

Ref
TE250
M419f
IRC

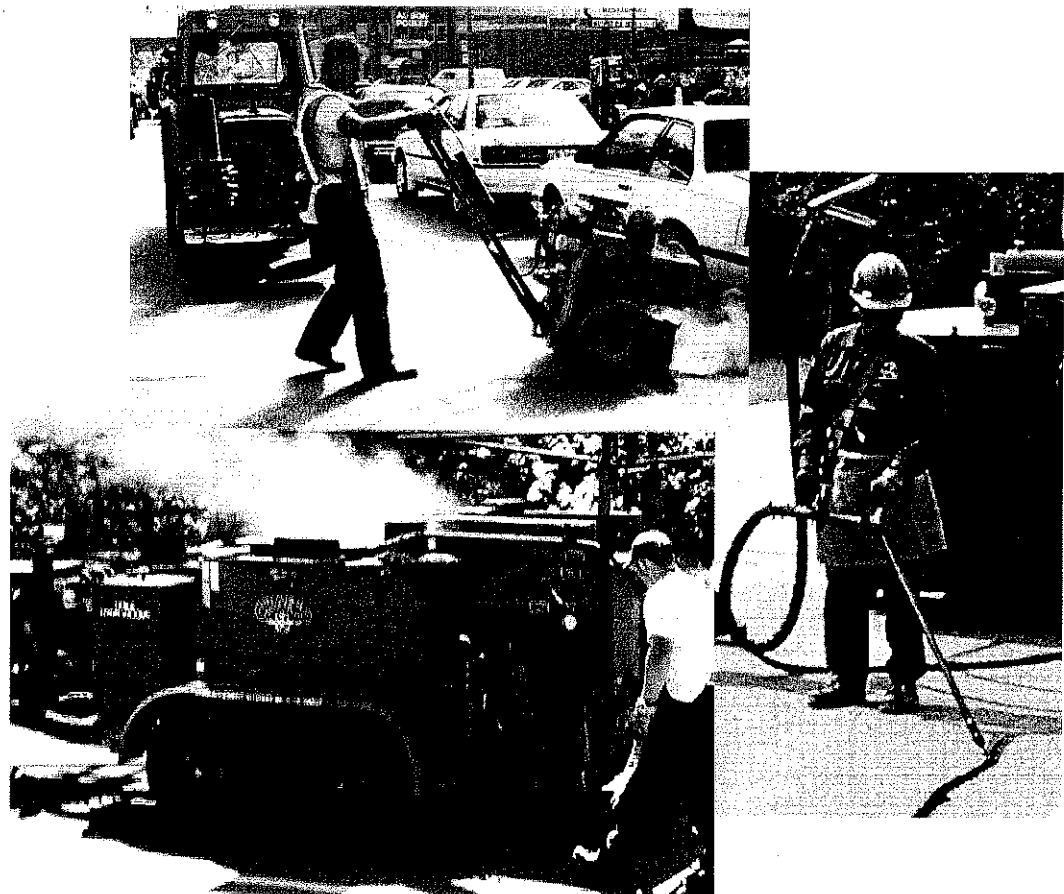


Conseil national
de recherches Canada

National Research
Council Canada

CMRC-NRC

Le scellement des fissures dans les chaussées urbaines



Le scellement des fissures dans les chaussées urbaines

Jean-François Masson, Ph. D.

Publié par
Institut de recherche en construction
Conseil national de recherches Canada
Ottawa, Canada K1A 0R6

© Conseil national de recherches Canada
Août 1997
ISBN 0-660-95694-2
NRCC 41098F

12

617923724

Canada Institute for Scientific
and Technical Information
National Research Council
Canada
Institut canadien de
l'information scientifique et
technique
Conseil national de recherches
Canada

