (TOP) respectivement en fonction du type de substrat utilisé.

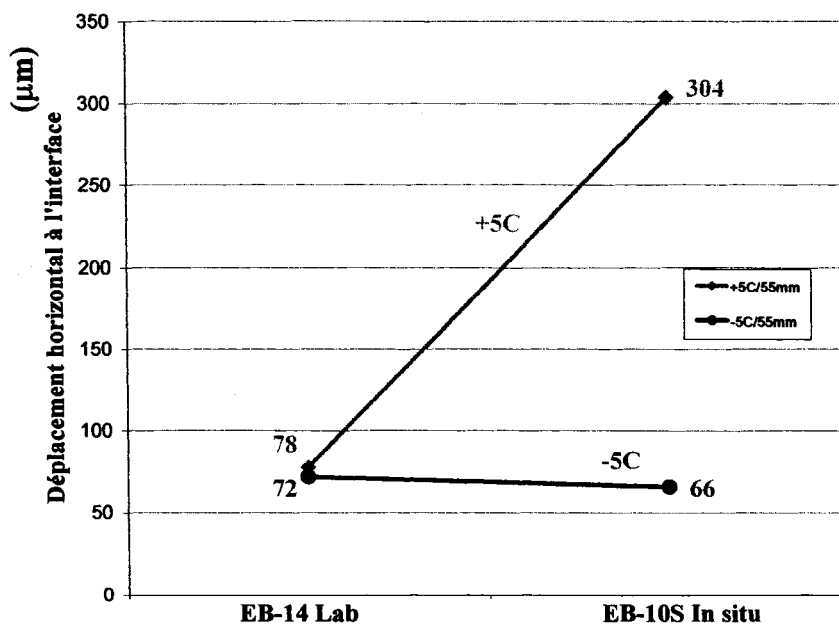


Figure 72 Déplacement horizontal à l'interface en fonction du type de substrat ($e_r=55\text{mm}$; resurfaçage=ESG-10)

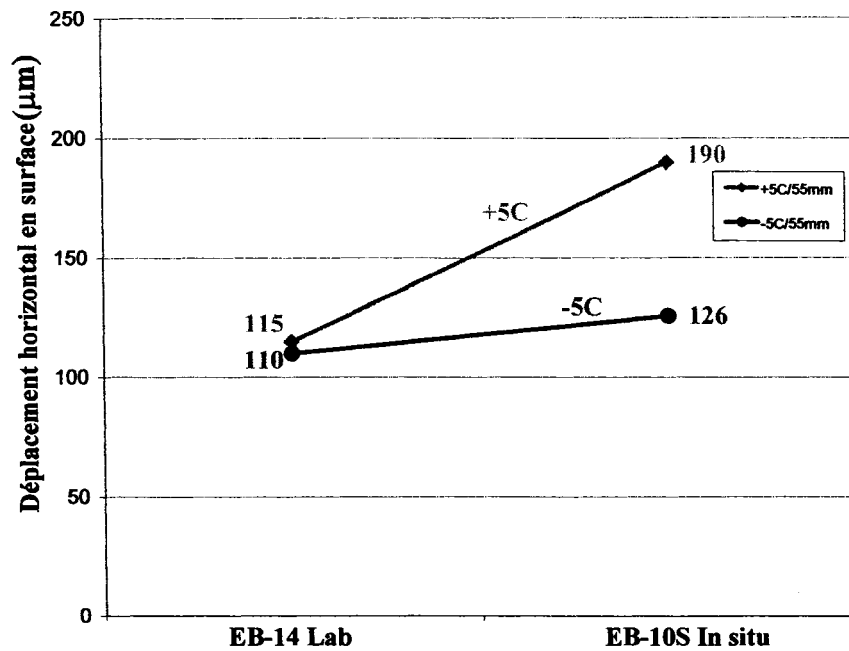


Figure 72 Déplacement horizontal en surface en fonction du type de substrat ($e_r=55\text{mm}$; resurfaçage=ESG-10)

Il est important de souligner le fait que les déplacements max/min mesurés à l'interface et en surface (TOP) sont inversés : lorsque le resurfaçage à l'interface est allongé, on observe un «raccourcissement» induit dans la fibre supérieure en surface (TOP). La Figure 73 montre l'inversion entre les déplacements mesurés à l'interface et à la surface (TOP).

