

CHAPITRE 3

DESCRIPTION DES MATÉRIAUX UTILISÉS POUR LA CONFECTION DES ÉCHANTILLONS EN LABORATOIRE

3.1 Matériaux utilisés

Plusieurs matériaux bitumineux ont été utilisés dans le cadre de ce projet de recherche : deux enrobés de base utilisés comme substrat, les enrobés EB-14 et EB-10S; un enrobé utilisé comme mortier bitumineux d'interface, l'enrobé CH-10, un système multicouche, incluant une membrane élastomère jumelée à un enrobé coulé à froid (enrobé ECF) et finalement un enrobé de roulement, l'enrobé ESG-10. Les sections suivantes présentent les principales caractéristiques de chacun des constituants de ces matériaux bitumineux utilisés pour la confection des corps d'épreuve. Également dans le cadre de ce chapitre, nous présenterons la synthèse des essais de contrôle en laboratoire effectués pour évaluer les principales caractéristiques de ces enrobés.

La Figure 32 présente un schéma des constituants de chaque matériau bitumineux utilisé dans le cadre du programme expérimental:

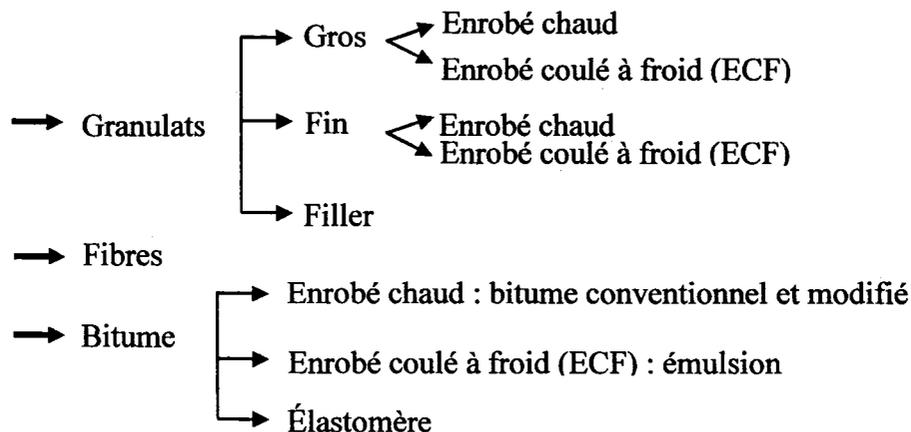


Figure 32 Schéma des constituants de chaque matériau

3.1.1 Gros granulats (pierre)

Comme nous l'avons évoqué précédemment, plusieurs types d'enrobés ont été utilisés pour la confection des corps d'épreuve. Notamment, le gros granulat, concassé, utilisé pour la confection de l'enrobé EB-14 provient de la région *Wickham*. Sa nature minéralogique est de type calcaire. Deux calibres ont été utilisés : 5-10 mm et 10-14 mm.

Pour la confection de l'enrobé ESG-10, une pierre concassée de calibre 5-10 mm, en provenance de la région *Saint Bruno*, a été utilisée. La nature minéralogique de cette pierre est de type pierre cornéenne.

En ce qui a trait à l'enrobé coulé à froid dont l'épaisseur ciblée de mise en œuvre est comprise entre 8 et 10 mm, une pierre de calibre 4-6 mm a été utilisée. Cette pierre, également concassée, présente une minéralogie de type pierre cornéenne.

Le Tableau VIII présente la granularité et les principales caractéristiques physiques de différents gros granulats utilisés dans la confection des matériaux bitumineux utilisés dans le cadre de ce projet.

Les données révèlent que ces granulats répondent aux critères de catégorie 1 de la norme NQ 2560-14/2002 « Travaux de génie civil – Granulats ».

Tableau VIII

Caractéristiques des gros granulats utilisés

Référence type enrobé		EB-14		ESG-10	ECF	CH-10	EB-10S	
Nature minéralogique		calcaire	calcaire	Pierre cornéenne	Pierre cornéenne	Pierre cornéenne	Pierre cornéenne	
Provenance		Carrière Bluteau	Carrière Bluteau	DJL St. Bruno	DJL St. Bruno	DJL St. Bruno	DJL St. Bruno	
Propriétés	Norme	10-14 mm	5-10 mm	5-10 mm	5-10 mm	5-10 mm	5-10 mm	
Densité brute (D_b)	LC-21-065/066/067	2,649	2,645	2,813	2,793	2,768	2,768	
Densité apparente (D_a)	LC-21-065/066/067	2,686	2,687	2,847	2,826	2,829	2,829	
Absorption à l'eau (%)	LC-21-065/066/067	0,52	0,59	0,42	0,45	0,45	0,45	
Fragmentation (%)	LC-21-100	100	100	100	100	-	-	
Particules plates	LC-21-265	13,1	Cat. I					
Particules allongées	LC-21-265	25,6	Cat. I					
Résistance à la fragmentation : LA (%)	BNQ 2560-400 LC-21-400	14,3*	17,6*	20,4	12,8	10,0	10,0	
Résistance à l'usure : M.D. (%)	BNQ 2560-070 LC-21-101	10,0*	10,9*	9,5	8,5	4,0	4,0	
Propreté au 80 μ m (%)	CSA A23.2.5	1,3*	1,3	1,3	0,9	0,9	0,9	
Coefficient polissage par projection	LC-21-102	0,54*	0,54*	0,54	-	-	-	
Ppilonnée à sec (kg/m^3)	BNQ 2560-060	n/d	1 484	n/d	n/d	n/d	n/d	
Friabilité (%)	BNQ 2560-080	n/d	n/d	n/d	n/d	-	-	
Granulométrie (tamis) (%)	14,0 mm	BNQ 2560-040 LC-21-040	89	100	100	100	100	100
	10,0 mm		12	88	88	96	95	95
	5,0 mm		2	7	11	10	9	9
	2,50 mm		2	2	1	2	1	1
	1,25 mm		2	2	1	1	1	1
	630 μ m		2	2	1	1	1	1
	315 μ m		2	2	1	1	1	1
	160 μ m		2	2	1	1	1	1
	80 μ m		1,3	1,3	1,3	0,9	0,9	0,9

* données fournies par le producteur

3.1.2 Granulats fins de calibre 0-5 mm

Exception faite d'un sable roulé utilisé de façon sporadique, les granulats fins utilisés dans la confection de chaque enrobé sont concassés et de même minéralogie que les gros granulats auxquels ils sont combinés. Les granulométries correspondantes sont présentées dans le Tableau IX.

Pour la confection de l'enrobé EB-14, le sable roulé naturel de calibre 0-5 mm est un silice qui provient de la région de *Durham Sud* et la criblure de calibre 0-5 mm provient de la région *Wickham*.

La provenance de la criblure de calibre 0-5 mm utilisé pour la confection de l'enrobé ESG-10, est de la région de *Saint-Philippe* et la nature minéralogique de ce granulat est de type calcaire.

Tableau IX
Caractéristiques des fins granulats utilisés

Référence type enrobé		EB-14		ESG-10		ECF	CH-10			EB-10S	
Nature minéralogique		calcaire	silice	calcaire	Var.	calcaire	silice	calcaire	calcaire	calcaire	silice
Provenance		Carrière Bluteau	Banc Coddington	St. Philippe	Recmix	St Bruno	Sable naturel	St-Philippe	St Bruno	St Bruno	Banc Savarez
Propriétés	Norme	0-5 mm	Sable naturel	0-5 mm	sable	0-5 mm	0-5 mm	0-5 mm	0-5 mm	0-5 mm	sable
Densité brute (D_{gb})	LC-21-065/066/067	2,635*	2,656	2,691	2,693	2,763	2,656	2,707	2,640	2,640	2,640
Densité apparente (D_{pa})	LC-21-065/066/067	2,70*	2,73	2,752	2,954	-	-	2,752	-	-	-
Absorption à l'eau (%)	LC-21-065/066/067	0,92*	1,02	0,83	1,37	0,57	1,02	1,03	1,05	1,05	1,05
Friabilité (%)	LC-21-080	20,7	21,1	29*	21,1	14,4	n/d	37,0	n/d	n/d	n/d
Fragmentation (%)	LC-21-100	100	n/d	n/d	n/d	n/d	n/a	-	n/d	n/d	n/a
Particules plates	LC-21-265	Cat. I	n/d	n/d	n/d	n/d	n/a	-	n/d	n/d	n/a
Particules allongées	LC-21-265	Cat. I	n/d	n/d	n/d	n/d	n/a	-	n/d	-	n/d
Coefficient d'écoulement (C_e)	LC-21-075	80	80	103,8*	80	n/d	n/d	-	n/d	-	n/d
Résistance à la fragmentation : LA (%)	BNQ 2560-400 LC-21-400	20,4*	n/d	n/d	n/d	n/d	n/a	-	n/d	-	n/a
Résistance à l'usure : M.D. (%)	BNQ 2560-070 LC-21-101	20,7	19,6	24*	19,6	10,7	n/a	16,0	n/d	8,0	n/a
Propreté au 80 μ m (%)	CSA A23.2.5	1,3	n/d	11,1	n/d	n/d	n/d	-	n/d	-	n/d
Coefficient polissage par projection	LC-21-102	0,54*	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	-	n/d	-	n/d
Mottes d'argiles & particules friables (%)	CSA-A23.2.3	n/d	0,38	0,66*	n/d	n/d	n/d	-	n/d	-	n/d
Particules inférieures à 5 μ m (%)	NQ 2501-025	n/d	97,0	94	n/d	95	100	96	95	95	100
D_{p} pillonné à sec (kg/m^3)	BNQ 2560-060	1 484*	n/d	n/d	n/d	-	-	-	-	-	-
Friabilité (%)	BNQ 2560-080	20,7	21,1	26,2*	n/d	-	-	37,0	-	11,0	-
Granulométrie (tamisats) (%)	10,0 mm	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	5,0 mm	90	97	94	98	98	95	96	98	98	95
	2,50 mm	59	90	68	57	57	89	68	57	57	89
	1,25 mm	39	80	47	31	31	78	46	31	31	78
	630 μ m	8	65	33	19	19	59	35	19	19	59
	315 μ m	1	39	26	12	12	32	26	12	12	32
	160 μ m	15	14	19	8	8	12	20	8	8	12
	80 μ m	10,4	3,8	14,6	5,9	5,9	4,2	15,7	5,9	5,9	4,2