Ref

TE250

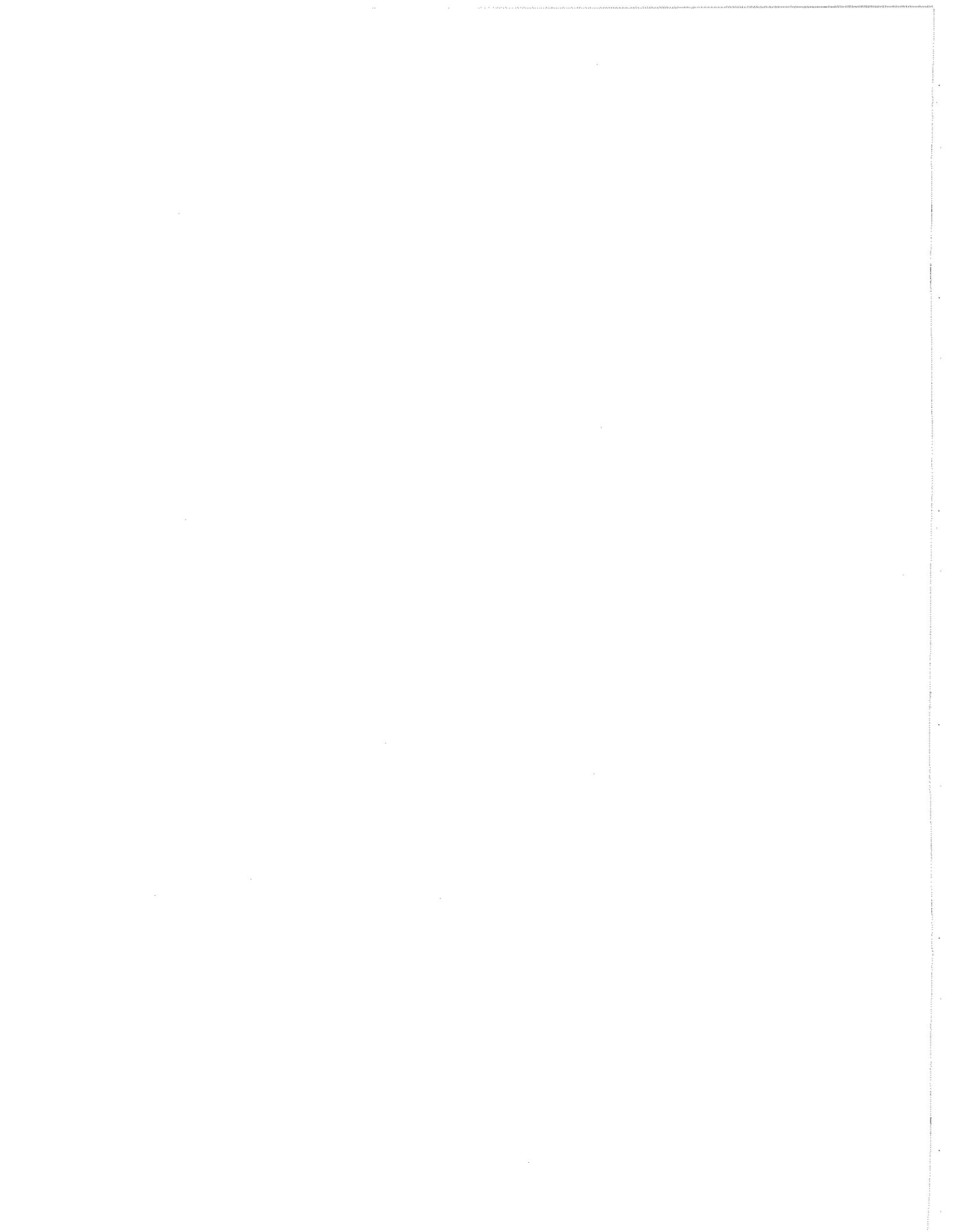
M419f

IRC



TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
INTRODUCTION	1
PARTICULARITÉS DES MILIEUX URBAINS FROIDS	2
LE CHOIX D'UN BOUCHE-FISSURES	2
Essais sur le terrain	2
Éléments agissant sur la performance du bouche-fissures	5
Essais normalisés	7
LA MISE EN OEUVRE	9
La température dans le fondoir	9
Comportement des bouche-fissures	10
<i>Effets de la chaleur sur la viscosité</i>	10
<i>Effets de la chaleur sur les constituants du bouche-fissures</i>	13
Performance et chauffage	15
LE TEMPS PROPICE AUX TRAVAUX	16
L'ÉQUIPEMENT	18
Effets de la fraiseuse sur le béton bitumineux	18
Effets de la lance thermopneumatique sur le béton bitumineux	21
<i>Profil de température</i>	21
<i>Béton bitumineux sec</i>	22
<i>Béton bitumineux humide</i>	25
<i>Effet du granulat</i>	26
MÉTHODE D'APPLICATION RECOMMANDÉE	27
ANNEXES	29
A. Mise en oeuvre des bouche-fissures et mesure de leur performance	29
B. Essais en laboratoire	31

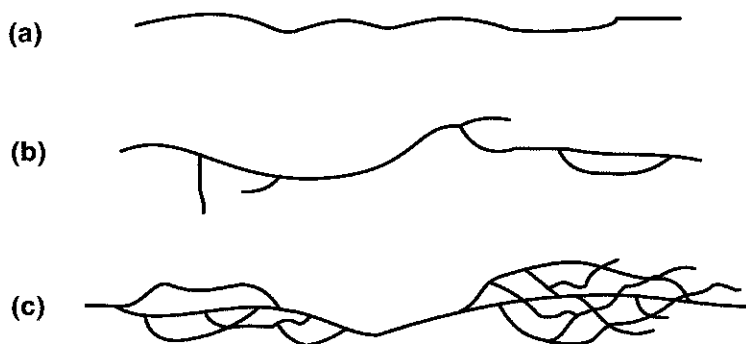


PRÉFACE

Depuis quelques années, le scellement des fissures a gagné en popularité. Cette popularité est bien méritée car le scellement des fissures permet de ralentir la progression des défauts de la chaussée. On estime qu'un produit de scellement peut durer plus de cinq ans et prolonger la durée de vie d'une chaussée d'au moins deux ans. À moyen et long termes, cette plus grande durée de vie se traduit par une économie de deniers publics.