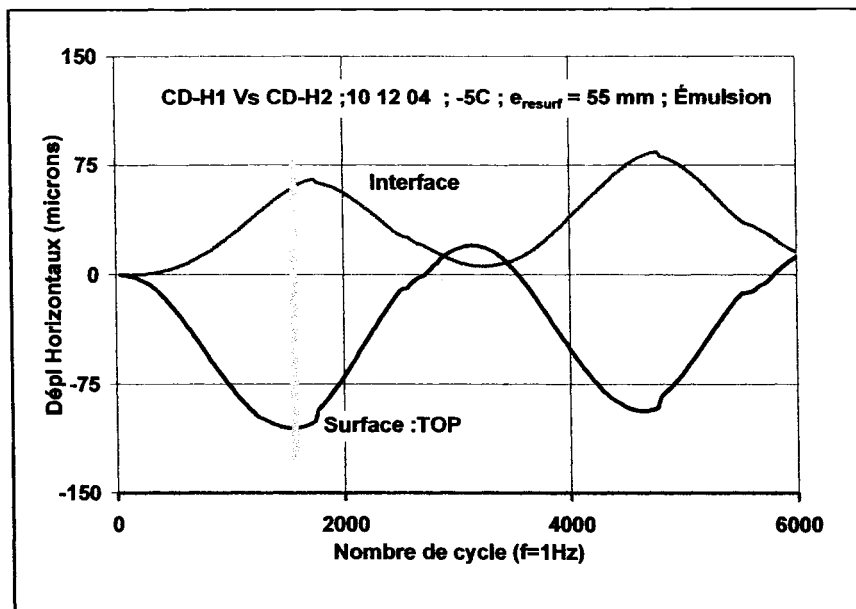


Figure 73 Relation entre les déplacements horizontaux mesurés à l'interface et à la surface du resurfaçage et le nombre de cycles verticaux

Les échantillons (EB-10S) prélevés sur l'autoroute 55 dans la région de Richmond ne permettait pas de réaliser les essais de module complexe. Néanmoins, il est hors de tout doute, suite aux essais de performance des systèmes de resurfaçage réalisés avec cet enrobé EB-10S, que sa rigidité est nettement supérieure à celle de l'enrobé EB-14 confectionné en laboratoire. Les déplacements de part et d'autre de l'entaille au niveau de l'interface sont nettement plus intenses lorsque la rigidité du substrat augmente (voir Figures 71 et 72). Les taux de déformation peuvent être calculés à partir de la distance correspondante entre les repères intégrant l'ensemble des déformations mesurées. Les déformations calculées à l'interface et en surface (TOP) sont données au Tableau XXIV pour les essais effectués à +5°C. Le calcul des déformations au niveau de l'interface a été effectué en supposant que le déplacement mesuré est tributaire de la déformation du resurfaçage au niveau de l'entaille uniquement ($\Delta L=5\text{mm}$).

Tableau XXIV

Déplacements mesurés à l'interface et en surface suivant le type de substrat utilisé quant aux essais réalisés à $T=+5^{\circ}\text{C}$ ($\Delta_H=2$ mm)

		Déplacements mesurés		Déformations			
		Interface	Surface	Interface ⁽¹⁾		Surface ⁽²⁾	
Épaisseur	Substrat	(μm)	(μm)	%	(μs)	%	(μs)
55 mm	EB-14	78	115	0,12	1200	0,07	697
	EB-10S _{InSitu}	304	190	0,46	4676	0,12	1152
100 mm	EB-14	179	190	0,28	2770	0,12	1152
	EB-10S _{InSitu}	424	238	0,66	6524	0,14	1442

⁽¹⁾ L'espace entre les repères de mesure à l'interface est de 5 mm (voir Figure 20).

⁽²⁾ L'espace entre les repères de mesure en surface est de 165 mm (voir Figure 20).

Les résultats du Tableau XXIV soulignent un point critique du montage mis en oeuvre et qu'il conviendra de corriger. En effet, le déplacement imposé de 2 mm à la base du substrat conduit à des efforts internes qui diffèrent d'un essai à l'autre en fonction du type de substrat. Suivant les données présentées au Tableau XXIV, un facteur d'accroissement d'intensité de charge en regard au type de substrat est établi et varie de 2,3 à 3,9 pour l'interface et de 1,3 à 1,6 pour la surface (TOP). Également, on constate au Tableau XXIV que le degré de sollicitation appliqué au système de resurfaçage (la déformation induite à l'interface) varie lorsque l'épaisseur du resurfaçage augmente de 55 mm à 100 mm, et ce, pour les deux types de substrats. Pour permettre une comparaison juste des différents systèmes de resurfaçage, il conviendra de contrôler non pas le déplacement imposé à la base du substrat tel qu'il en est actuellement, mais plutôt de contrôler le déplacement imposé au niveau de l'entaille, à la base du resurfaçage.