* données fournies par le producteur

3.1.3 Bitume

Pour la confection des corps d'épreuve, deux enrobés bitumineux à chaud, les enrobés EB-14 et ESG-10, et un enrobé bitumineux coulé à froid (ECF) ont été utilisés. Pour les enrobés à chaud deux grades de bitumes ont été utilisés alors qu'une émulsion de bitume a été utilisée pour l'ECF.

Le bitume employé pour la confection de l'enrobé EB-14 a été produit par la compagnie Pétro Canada, un bitume standard de grade PG 58-28 alors que celui utilisé pour la confection de l'enrobé ESG-10, produit par la Compagnie Bitumar, est un bitume modifié de grade PG 70-28. Les deux types de bitume répondent aux exigences de la norme MTQ (Norme 4101 : Liants bitumineux «Bitumes») pour les enrobés bitumineux.

Les principales caractéristiques physiques des deux bitumes utilisés sont présentées dans le Tableau X et les attestations de conformité pour chaque bitume sont disponibles à l'Annexe 5.

Tableau X

Caractéristiques des bitumes PG 58-28 et PG 70-28 et de l'émulsion

Essais Conventionnels	Bitume		Émulsion
	PG 58-28	PG 70-28	cationique
Fournisseurs	Petro Canada	Bitumar	Non identifié
Masse volumique (g/cm ³) à 25 °C	1,025	1,015	Voir fiche technique Annexe 6
Stabilité au stockage (°C)	0,5	0,5	
Viscosité Brookfield à 135 °C (Pa*s)	0,273	0,893	
Viscosité Brookfield à 165 °C (Pa*s)	0,079	0,259	
Température élevée de caractérisation T _e (°C)	58,0-63,9	71,0	
Température basse de caractérisation T _b (°C)	(-33,9) à (-28,0)	-29,7	
Module de rigidité 60 (MPa)	78,0	48,3	
Température de malaxage (°C)	150+/-2	168+/-2	
Température de compactage (°C)	135+/-2	160+/-2	
Concentration solide (%)	n/a	n/a	

3.1.4 Membrane élastomère

Dans le complexe anti-remontée de fissure testé, le système SAMI, une membrane à base de bitume fortement modifié avec un élastomère de type SBS (Styrène Butadiène Styrene), est utilisé à l'interface substrat-resurfaçage. Cette membrane permet notamment de "tamponner" les déformations différentielles entre le substrat fissuré et la couche de resurfaçage : on admet que la membrane « absorbe les contraintes » engendrées par ces mouvements différentiels.

Les caractéristiques du bitume modifié de la membrane sont remarquables par rapport à un simple bitume (Tableau XI): viscosité élevée, intervalle thermique SHRP

(température H-L) remarquable (plus de 120⁰C), performance en traction – accrue et grande déformabilité avant rupture.

À partir des données présentées au Tableau XI, on peut constater que la viscosité de la membrane est beaucoup plus élevée que celle d'un bitume conventionnel (PG 58-28). Également, il est important de noter que la cohésion élevée de la membrane est telle que si l'on souhaitait enrober des granulats avec un tel produit, la température de chauffage requise pour l'enrobage (viscosité de 170 mPa*s) devrait être supérieure à 200⁰C!

La température de compaction usuelle d'un resurfaçage est comprise en 130 – 150⁰C, ce qui a pour effet de réduire la cohésion de la membrane (à 150⁰C sa viscosité est de 1100mPa*s). Le ramollissement de la membrane mise en contact avec l'enrobé de resurfaçage nuit à l'efficacité de compaction de ce dernier (support déformable), et accroît le risque d'altérer l'épaisseur de la membrane elle-même (migration potentielle du bitume de la membrane dans l'enrobé de resurfaçage). Pour cette raison, un enrobé coulé à froid (ECF) est mis en place entre la membrane et le resurfaçage. Suivant un dosage moyen d'environ 10 kg/m², soit une épaisseur comprise entre 5 et 10 mm.

Tableau XI

Caractéristiques du liant de la membrane élastomère

		Membrane
Pénétrabilité (25°C, 1/10 mm)		89
Température Bille-Anneau (°C)		91
Ip LCPC		+3,1
Ip Pfeiffer		+7,4
Frass (°C)		<-31
Viscosité (mPa.s)	130 °C	3000
	140 °C	1800
	150 °C	1100
	160 °C	740
	170 °C	530
	180 °C	400
	190 °C	310
Traction directe (-10 °C, 100 mm/min)	Contrainte au seuil (MPa)	2,5
	Allongement au seuil (%)	58
	Contrainte à la rupture (MPa)	>3,5
	Allongement à la rupture (%)	>400

La membrane bitumineuse liquide est répandue à chaud directement sur le support fissuré et présente d'excellentes caractéristiques d'élasticité même à très basse température. Selon le manufacturier, l'épaisseur optimale de la membrane est de 3 mm.

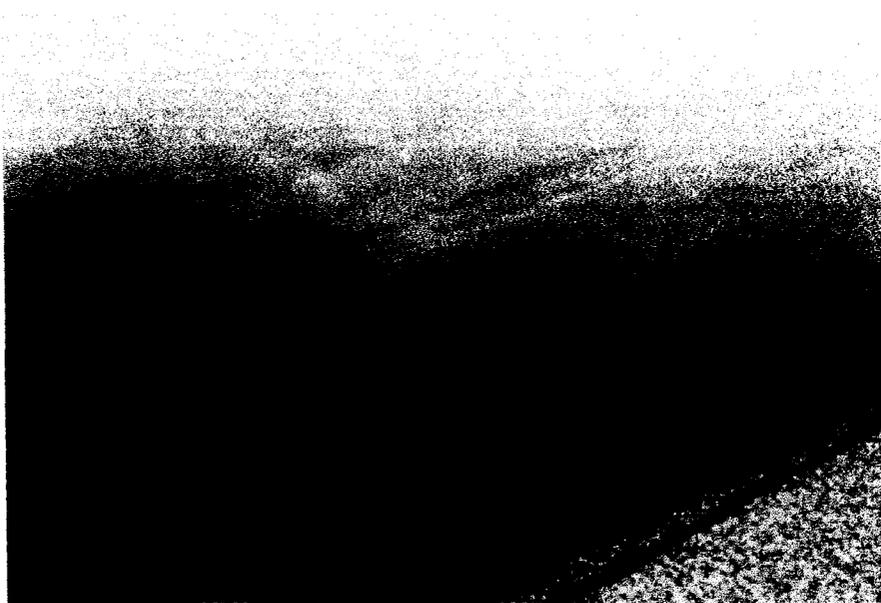


Figure 33 Aspect d'une membrane en bitume caoutchouc après mise en œuvre sur une chaussée

3.1.5 Liant d'accrochage

La mise en œuvre d'un système de resurfaçage suit un procédé bien établi et standard : un liant d'accrochage est appliqué en surface du substrat avant la mise en place de l'enrobé de resurfaçage. Dans cet esprit, cette technique de resurfaçage standard a été défini comme étant le système de resurfaçage de référence et il a été reproduit dans le cadre de nos essais. Les corps d'épreuve représentatifs des systèmes de resurfaçage standards sont donc essentiellement constitués de trois couches : 1) le substrat (EB-14); 2) le liant d'accrochage, et 3) le resurfaçage (ESG-10). Nous trouverons le détail de la fabrication des corps d'épreuve dans le chapitre 4.

Le liant d'accrochage utilisé en laboratoire est une émulsion de bitume stabilisée par la présence de produits émulsifiants cationiques. L'émulsion d'accrochage utilisée est le Supercol de la compagnie SINTRA.

Les émulsions de bitume polymère utilisées comme liant d'accrochage, doivent être conformes aux exigences de la norme 4105, Liants Bitumineux « Émulsion de bitume » (Tableau XII). Dans le collage de deux couches, le dosage recommandé pour assurer un bon collage est défini à la section 13.2.4 de la Norme CCDG 2003 « Revêtement de chaussée en enrobé ». Le détail concernant le dosage utilisé pour le liant d'accrochage, est décrit dans les Annexes 8.