Il faut toutefois prendre du recul face à la popularité de la méthode, s'arrêter devant ces fissures et se demander si le scellement des fissures est une technique ayant atteint sa pleine maturité et si elle est appliquée avec discernement. La réponse est *non* dans les deux cas. On continue à traiter des chaussées en mauvais état. En outre, quand le traitement est approprié, le bouche-fissures peut quand même s'avérer inefficace seulement deux ou trois ans après l'installation. Le scellement des fissures reste donc une technique en évolution.

Cet ouvrage s'attarde au scellement des fissures appliqué aux chaussées urbaines *aptès* à ce type d'entretien préventif. C'est dire que la méthode s'applique aux chaussées jeunes et en bon état et que seules les fissures franches et peu ramifiées devraient être scellées (a et b dans la figure ci-bas). On jette ici un regard critique sur la technique. Cette critique est basée sur des travaux du Conseil national de recherches du Canada effectués entre 1990 et 1997. Plusieurs de ces travaux ont été entrepris en collaboration avec la Ville de Montréal, Transports Canada, le ministère des Transports du Québec et une demi-douzaine d'entrepreneurs du Québec et de l'Ontario oeuvrant en milieu urbain. Nous espérons que cet ouvrage permettra d'améliorer davantage la technique du scellement des fissures en milieu urbain et qu'il bénéficiera aux donneurs d'ouvrage comme aux entrepreneurs.



REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier MM. Jim Gallagher et Henry Knoll pour leur contribution à la préparation de cet ouvrage, et MM. Peter Collins et Gary Polomark pour leur contribution au travail expérimental. Il tient aussi à remercier Transports Canada, la Ville de Montréal et le ministère des Transports du Québec pour leur participation à ces travaux.

INTRODUCTION

Le but de cet ouvrage est d'aider l'ingénieur municipal à répondre à deux questions :

- Comment choisir le bouche-fissures qui restera en place sans décoller pendant 5 ans ou plus en milieu urbain nordique?
- Quelle est la méthode de mise en oeuvre qui me permettra d'obtenir la performance attendue?

Dans toutes les grandes villes nord-américaines, on utilise diverses méthodes d'entretien des revêtements routiers dans le but de prolonger leur durée de vie. Les mesures comme le scellement des fissures constituent souvent l'approche présentant le meilleur rapport coût-efficacité (figure 1). On estime que pour chaque mètre de chaussée traitée, il n'en coûte que 1 \$ pour sceller les fissures, comparativement à 15 \$ pour le rapiéçage et à 45 \$ pour la reconstruction. Par conséquent, le scellement des fissures devrait être l'entretien prioritaire des responsables du génie municipal.

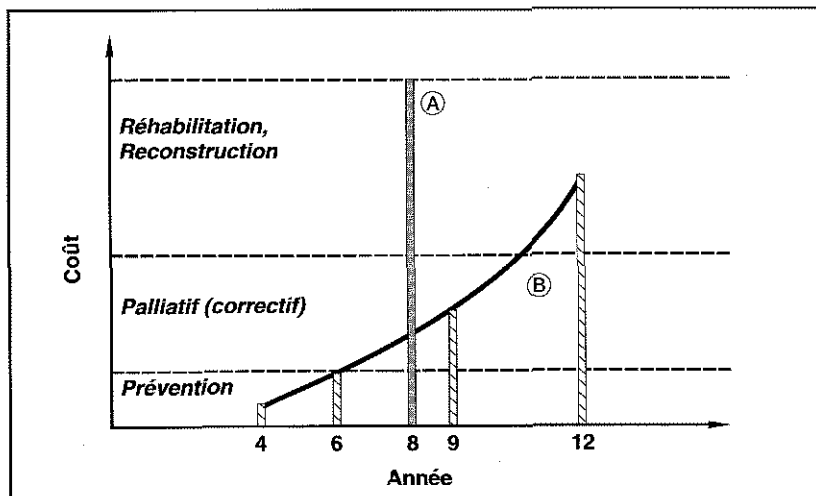


Figure 1. Un entretien préventif comme le scellement des fissures permet de retarder la dégradation de la chaussée. Un scellement périodique à 4 et 6 ans et un rapiéçage à 9 ans peuvent, par exemple, retarder une réhabilitation importante jusqu'à 12 ans (B). Les coûts restent ainsi plus bas que ceux engendrés par une reconstruction (A). (Tiré de *Guide de construction et d'entretien des chaussées*, par G. R. Tessier. AQTR, 1990. Avec permission).