5.8 Influence de l'épaisseur de resurfaçage sur les résultats d'essai

Bien que les résultats présentés aux Tableaux XXI et XXII font référence aux premiers cycles de sollicitation soient tout à fait cohérents et pertinents, les résultats des essais à la rupture pour les éprouvettes ayant une épaisseur de resurfaçage de 100 mm sont de notre point de vue, peu représentatifs et difficilement exploitables. Deux éléments permettent d'expliquer en grande partie ce constat : un effet d'échelle marqué et un rendement au compactage inadéquat. En effet, la mise à l'essai d'un corps d'épreuve dont le rapport des dimensions épaisseur/largeur est proche de l'unité s'avère critique, l'échantillon étant peu représentatif des conditions réelles que l'on cherche à simuler. Le fait d'augmenter l'épaisseur de resurfaçage a pour conséquence d'intensifier le degré de sollicitation du corps d'épreuve en dehors des zones d'étude au pourtour de l'entaille. L'augmentation requise de la force verticale à imposer pour atteindre l'amplitude du déplacement vertical ciblé (20 μm) accentue la contrainte dans l'enrobé suivant un plan perpendiculaire à celui de l'entaille et parallèle à l'interface de collage substrat-resurfaçage. Or, à la base de la couche de resurfaçage compacté à l'aide du compacteur à charge roulante MLPC, le degré de compacité atteint est largement moindre que celui obtenu pour des resurfaçages plus minces (55 mm). D'autres études (Pierre P. et coll., 2005) visant à mettre en relief l'homogénéité des plaques compactées à l'aide du compacteur MLPC ont montré que le degré de compaction en bas de plaque est nettement moindre que celui obtenu en haut de plaque, à proximité de la charge mobile de compaction.

Le mode de mise en œuvre de l'enrobé sur chaussées (épandage du matériau foisonné par couche et compactage par passages successifs de compacteurs à la surface) confère au matériau une certaine anisotropie (gradient de densité dans le sens de l'épaisseur de la couche, orientation privilégiée des grains par le compactage). De la même façon, les éprouvettes fabriquées en laboratoire présentent ce type de propriétés. Des mesures du

module en traction-compression réalisées sur des éprouvettes cylindriques prélevées suivant trois axes de carottage dans des plaques d'enrobé fabriquées en laboratoire (Di Benedetto et de la Roche 1998), ont montré des variations pouvant atteindre 20%. Le compacteur de plaques permet la fabrication en laboratoire de plaques d'enrobé ayant des caractéristiques semblables aux enrobés mis en œuvre sur chantier. Le compactage d'un enrobé sur chantier avec un rouleau compacteur a pour effet de forcer les granulats à prendre une orientation particulière créant ainsi un matériau avec une structure fortement anisotrope. Pour minimiser ces effets, on réalise souvent les essais sur des éprouvettes prélevées par carottage (ou sciage) au cœur du matériau. Dans les calculs de dimensionnement routier, on fait l'hypothèse d'isotropie du matériau. Pour le compactage, une séquence de passe est décrite dans la norme préliminaire du MTQ LC 26-400 qui s'inspire de la norme française NF P 98-250-2 partie 2 : compactage. Cette procédure a été minutieusement suivie pour la compaction des corps d'épreuve. Pour le compactage des corps d'épreuve, il faut impérativement chercher à limiter les différentielles de densité au sein de la plaque, lesquelles sont inévitables dans les extrémités et le pourtour (effets de bout : densité plus faible) et dans les plans parallèles éloignés de la charge roulante (la densité diminue en fonction de la profondeur).

L'effet combiné d'une compacité moindre et de l'intensité de la charge verticale imposée à l'essai explique le mode de rupture particulier des éprouvettes de forte épaisseur c'est-à-dire une rupture suivant un plan parallèle à l'interface substrat-resurfaçage (mode C).

En définitive, l'étude de l'épaisseur aurait été plus rigoureuse en limitant l'épaisseur dans un intervalle de 35 à 65 mm. Une étude à partir de 3 épaisseurs cibles (35mm; 50mm; 65mm) permettrait de mettre en relief l'influence de l'épaisseur sur la durée de vie et d'extrapoler le rendement pour des épaisseurs plus significatives.

5.9 Influence du type de système de resurfaçage quant à la durée de vie des éprouvettes

Pour les deux températures d'essai (+5°C et -5°C), trois différents systèmes de resurfaçage ont été étudiés : 1) resurfaçage simple avec ESG-10 (liaison avec émulsion) 2) un système avec découplage à partir d'un mortier bitumineux placé entre le substrat et le resurfaçage (émulsion + 15 mm d'un CH-10 + 55 mm de ESG-10) et 3) un système avec découplage basé sur le concept des SAMI (*Stress Absorbance Membrane Layer*) (3 mm d'une membrane élastomère + 8 mm d'un enrobé coulé à froid (ECF) + 55 mm de ESG-10). Les fiches techniques du CH-10 et du système SAMI sont fournies à l'Annexes 10 et 12. L'analyse de résultats sera présentée suivant les deux températures d'essai étudiées.