Tableau XII

Caractéristiques du liant (source : Sintra Inc.)

Essais	Norme LC 4105	Supercol 60
Teneur en eau (%)	< 45	34
Résidu (%)	>55	63,8
Pénétration 25°C, 100 g, 5 sec (dmm)	25 – 250	66
Viscosité SFs 50°C	30 – 150	94,2

3.2 Formulation des enrobés utilisés

Les corps d'épreuve ont été confectionnés à partir d'enrobés produits en usine d'enrobage de manière à s'assurer d'avoir une masse importante d'enrobé homogène, dont les caractéristiques sont représentatives des enrobés mis en œuvre sur route. Le protocole établi pour la confection des corps d'épreuve nécessite des masses importantes d'enrobés (chapitre 4). De manière à faciliter la manipulation en laboratoire, nous avons donc opté pour un échantillonnage de masse en usine des enrobés ciblés pour cette étude (EB-14 et ESG-10) par prélèvement en petites boîtes (~10 kg).

Dans ce contexte une question fondamentale se pose : pourrions-nous être certains quel'enrobé de chacune des boîtes est homogène et représentatif par rapport à la formulation visée? Des points d'analyse présentés à la section 3.3.1 apportent des éléments de réflexion sur ce point.

L'échantillonnage a été réalisé manuellement en usine d'enrobage. Une pelle mécanique apportait l'enrobé de la fournée vers le site d'échantillonnage, lequel était situé à moins de 50 mètres de la centrale d'enrobage. La procédure consistait à prélever à la pelle l'enrobé disposé au sol sur une surface non absorbante constituée de contreplaqués avec résine.

Cet échantillonnage de masse a été effectué sur le plan d'enrobage à *Wickham* pour l'enrobé EB-14, alors que celui de l'enrobé ESG-10 a été réalisé à l'usine de *St-Patrick* à Montréal.

La Figure 34 illustre la prise d'échantillons à partir de l'échantillonneur développé au LUCREB. Les deux enrobés ont été échantillonnés suivant la même procédure ($\pm 1\ 500$ kg) et ce, à partir d'une seule et même gâchée complète réalisée en usine d'enrobage ($\pm 3\ 700$ kg).

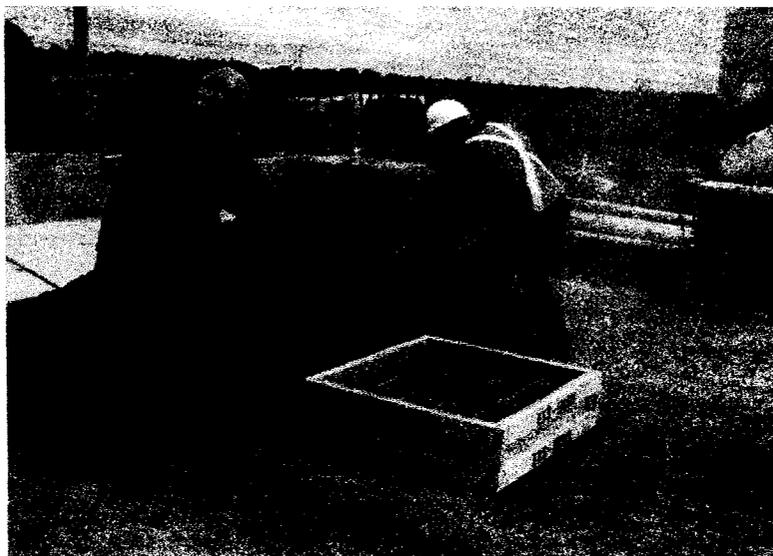


Figure 34 Prise d'échantillons à l'usine d'enrobage

Les dosages des différents enrobés prélevés en usine d'enrobage (EB-14 et ESG-10) utilisés dans le cadre de cette étude, sont donnés au Tableau XIII.

Par ailleurs, deux autres enrobés, confectionnés cette fois en laboratoire, ont été utilisés dans la fabrication des corps d'épreuve, soit les enrobés CH-10 et ECF. Les dosages respectifs de ces enrobés sont également présentés au Tableau XIII.

Rappelons que la provenance et les caractéristiques spécifiques des granulats utilisés pour la confection de chacun de ces enrobés ont été présentées à la section ξ 3.1.1 et la synthèse en est donnée aux Tableaux VIII et IX.

Tableau XIII

Formulation des enrobés

Type d'enrobé		Prélèvement en usine d'enrobage		Fabrication en laboratoire		Prélèvement In Situ sur chantier par sciage
		EB-14	ESG-10	CH-10	ECF	EB-10S
Type de fibre		n/a	n/a	n/a	organique	n/a
Type de bitume (PG)		58-28	70-28	70-34		58-34
Dosage massique (%)	Sable naturel	29,0	-	35,0	n/a	n/d
	0-5 (St.Philippe)	-	20,0	15,0	n/a	n/d
	0-5 (St.Bruno)	29,0	37,0	35,0		n/d
	5-10	30,0	43,0	15,0		n/d
	10-14	12,0	-	-	n/a	n/d
	Passant 80 μ (%)	4,5	6,3	0	(1)	4,3
	Fibre (%)	0,0	0,0	0	n/d	0,0
	b (%)	4,8	5,1	6,0	n/d	4,85
	Vi (%)	3,4	4,3	3,5	n/d	3,2
	V _{be} (%)	10,7	12,3	12,1	n/d	8,40
	V _{ba} (%)	0.41	0,22	n/a	n/d	-
	D _{mb}	2,397	2,451	2,432	n/d	2,452
	D _{mm}	2,481	2,562	2,521	n/d	2,534
	VAM	13,8	16,1	15,6	n/d	
Tamisat (%)	14 mm	99	100	100	100	100
	10 mm	86	95	99	96	96
	5 mm	57	59	83	62	62
	2,5 mm	44	40	58	45	47
	1,25 mm	35	26	40	-	35
	630 μ m	28	18	29	34	25
	315 μ m	18	12	19	-	14
	160 μ m	9	8	11	-	5
	80 μ m	4,5	6,3	7,8	7	4,3

3.3 Descriptions des différents enrobés utilisés dans le cadre de ce projet

De manière à bien cerner le rôle attendu de chacun des différents types d'enrobés utilisés ici pour la confection des corps d'épreuves, il est proposé dans un premier temps, de donner des indications relatives à ces enrobés et, dans un deuxième temps, de préciser quelques caractéristiques rhéologiques qui les caractérisent.

3.3.1 L'enrobé ESG-10 - vérification de l'homogénéité du lot prélevé en usine

L'enrobé ESG-10 est utilisé dans le cadre de ce projet comme enrobé de resurfaçage dans la fabrication des corps d'épreuve. En conséquence, nous nous sommes intéressés à connaître l'homogénéité du lot échantillonné afin d'estimer le risque de variabilité dans les résultats des essais de remontée des fissures.

Pour vérifier l'homogénéité des échantillons du prélèvement de masse en usine, un certain nombre de boîtes a été analysé de façon détaillée. Dix (10) boîtes sélectionnées de manière aléatoire du lot des 125 boîtes échantillonnées à l'usine d'enrobage, ont été analysées en laboratoire comme suit:

- Mesure de la teneur en bitume à l'aide du four ignition;
- Mesure de la granulométrie de l'échantillon séché au four à ignition;
Norme LC 21-040 *Analyse Granulométrique*
- Mesure de l'aptitude au compactage à l'aide de la PCG
Norme LC 26-003 *Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés à chaud à la presse à cisaillement giratoire.*

3.3.1.1 Procédure d'essais :

La masse d'enrobé dans chacune des boîtes est d'environ 10 kg. Cette masse d'enrobé chauffée fut séparée dans un premier temps en deux parties à l'aide d'un séparateur mécanique pour obtenir la masse nécessaire à l'essai PCG. La deuxième portion fut, à

nouveau séparée mécaniquement de manière à obtenir deux échantillons de masse d'environ 1,00 kg pour l'essai au four à ignition.

Variation de la teneur en bitume

Afin d'assurer une présentation juste des résultats des essais au four ignition et ce, de manière à cerner avec justesse la masse de bitume dans chacun des échantillons, des essais complémentaires sur des enrobés d'un combiné granulaire bien défini furent préalablement analysés au four à ignition. Les résultats des essais ont montré l'existence d'une perte de masse engendrée par le four à ignition lors de la combustion à 540°C causée à la fois par ignition du bitume, mais également due à une perte de masse associée aux granulats. Un facteur de correction global comprenant la perte de masse associée aux granulats et la perte de masse associée au bitume, a donc été introduit. L'Annexe 6 résume les différents calculs effectués à ce niveau.

En prenant en considération le facteur de correction énoncé précédemment, établi par des essais au four à ignition, la teneur en bitume obtenue sur le lot testé, varie entre 4,76 et 5,06% pour une valeur moyenne de 4,85 et un écart type de 0,10. La valeur moyenne est inférieure de 0,25% à la valeur visée dans la formulation de départ (5,1%) (Tableau XIII). Suivant les règles de la statistique (loi de Student), nous pouvons estimer à partir du résultat de cet échantillon constitué de 10 valeurs et la moyenne de la population correspondante à l'ensemble de l'échantillonnage de masse est comprise entre 4,77% et 5,06%. La Figure 35 illustre la variation observée dans la teneur en bitume pour les dix échantillons du lot prélevé à l'usine.

En définitive, en dépit du fait que la valeur moyenne de la teneur en bitume de la gâchée produite pour l'échantillonnage de masse soit plus grande (4,85%) que la valeur cible (5,1%), il n'en demeure pas moins que la plage de variation au sein du lot de masse est tout à fait acceptable (variation relative inférieure à 1,5%).

De cette analyse nous pouvons noter que les quantités réelles insérées dans les bennes de malaxage, diffèrent des quantités prescrites initialement.

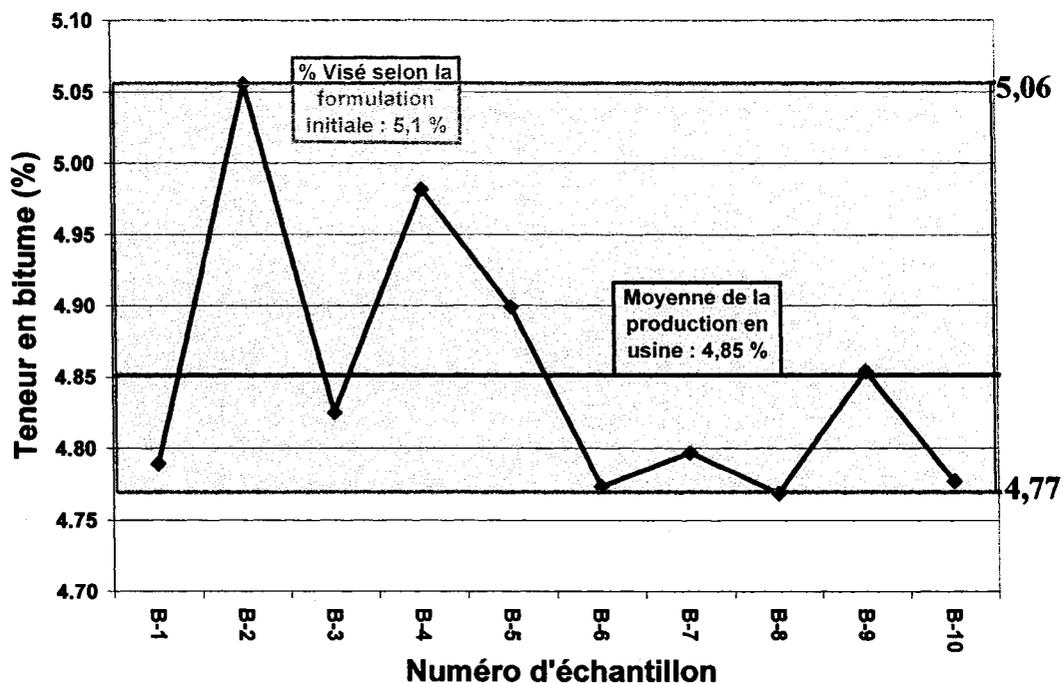


Figure 35 Variation de la teneur en bitume des échantillons sélectionnés pour vérifier l'homogénéité de l'échantillonnage de masse

Variation de la teneur en pierre (fraction > 5 mm)

La teneur en pierre obtenue lors de l'analyse du lot servant à évaluer l'homogénéité de l'échantillonnage de masse en usine montre une variation comprise entre 38,2% et 44,7% dont la valeur moyenne se situe à 42,8% comparativement à 40% pour la valeur cible. Quant à l'homogénéité de l'ensemble du lot de masse (la population), la moyenne de la population de la teneur en pierre est comprise entre 38,2% et 44,7%. La Figure 36 montre la variation observée sur l'ensemble de cet échantillon.

Quant à l'homogénéité de l'ensemble du lot de masse (la population), la teneur en pierre est comprise entre 38,2% et 44,7% (variation relative inférieure à 3,4%).

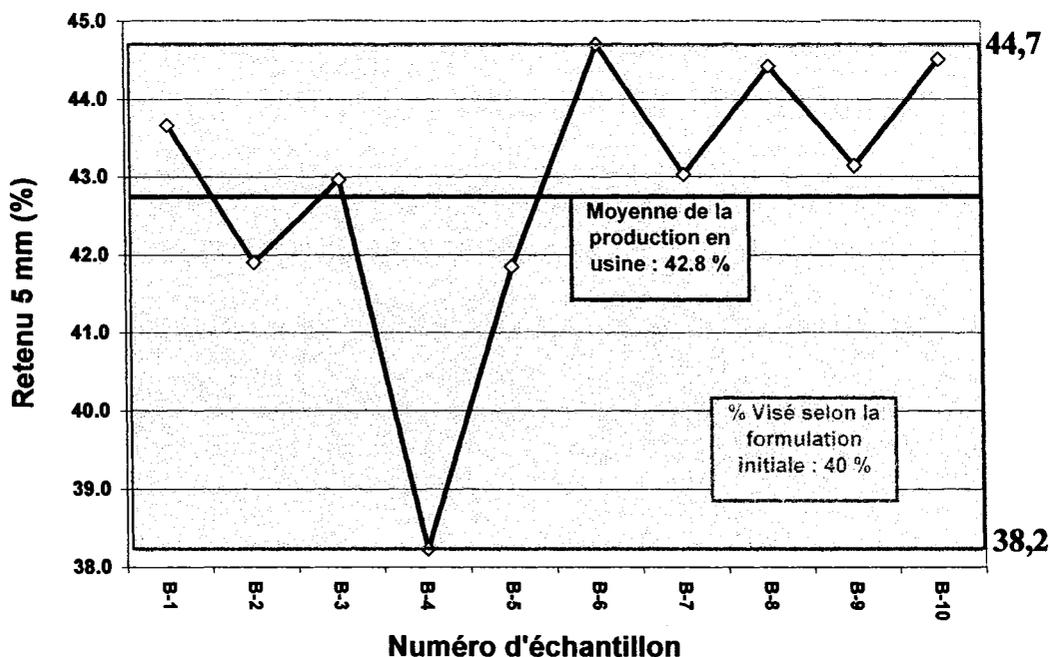


Figure 36 Variation de la teneur en pierre (fraction > 5 mm) des échantillons sélectionnés pour vérifier l'homogénéité de l'échantillonnage de masse de l'enrobé ESG-10

Variation de la teneur en particules fines (< 80 μm)

La Figure 37 montre très bien la variation de la teneur en particules fines mesurée sur le lot échantillonné. La valeur moyenne du lot est de 0,5% supérieure à la valeur cible (6,3% - Tableau XIII). Quant à l'homogénéité de l'ensemble du lot de masse (la population), la teneur en particules fines moyennes de la population est comprise entre 6,6 et 7,2% pour une variation relative inférieure à 1,8%.

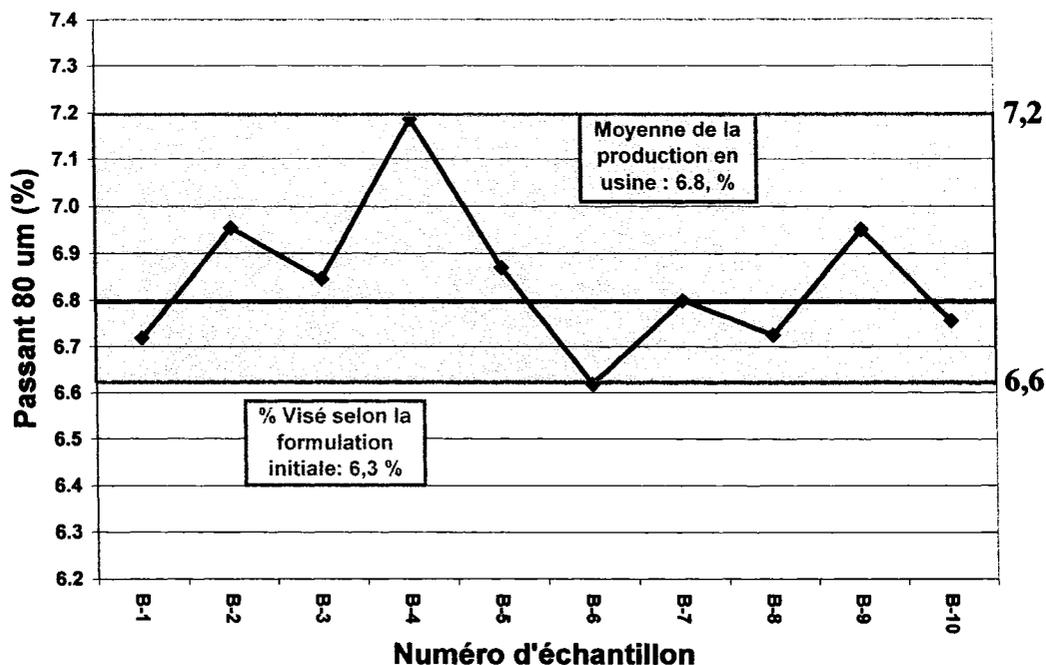


Figure 37 Variation de la teneur en particules fines (fraction passant le tamis de 80 µm) des échantillons sélectionnés pour vérifier l'homogénéité de l'échantillonnage de masse de l'enrobé ESG-10

Variation des résultats relatifs à l'aptitude au compactage mesurée à l'aide de la PCG

La dernière analyse sur les lots échantillonnés à l'usine est l'aptitude au compactage à l'aide de la PCG. La Figure 38 illustre la variation de la teneur en vides à 80 girations établie sur les 10 boîtes analysées. La variation de la teneur en vides des boîtes testées comprise entre 4,3% et 5,9%, est faible et témoigne d'une bonne homogénéité de l'échantillonnage.