5.10 Performance des différents systèmes de resurfaçage testés à T = -5°C

Le fait d'intégrer dans le resurfaçage une couche intermédiaire modifie substantiellement l'intensité de la force qui transite de part et d'autre de l'entaille dans la couche de resurfaçage : la présence d'une couche déformable à l'interface a pour effet de réduire le niveau de contrainte au sein de l'enrobé de resurfaçage. Cette distinction est clairement mise en perspective par le montage développé. La Figure 74 montre le niveau de la force au sein du resurfaçage en cours d'essai pour les trois différents systèmes de resurfaçage testés à -5°C. *Il est clair que le système de membrane élastomère permet de réduire le niveau des contraintes dans le resurfaçage permettant ainsi un retard appréciable de la remontée de la fissure : une partie importante de l'énergie mécanique imposée est dissipée dans la membrane placée à l'interface.* En fait, l'essai réalisé sur le système de resurfaçage SAMI n'avait pas atteint sa limite ultime après 5,2 jours d'essai, soit après plus de 320 000 cycles de sollicitation verticale.

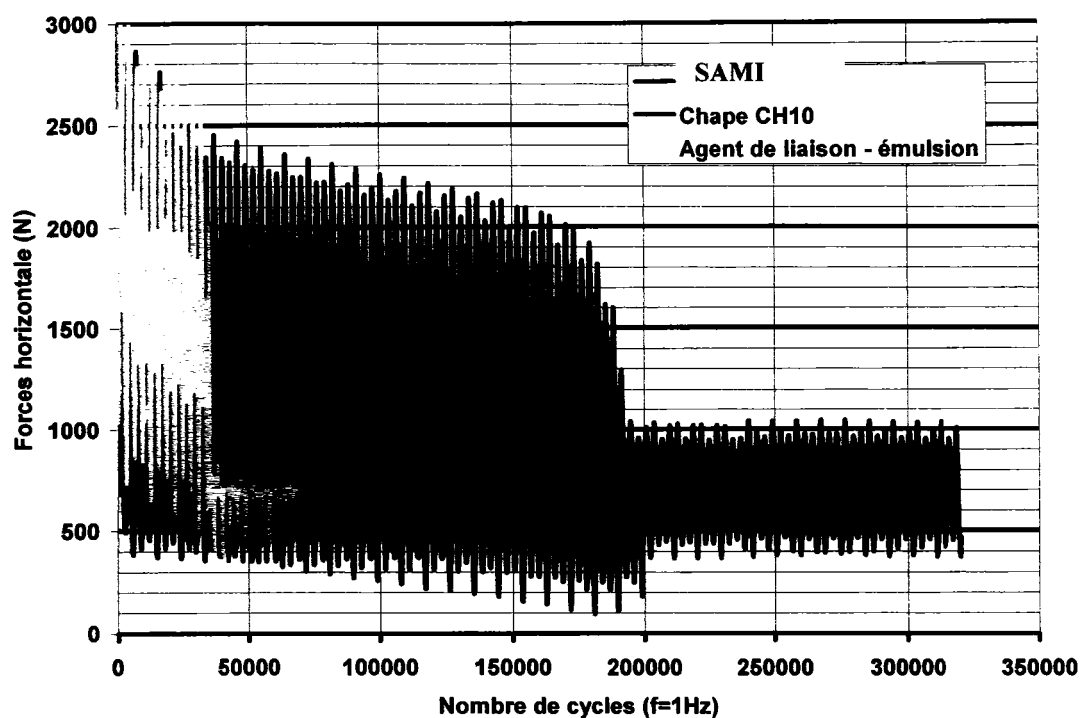


Figure 74 Relation entre la force horizontale et le nombre de cycles pour les trois différents systèmes de resurfacement étudiés dans le cadre de ce projet : resurfacement simple-agent de liaison; resurfacement avec membrane élastomère (SA) et resurfacement avec chape d'étanchéité (CH10); ($T_{\text{essai}} = -5^{\circ}\text{C}$; $\Delta x = 1\text{mm}$; $e_{\text{rReSurf}} = 55\text{mm}$; Substrat = EB-14; ReSurf = ESG-10)