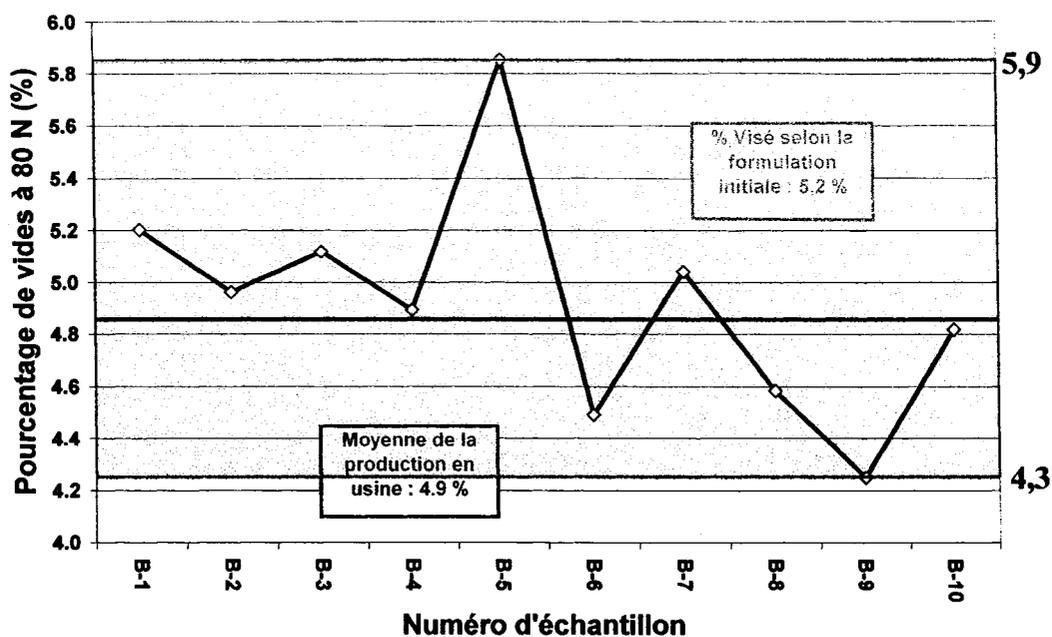


Figure 38 Variation du pourcentage de vides à 80 girations à l'essai à la PCG en fonction du lot échantillonné en masse à l'usine pour l'enrobé ESG-10

4.3.1.2 Tableau récapitulatif des variations mesurées des échantillons sélectionnés pour vérifier l'homogénéité de l'échantillonnage de masse

Le Tableau XIV résume les différentes variations observées sur l'échantillon des 10 boîtes sélectionnées afin de vérifier l'homogénéité de l'échantillonnage de masse de l'enrobé ESG-10.

Tableau XIV

Variations mesurées pour vérifier l'homogénéité de l'échantillonnage de chantier

		Bitume	Pierre (> 5mm)	Filler (< 80µm)	PCG (vides à N _{design} : 80 girations)
Lots	Moyenne	4,85%	42,8%	6,8%	4,9%
	Écart-type (s)	0,10%	1,91%	0,16%	0,44%
	Nombre d'échantillons	10	10	10	10
Population Intervalle de confiance : 95%	\bar{X} min ⁽¹⁾	4,78%	41,40%	6,72%	4,59%
	\bar{X} max ⁽¹⁾	4,93%	44,28%	6,96%	5,26%
	Taux de variation relative ⁽²⁾	1,53%	3,36%	1,77%	6,78%

(1) $\bar{X} = \text{moyenne} \pm a * s$ avec $a = 0,754$ pour $n = 10$, conforme à la loi de Student

(2) $[(\frac{\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}}{2}) / \text{moyenne}] * 100 \%$

3.3.2 L'enrobé EB-14

L'enrobé EB-14, est l'un des enrobés le plus souvent rencontré dans les chaussées souples au Québec. Il a été utilisé comme substrat dans notre étude des différents systèmes anti-remontée de fissures. Après la préparation de deux plaquettes d'enrobé EB-14 (Annexe 8), nous avons mesuré la rugosité de surface à l'aide du pendule de frottement sur la surface (Annexe 7).

3.3.3 L'enrobé EB-10S utilisé comme substrat

Une partie du programme d'essai vise à mettre en relief l'importance du substrat. En général, les corps d'épreuve sont fabriqués à partir de l'enrobé EB-14, lequel n'ayant jamais été exposé aux intempéries, aucun vieillissement. Afin de cerner l'importance du vieillissement sur les résultats des essais réalisés à partir du montage développé au LUCREB, une série d'essai a été effectuée à partir d'un substrat prélevé en chantier, l'enrobé EB-10S.

Des essais conduits sur cet enrobé prélevé sur des chaussées âgées de 6 à 8 ans sont indiqués dans le Tableau XV et dont la composition est reportée au Tableau XIII.

Tableau XV

Caractéristiques mécaniques de l'enrobé EB-10S (PG 70-34)

Coefficient de dilatation thermique ($\mu\text{def}^{\circ}\text{C}$)					TSRST		
à 5 ⁰ C	à -5 ⁰ C	à -15 ⁰ C	à -25 ⁰ C	à -34 ⁰ C	Trupture (⁰ C)	σ rupture (MPa)	Pente
31	27	23	18	13	-30 ⁽¹⁾	4,0	0,24

⁽¹⁾Essai à 5⁰C/hre : ϕ 40x250mm

3.3.4 La Chape CH-10

L'enrobé de type CH-10 joue un rôle de «chape d'étanchéité» entre la couche de base et la couche de resurfaçage.

L'enrobé a été préparé en laboratoire à partir des matériaux présentés dans les Tableaux VIII et IX. Le bitume utilisé pour la fabrication de la chape d'étanchéité est un bitume de classe de performance PG 70-34.

3.3.5 ECF (Enrobé coulé à froid)

Pour lutter contre la remontée des fissures dans l'enrobé de resurfaçage une de technique qui a fait ses preuves aux États-Unis sur les chaussées fissurées est la technique SAMI (*Stress Absorbing Membrane Interlayer*). Cette technique consiste à répandre une membrane très déformable sur le substrat avant l'application de l'enrobé de resurfaçage. La membrane est constituée d'un liant modifié à forte teneur en élastomère (généralement des SBS) ou d'un bitume caoutchouc.

L'ECF est un enrobé ultra mince (7 à 15 mm d'épaisseur) à granulométrie discontinue (0/5mm– 0/10mm) à base de bitume modifié et de granulats concassés de haute performance et confectionné à partir de fibres souples synthétiques (voir Fiche technique Annexe 9).

3.4 Quelques caractéristiques rhéologiques des enrobés utilisés dans le cadre de ce projet

Les principales caractéristiques suivantes des différents matériaux bitumineux utilisés dans le cadre de nos essais, de manière à permettre une analyse et une interprétation rigoureuse:

- 1) le module complexe
- 2) la performance à la base température (TSRST),
- 3) le coefficient de dilatation thermique.

Dans un premier temps, nous donnerons quelques informations sommaires, relatives à l'essai et dans un deuxième temps les résultats obtenus seront présentés.

3.4.1 Fabrication et dimensionnement des éprouvettes

L'ensemble de ces mesures est effectué sur des éprouvettes compactées en laboratoire à partir des différents enrobés présentés précédemment.

De manière à s'assurer d'obtenir des éprouvettes représentatives du chantier, la compaction a été assurée à partir du compacteur de plaques LCPC du laboratoire LUCREB à l'ÉTS. Les plaques obtenues ont une forme prismatique (400 x 600 x 125 mm). Les carottes, à raison de onze par plaque, ont été prélevées dans la direction normale aux plans de sciage, parallèlement à la surface compactée. La planéité et le parallélisme des surfaces planes sont assurés à l'aide d'une surfaceuse rotative au carbure. La procédure de carottage est schématisée à la Figure 39. Les éprouvettes sont ensuite entreposées à température et humidité contrôlées ($T = 20^{\circ}\text{C}$ et $\text{H.R.} = 50\%$) sur un lit de sable, suivant leur axe de révolution, de manière à éviter leur gauchissement en cours d'entreposage.