Par ailleurs, les résultats des mesures effectuées suivant la direction verticale montrent également un endommagement moins rapide pour le système avec chape et encore plus lent pour le système SAMI. La Figure 75 montre que la relation entre K_s et le nombre de cycles évolue distinctement pour les trois systèmes mis à l'essai. La pente de cette relation peut être associée au taux d'endommagement par cycle de chargement. À chacun des cycles de chargement, l'énergie dissipée dans le système, propre au caractère visqueux des matériaux bitumineux, se traduit, en partie, par la formation de microfissures au sein des matériaux du système. Ces microfissures vont se multiplier en cours d'essai. En conséquent, la rigidité globale du système, exprimée ici par la valeur de K_s , décroît graduellement par un phénomène d'endommagement progressif. Cet

endommagement se traduit concrètement par une diminution progressive de la K_s , laquelle est représentée par la pente de la relation K_s et le nombre de cycles verticaux.

Le Tableau XXV donne les pentes correspondantes de la relation K_s versus le nombre de cycles verticaux. En prenant pour référence le système de resurfaçage simple (interface de collage avec émulsion simple), *on estime que le taux d'endommagement relatif du système avec chape est réduit de 11% et celui avec SAMI est réduit de plus de 98%, soit un taux d'endommagement 75 fois plus lent.* Sur la base des durées de vie mesurées pour chacun des systèmes, les résultats des essais en laboratoire montrent que le système avec Chape est 5 fois plus durable qu'un resurfaçage simple et que le système SAMI est au moins 10 fois plus performant. Pour ce dernier, cette valeur est très conservatrice puisqu'à l'arrêt de l'essai, à 320000 cycles, le système ne présentait aucun signe de fatigue apparent (K_s et F_H sont entièrement stables à l'arrêt).

Tableau XXV

Pentes correspondantes de la relation K_s vs le nombre de cycles verticaux pour les essais effectués à -5°C

		Taux d'endommagement K_s vs N		Durée de vie	
		Pente $\times 10^4$ (MPa/cycle)	Relatif ⁽¹⁾ (%)	N_f (cycles)	Relatif ⁽¹⁾
Système de resurfaçage : couche de roulement en ESG-10	RÉFÉRENCE Émulsion à l'interface	-7,5	100%	~35 000	1,0
	CHAPE Découplage avec mortier bitumineux	-6,7	89%	~180 000	5,1
	SAMI Découplage avec membrane élastomère	-0,1	< 2%	> 320 000	> 9,1

⁽¹⁾ rapport de la pente calculée pour un système donné à celle du système de référence

⁽²⁾ rapport de N_f d'un système donné à N_f du système de référence

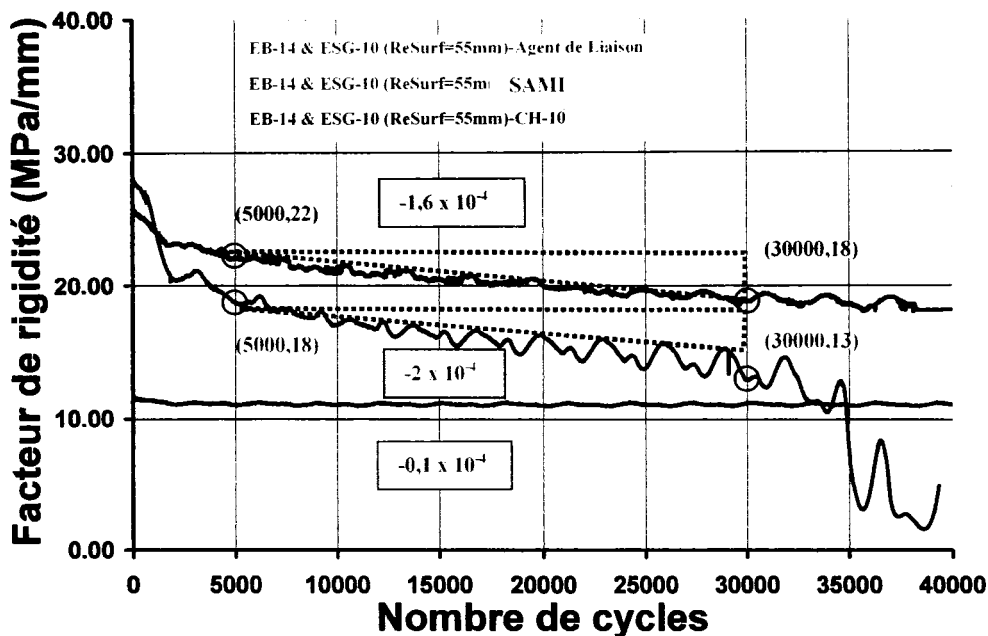


Figure 75 Relation entre K_s et le nombre de cycles pour les trois systèmes de resurfacement étudiés: Agent de liaison (émulsion seule); découplage avec Chape; découplage avec Flexiplast ($T_{\text{essai}} = -5^\circ\text{C}$; $\Delta x = 1\text{mm}$; $e_r = 55\text{mm}$; Substrat = EB-14)