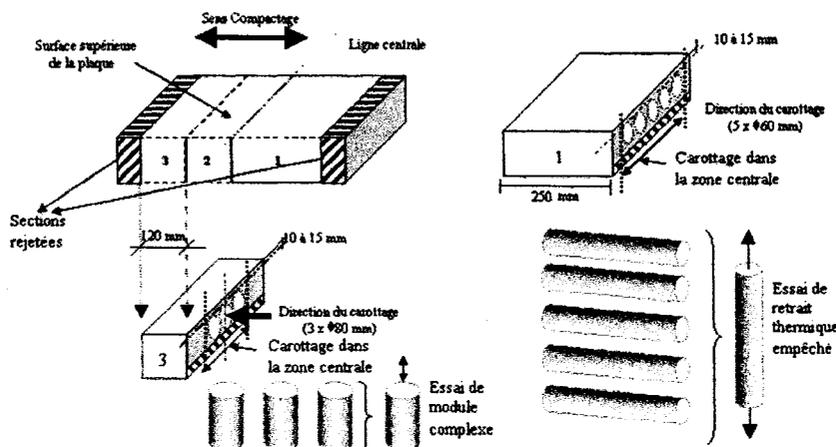


Figure 39 Schématisation du plan de carottage des plaques d'enrobés pour les essais de TSRST, de coefficient de dilatation thermique et de module complexe

Le Tableau XVI présente la liste des essais réalisés sur l'ensemble des enrobés pour évaluer leurs performances.

Tableau XVI

Liste des principaux essais réalisés

Essai	Norme / méthodologie	Taille des éprouvettes			Conditions de l'essai
		Ø ou e (mm)	L (mm)	l (mm)	
Module complexe (E*)	DGCB ENTPE Lyon	80	120	n/a	<ul style="list-style-type: none"> • Chargement cyclique sinusoïdal • Traction/compression alternée ($\sigma_{MOYEN} = 0$) • Mode : déformation imposée de 50 μdef • t_{STABILISATION} : 4 hres • T°_{D'ESSAIS} (°C) : 35; 20; 10; 0; -10; -25; -35 • Fréquences (Hz) : 20; 10; 3; 1; 0,3; 0,1; 0,03; 0,01 • Extensomètres (3) • longueur : 100 mm • angle d'espacement : 120°
Retrait thermique empêché (TSRST)	ASSHTO TP 10-93	60	250	n/a	<ul style="list-style-type: none"> • T°_{DÉPART} : 5°C • Conditionnement de 6 heures avec force = 0 • Taux de refroidissement : 10°C/hre • Extensomètres (3) • longueur : 165 mm • angle d'espacement : 120°
Coefficient de dilation thermique	LUCREB	80	120	n/a	<ul style="list-style-type: none"> • T°_{DÉPART} : 20°C; stabilisation : 2 heures • Taux de refroidissement : 2°C/hre • Matériau de référence : silicate de titane • T°_{DE MESURE} (°C) : 20; 10; 0; -10; -20; -30; -40 • Conditionnement : 2 hres / plateau

3.4.2 Essais de module complexe

La mesure du module complexe d'un enrobé demande un contrôle et une mesure précise de la déformation de l'éprouvette en cours d'essai afin de pouvoir imposer une déformation sinusoïdale tout au long de l'essai. L'utilisation d'une presse mécanique, asservie en temps réel et capable d'imposer une force adéquate permettant la déformation nécessaire, est essentielle. Une enceinte thermique, un système d'acquisition de données ainsi que des extensomètres capteurs de déplacement sont également nécessaires. Pour assurer un bon contrôle de l'essai, on utilise trois extensomètres, (longueur totale de 50 mm) dispersés uniformément suivant l'axe

longitudinal de l'éprouvette (angle d'espacement de 120° tout au tour de l'éprouvette). La mesure du module complexe est un essai non destructif.

La Figure 40a présente les résultats expérimentaux de la mesure des modules complexes dans le plan Cole-Cole, alors que la Figure 40b présente les courbes correspondantes obtenues du modèle de Huet-Sayegh

Le Tableau XVII présent les valeurs des paramètres du modèle Huet-Sayegh établis pour les enrobés EB-14, ESG-10 et CH-10.

Tableau XVII

Valeurs des paramètres du modèle de Huet-Sayegh pour les enrobés étudiés

Paramètres	Unités	ESG-10	EB-14	CH-10
Type de Bitume		PG 70-28	PG 58-28	PG 70-34
E_{α}	(MPa)	38700	40000	33500
E_0	(MPa)	5	120	70
δ	n/a	2,857	3,380	3,880
'k'	n/a	0,144	0,195	0,215
'h'	n/a	0,347	0,555	0,586
$\tau = e^{(a+b*T+c*T^2)}$	a	0,692	2,0220	-0,1322
	b	-0,404	-0,3987	0,3773
	c	0,004	0,0032	0,0024

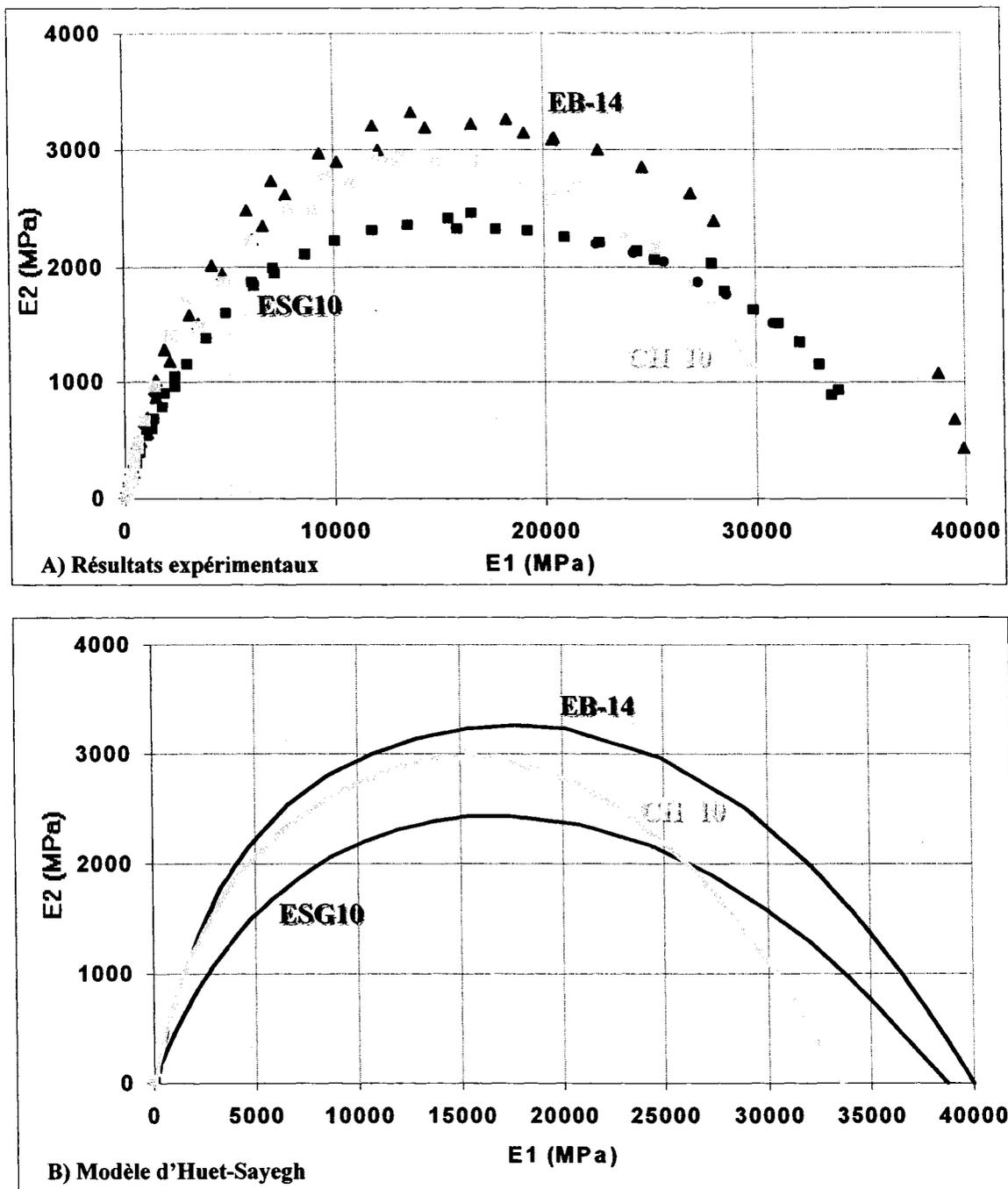


Figure 40 Représentation dans le plan Cole-Cole des résultats expérimentaux obtenus pour les 3 enrobés étudiés et des courbes obtenues de l'application du modèle d'Huet-sayegh (\varnothing 80 mm X 120 mm; traction/compression alternée ($\varepsilon_{\text{MOYEN}}=0$))

3.4.3 Essais à basse température TSRST

Le fondement de l'essai de retrait thermique empêché consiste à empêcher la déformation d'une éprouvette d'enrobé bitumineux de Φ 60 mm et de 250 mm de longueur sous l'effet d'un taux de refroidissement constant (10 °C/hr). L'essai a été réalisé suivant la norme AASHTO TP10-93 « Standard Test Method for Thermal Stress Restrained Specimen Tensile Strength ».

L'essai TSRST a été effectué sur l'enrobé ESG-10, EB-14 et CH-10. la moyenne de trois essais et présentée dans le Tableau XVIII et les courbes présentant l'évolution de la contrainte au sein de l'éprouvette en cours de refroidissement est illustrée à la Figure 41.

Tableau XVIII

Données recueillies lors de l'essai TSRST

	T° de transition tangente	T° de transition bissectrice	Contrainte maximale de rupture	T° associée à la contrainte maximale	PG-bitume
	(°C)	(°C)	MPa	(°C)	
ESG-10	-15,52	-9,87	3,42	-27,36	70-28
EB-14	-26,94	-17,76	6,45	-37,05	58-28
CH-10	-28,59	-20,83	5,39	-34,57	70-34

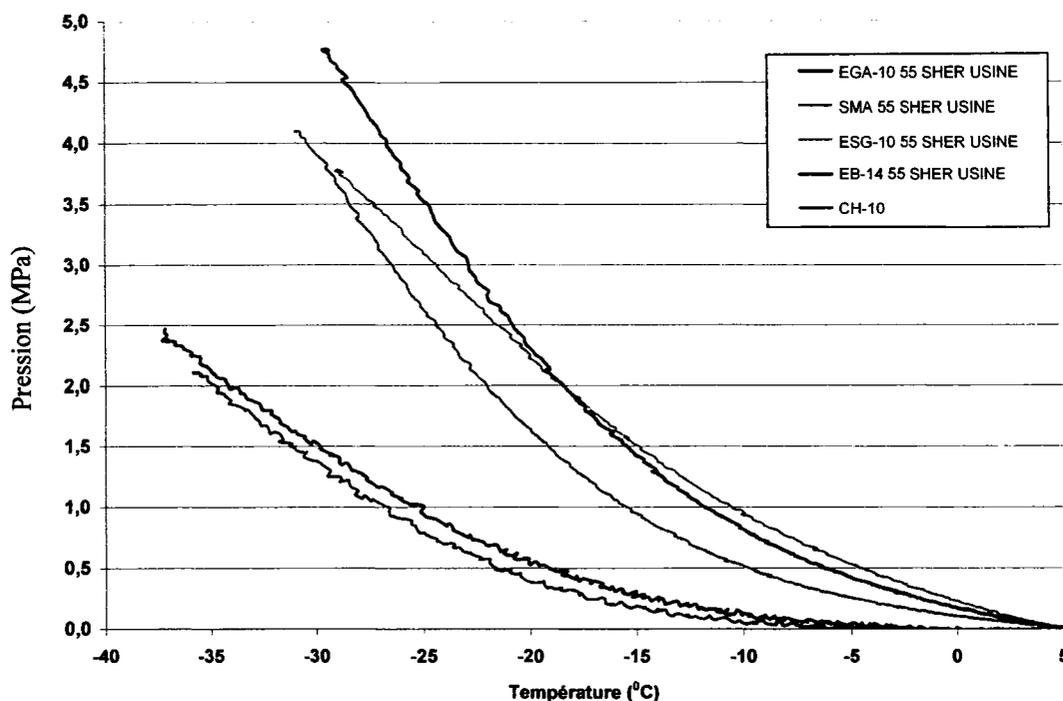


Figure 41 Résultats de l'essai TSRST

3.4.4 Mesure du coefficient de dilatation thermique

L'essai pour mesurer le coefficient de dilatation thermique est réalisé suite à un conditionnement d'une éprouvette Φ 80 mm et de 120 mm de longueur sur une période de 2 heures à 20 °C. Durant cette période de conditionnement, la force appliquée à l'éprouvette est maintenue à 0. Par la suite, la température est abaissée de 2 °C / heure et dilatation du matériau est étudiée à l'aide de jauges collées sur chaque éprouvette et d'une éprouvette témoin de silicate de titane. Le silicate de titane a la propriété de posséder un coefficient de dilatation thermique pratiquement nul (0,03 microdef/°C).

La déformation réelle d'une éprouvette est obtenue, en soustrayant de la valeur obtenue des jauges collées sur l'éprouvette (Figure 42), la valeur obtenue par la jauge de référence du silicate de titane.

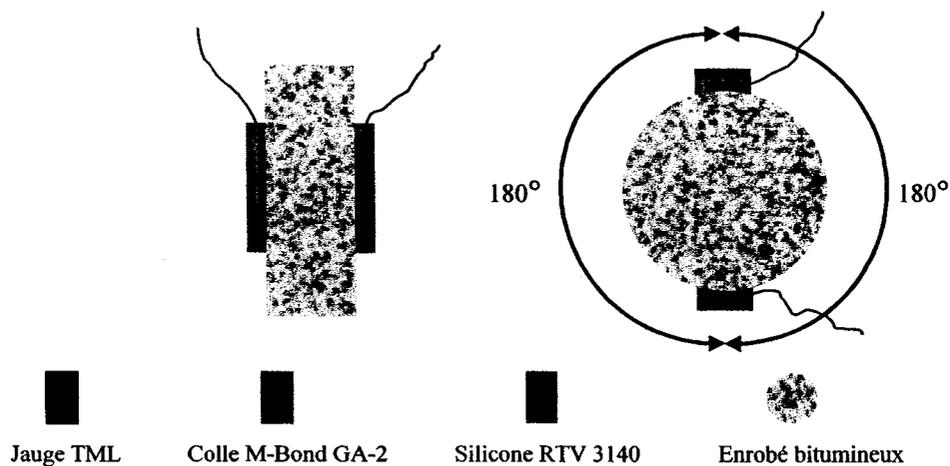


Figure 42 Schématisation des éprouvettes pour l'essai de coefficient de dilatation thermique

Les plateaux de température étudiés sont à +20, +10, 0, -10, -20, -30 et -40 °C. Entre chaque plateau, la température est abaissée suivant un taux de refroidissement de 2 °C / heure et maintenue à ce plateau pour une période de 2 heures. La Figure 43 illustre la variation typique de température à laquelle une éprouvette est soumise. L'acquisition débute après la période de conditionnement de 2 heures. L'essai se termine par une remontée de la température à 20 °C avec un taux de réchauffement de 10 °C / heure.

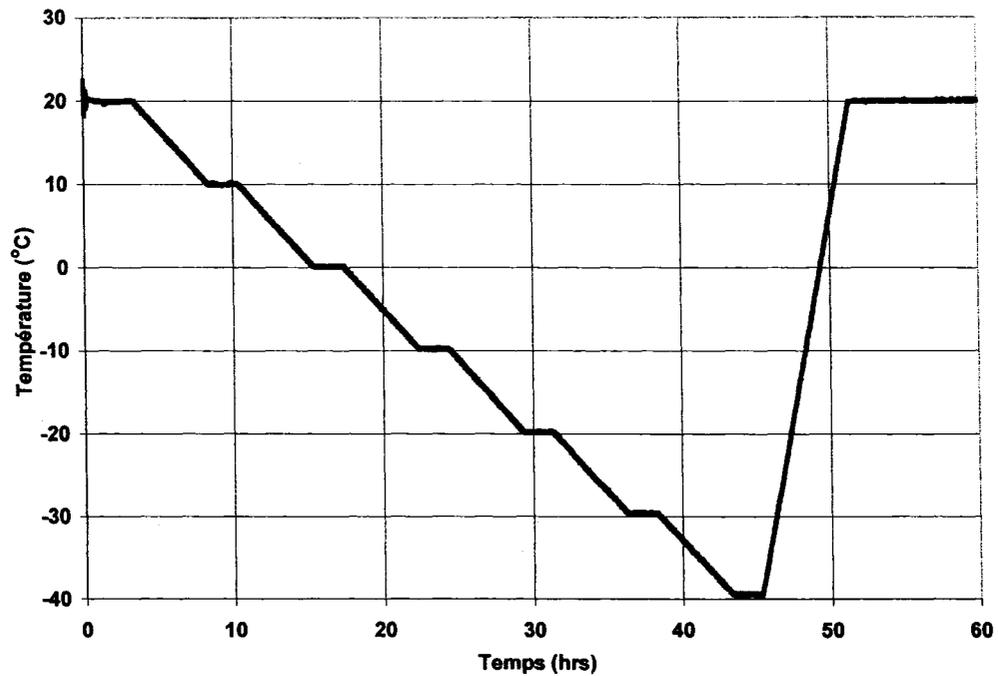


Figure 43 Variations typiques des températures pour laquelle une éprouvette est soumise durant l'essai visant à mesurer le coefficient de dilatation thermique

Les résultats obtenus pour l'essai de coefficient de dilatation thermique sont illustrés dans le Tableau XIX et à la Figure 44.