Comme souligné précédemment, on peut avoir un ordre de grandeur quant à l'amplitude de la déformation imposée au système de resurfacement en considérant les déplacements horizontaux mesurés en surface et à l'interface. Le système SAMI permet un décohesionement efficace entre le resurfacement et le substrat. Il est donc plus que probable que la mesure de la déformation à l'interface est le reflet de la déformation du resurfacement entre les repères, concentrée au niveau de l'entaille. En conséquent, il est proposé de calculer la déformation à l'interface du système, en admettant que le déplacement soit induit par une déformation uniforme du resurfacement entre les repères collés à l'interface ($L = 55\text{mm}$), et nous estimons que la déformation imposée à l'interface est de l'ordre de $545 \mu\text{déformation}$ (μstrain) pour un déplacement total mesuré de l'ordre de $30 \mu\text{m}$ (voir Tableau V). Dans ces conditions ($T = -5^\circ\text{C}$; $\epsilon_{\text{interface}} = 545 \mu\text{strain}$; $f_r = 3,2 \times 10^{-4} \text{ Hz}$), il est tout à fait réaliste de croire que la durée vie de

l'éprouvette puisse être régie par la résistance en fatigue du resurfaçage, laquelle devrait être largement au-delà de 500 000 de cycles.

La Figure 76 présente l'évolution de la force horizontale en fonction du mouvement imposé au niveau de la cestroïdée (centre de gravité géométrique) du substrat. On peut constater que l'hystérésis est de plus en plus marquée en cours d'essai. Cette constatation témoigne de la progression de l'endommagement du système, laquelle devrait se manifester suivant le plan d'interface par une propagation horizontale de la fissure. Bien évidemment, les mouvements imposés (horizontalement et verticalement) induisent également des efforts dans le resurfaçage qui selon toute vraisemblance l'endommagent progressivement par un effet de fatigue.

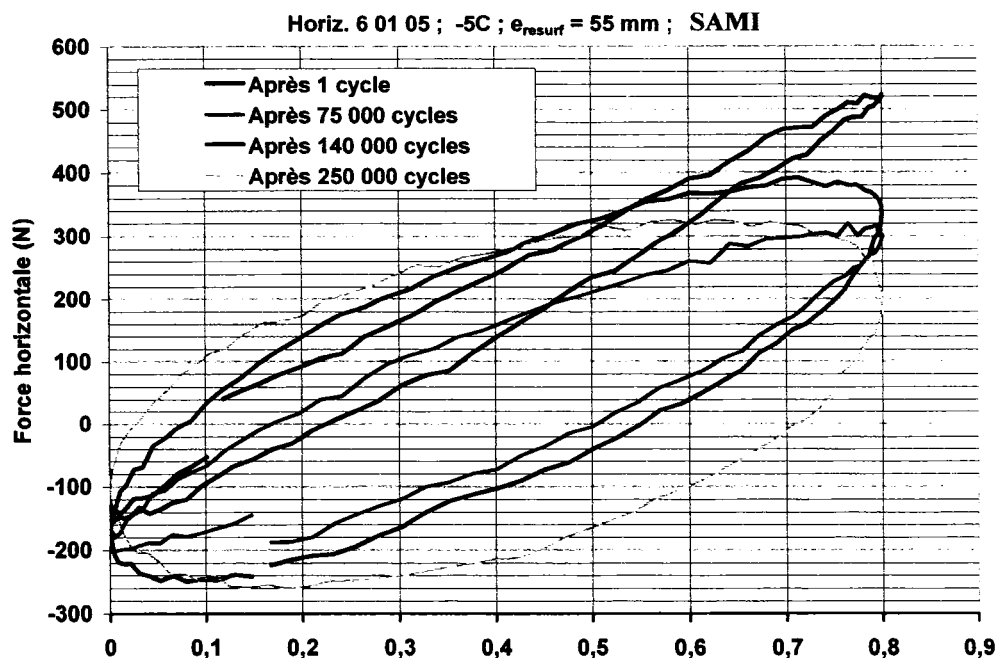


Figure 76 Relation entre la force horizontale et le déplacement imposé après différents cycles d'essai ($T_{\text{essai}} = -5^{\circ}\text{C}$; $\Delta x = 1 \text{ mm}$; $e_{\text{rReSurf}} = 55 \text{ mm}$; Substrat = EB-14; Resurfaçage = ESG-10; Système SAMI)

5.11 Performance des différents systèmes de resurfaçage testés à $T = +5^{\circ}\text{C}$

La Figure 77 présente l'évolution de la force horizontale induite dans le resurfaçage pour les trois systèmes testés à $+5^{\circ}\text{C}$. Pour les essais réalisés à $+5^{\circ}\text{C}$, on observe sensiblement la même relation entre les trois systèmes (REF vs Chape vs SAMI) : une progression quant à la durée de vie lorsqu'on intercale une couche d'interface. Toutefois, le rôle de la Chape est nettement moins marqué : en référence à REF-Labo le système avec Chape présente à toutes fins pratiques la même durée de vie (REF-Labo : $N_f = \sim 25\ 000$ et Chape CH-10 : $N_f = \sim 22\ 000$).

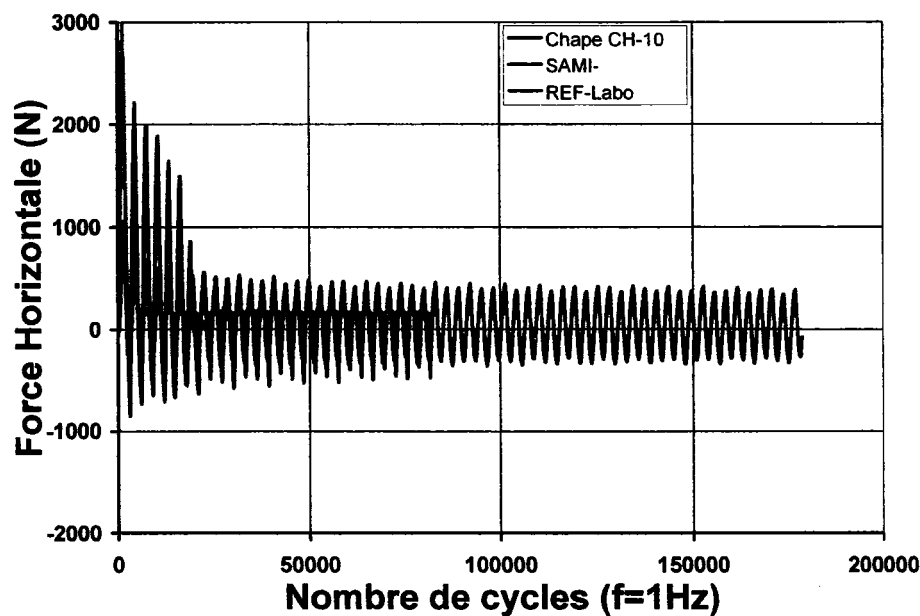


Figure 77 Relation entre la force horizontale et le nombre de cycles pour les trois différents systèmes de resurfaçage étudiées dans le cadre de ce projet : resurfaçage simple-agent de liaison; resurfaçage avec membrane élastomère (Système SAMI) et resurfaçage avec chape d'étanchéité (CH10) ($T_{\text{essai}} = +5^{\circ}\text{C}$; $\Delta x = 2\text{mm}$; $e_{\text{rReSurf}} = 55\text{mm}$; ReSurf=ESG-10)

Un élément intéressant est mis en relief dans le cadre des essais réalisés à $+5^{\circ}\text{C}$ pour le système SAMI. La Figure 78 montre clairement une inversion quant à la direction du

déplacement à l'interface de celle du déplacement à la surface du resurfaçage: allongement vs/ raccourcissement. Exception faite du système SAMI testé à +5°C, de façon générale, ce comportement a été observé sur l'ensemble des éprouvettes testées à +5°C et -5°C. Ce résultat peut laisser croire qu'il subsiste au sein du montage des jeux au niveau des patins.

Or, nous avons constaté que dans le cas du système SAMI testé à +5°C, d'une part il n'y a plus d'inversion et d'autre part un déphasage entre le déplacement à l'interface et celui à la surface est observé. La Figure 78 présente, pour les deux températures d'essai étudiées (-5°C et +5°C), la relation entre les déplacements horizontaux mesurés à l'interface et à la surface du resurfaçage observée pour les deux types de systèmes de découplage étudiés (Chape et SAMI). La Figure 78b montre clairement la présence d'un déphasage entre les déplacements pour le système SAMI. Compte tenu de la grande déformabilité d'une membrane élastomère, il est possible qu'à cette température le resurfaçage puisse se déformer par gauchissement dû à un mouvement vertical moins restreint à l'interface et minimisant ainsi l'effet des jeux au niveau des patins.