Tableau XIX

Résultats des coefficients de dilatation thermique en fonction de la température

Enrobé	Bitume	Coefficients de dilatation thermique (μ strain)			
		à -5°C	à -15°C	à -25°C	à -35°C
EB-10S	PG 58-34	20,38	18,85	17,00	4,38
EB-14	PG 58-28	24,98	22,47	20,81	16,99
CH-10	PG 70-34	24,96	23,75	23,27	9,00
ESG-10	PG 70-28	22,96	20,68	19,24	15,82

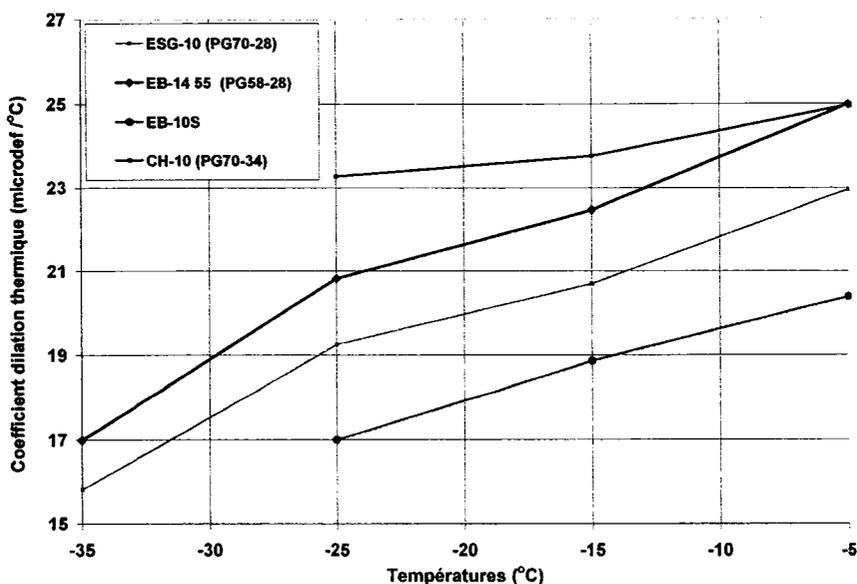


Figure 44 Résultats des coefficients de dilation thermique

3.5 Confection des corps d'épreuve

Les corps d'épreuve sont mis en œuvre suivant plusieurs séquences. La fabrication est assurée à partir du compacteur de plaques MLPC. Les photographies présentées à la Figure 58 illustrent le corps d'épreuve en cours et après préparation.

Globalement, la confection du corps d'épreuve vise à reproduire en laboratoire, en conditions contrôlées, la couche de base fissurée (le substrat), laquelle est constituée de 2 plaques d'enrobé EB-14 disposées sur deux plaquettes d'acier suivant un espacement de 5mm pré-établi, représentant la largeur de la fissure du substrat. Étant donné que les plaques de base en enrobé EB-14 sont compactées en laboratoire, l'épaisseur de ces plaques a été fixée à l'épaisseur minimale de mise en œuvre de l'enrobé EB-14 sur route, soit une épaisseur de 55 mm. Pour assurer une adhérence comparable aux surfaces usées en chantier, la surface de EB-14 est nettoyée au jet de sable et recouverte d'un agent de liaison suivant le dosage requis par le CCDG du MTQ (taux résiduel de 0,25 kg/m²). L'enrobé de resurfaçage est compacté normalement sur le substrat à l'aide du

compacteur de plaque MLPC. Après compactage de la couche de resurfaçage, la dimension de l'éprouvette est celle correspondante à une plaque d'ornièreur : 180x500 mm² et dont l'épaisseur sera différente suivant le plan d'expérience mis en œuvre (resurfaçage de 55mm et/ou 100mm).

En définitive, la confection d'un corps d'épreuve nécessite différentes séquences, lesquelles sont détaillées dans l'Annexe 8.

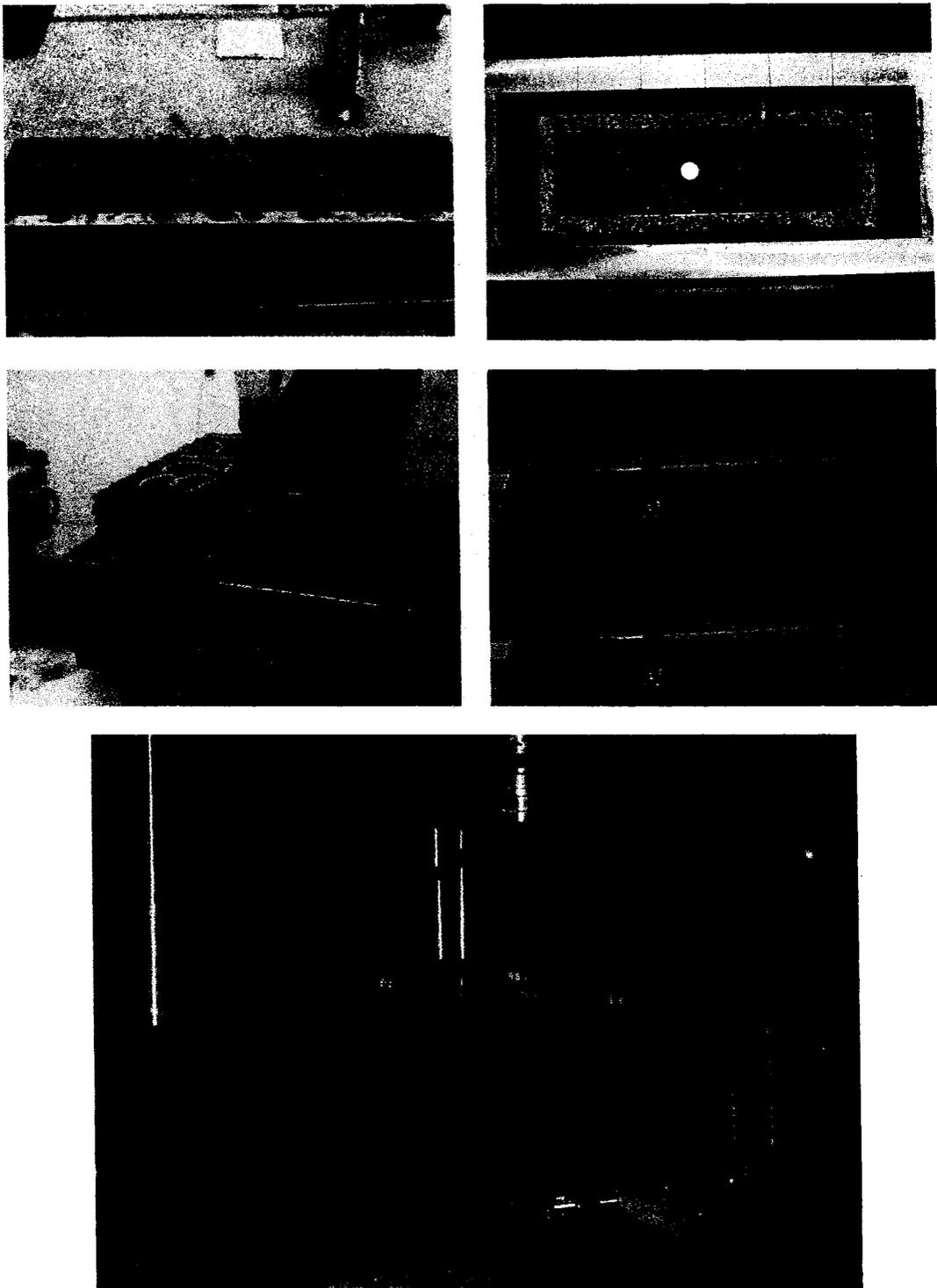


Figure 45 Corps d'épreuve en cours et après préparation

3.5.1 Rugosité de surface des substrats

La qualité d'adhérence du resurfaçage du substrat est directement tributaire de la propreté et de la rugosité de la surface du substrat : la présence d'huile ou d'éléments gras nuit à l'adhérence du liant d'accrochage au substrat et par conséquent, l'arrachement du resurfaçage est probant.

La confection de plaquettes d'enrobé à l'aide d'un compacteur de plaque va permettre d'obtenir une texture superficielle comparable entre les éléments pour obtenir une comparaison juste des différents systèmes de resurfaçage. À cet effet, étant donné qu'il est usuel d'appliquer des agents anti-adhérent sur le pneumatique du compacteur de plaques, ce dernier va nuire à l'adhérence de l'agent d'accrochage au substrat. Dans ce contexte, la procédure établie pour la préparation des plaquettes de « substrat » prévoit un nettoyage au jet de sable de la surface d'interface substrat-resurfaçage. Cependant, cette intervention peut conduire à des rugosités variables de la texture superficielle des plaquettes de substrat. Pour s'assurer de l'homogénéité de la rugosité superficielle des plaquettes de bases fissurées, des mesures de la rugosité de surface ont été faites à l'aide d'un pendule de frottement.

L'essai est utilisé pour déterminer la résistance d'une surface au dérapage. Le principe est de fournir une mesure relative caractérisant l'état limite de polissage des granulats sous le trafic routier (la résistance au polissage d'un matériau est quantifiée par son coefficient de polissage par projection, appelé aussi sa valeur CPP).

Le procédé est simple et il est présenté dans l'Annexe 7.

Le résultat de l'essai est la moyenne, arrondie au centième près, des valeurs CPP des éprouvettes de l'échantillon. Le tableau XX montre un résultat type de ces mesures.

Tableau XX

Relevé des mesures de rugosité

Lâcher Point	1	2	3	4	5	Moyenne	Moyenne générale des lectures
1	79	75	74	73	73	74,8	
2	77	75	73	73	72	74	
3	69	66	65	64	63	65,4	
4	94	91	89	87	87	89,6	76

Températures :

Eau : 22°C

Air : 24°C

La valeur CPP = 1,3