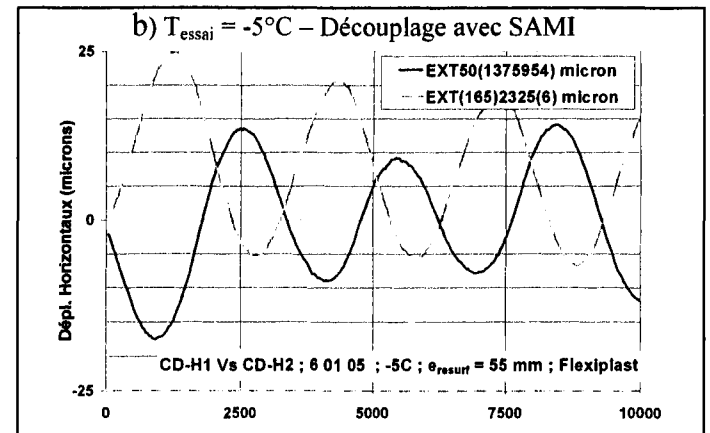
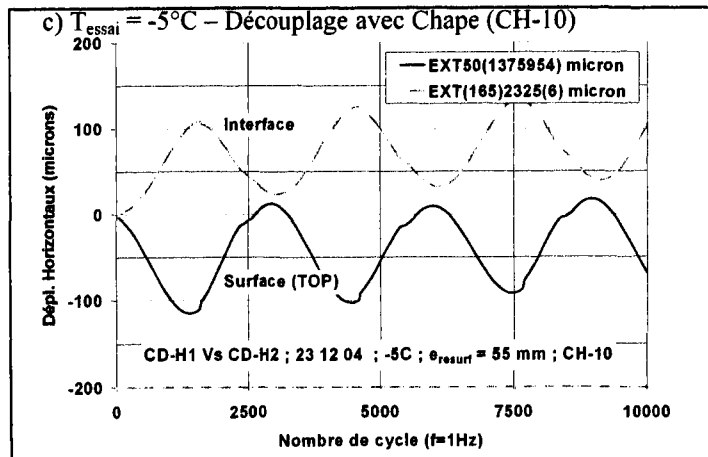
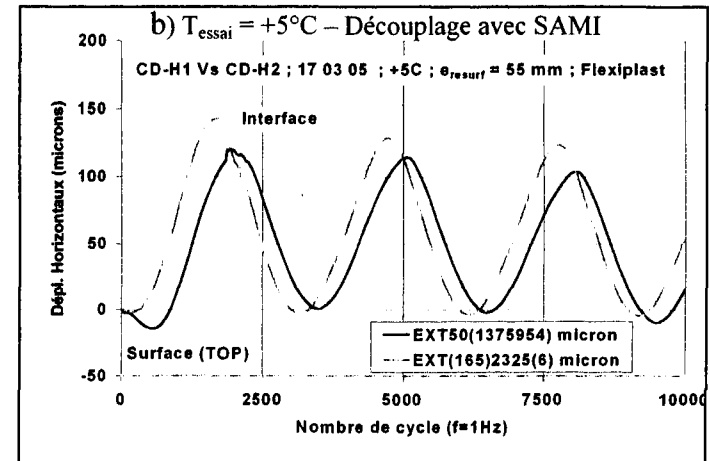
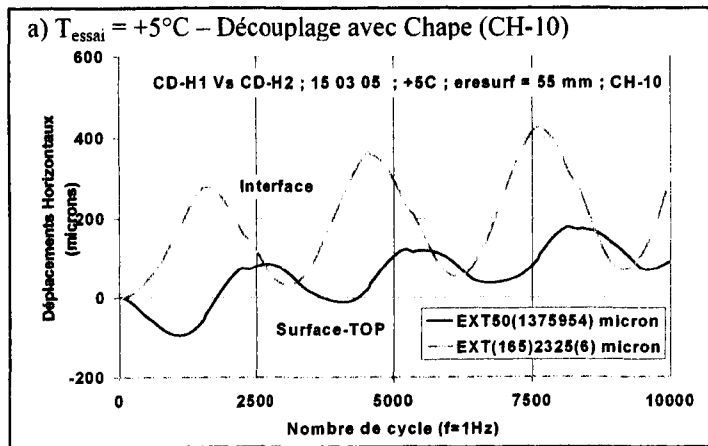


Figure 78 Relation entre les déplacements horizontaux mesurés à l'interface et à la surface du resurfaçage et le nombre de cycles verticaux pour les systèmes SAMI et avec Chape pour les deux températures d'essais étudiées (-5°C et $+5^{\circ}\text{C}$)