Le scellement des fissures peut être très simple : on nettoie la fissure à l'air comprimé et on la remplit de bouche-fissures. Cette méthode présente plusieurs avantages : elle est rapide, économique, consomme peu de bouche-fissures et requiert des petites équipes de travail. Le comté de Napierville, au Québec, utilise cette méthode avec succès. Chaque printemps, alors que beaucoup de fissures sont nouvelles, les équipes d'entretien y calfeutrent toutes les fissures du réseau routier. Ici, nul besoin d'un bouche-fissures exceptionnel capable de durer plusieurs années, puisqu'on intervient annuellement. Cette méthode est idéale pour les petits territoires ayant des chaussées bien drainées et des fissures peu actives. Mais la méthode se prête difficilement à un territoire plus étendu où les fissures sont plus vieilles et où on intervient peu. Montréal est l'exemple type. Dans de tels cas, on procède différemment:

1. on élargit la fissure par fraisage;
2. on recueille la poussière produite par le fraisage à l'aide d'un balai mécanique et d'un aspirateur;
3. on chauffe et assèche la fraisure à l'aide d'une lance thermopneumatique;
4. on coule le bouche-fissures chaud dans la fraisure;
5. on recouvre le bouche-fissures de sable fin ou de ciment Portland pour éviter l'adhérence aux pneumatiques;
6. enfin, on détourne la circulation jusqu'à ce que le bouche-fissures ait durci (environ 30 minutes).

Pour une plus grande efficacité, un bouche-fissures devrait rester collé sur presque toute sa longueur durant cinq ans ou, à tout le moins, jusqu'à ce qu'on puisse sceller à nouveau les fissures, c'est-à-dire jusqu'à ce que toutes les fissures d'une ville aptes au scellement aient été traitées. Malheureusement, la durabilité des bouche-fissures est souvent inférieure à cinq ans.

La performance des bouche-fissures peut être fonction tant de leurs caractéristiques que des

méthodes de mise en oeuvre. La norme ASTM D3405, sur laquelle s'appuie actuellement l'ingénieur pour choisir les bouche-fissures, ne permet pas toujours de prévoir la performance des bouche-fissures dans des conditions urbaines froides. De fait, pour choisir un bouche-fissures destiné à un climat froid, on utilise parfois des essais sur le terrain d'une durée d'un an au lieu de s'appuyer sur la norme ASTM D3405. D'autres utilisent une norme ASTM modifiée ou élargie. Quoi qu'il en soit, le choix d'un bouche-fissures destiné à un climat froid demeure une tâche difficile. Il est tout aussi difficile de trouver une méthode de mise en oeuvre appropriée. Par « appropriée », on entend une méthode où les particularités des milieux urbains froids ont été pleinement prises en considération. Malgré plusieurs études portant sur l'évaluation des bouche-fissures, rares sont celles qui portent sur la performance à basse température, et encore plus rares sont celles qui traitent de la performance en milieu urbain froid.

PARTICULARITÉS DES MILIEUX URBAINS FROIDS

Les bouche-fissures utilisés dans les villes exposées à un climat arctique ou subarctique, ce qui est le cas de la plupart des villes du Canada et du nord des États-Unis, doivent être capables de supporter des contraintes inhabituelles. Les températures hivernales peuvent rendre le bouche-fissures inélastique; dans ces conditions, il ne peut plus s'étirer et suivre l'ouverture des fissures induites par l'arrivée de l'hiver. Le bouche-fissures décolle alors des parois de la fissure. Par conséquent, l'eau, le sel, le sable et le gravier peuvent y pénétrer. À ce stade, le bouche-fissures a irrévocablement perdu de son efficacité. En milieu urbain, l'utilisation de bouche-fissures pose un problème particulier. Ceux-ci doivent subir une forte contrainte quand les véhicules tournent, freinent ou accélèrent. La circulation est aussi plus lente. Par conséquent, les bouche-fissures sont exposés en milieu urbain à des contraintes inconnues sur les voies rapides.

LE CHOIX D'UN BOUCHE-FISSURES

En général, on choisit un bouche-fissures sur la base d'essais sur le terrain ou en laboratoire. Examinons ces deux méthodes et comparons leurs particularités.

Essais sur le terrain

Lors de travaux avec la Ville de Montréal, nous avons mesuré le décollement et l'arrachement de 12 bouche-fissures sur une période de quatre ans. Durant cette période, les températures minimales ont varié entre -33 et -40 °C et les températures maximales entre +35 et +44 °C. (On trouvera au tableau 1 la liste des bouche-fissures évalués, chaque bouche-fissures étant subséquentement identifié par une lettre). Pour la mise en oeuvre, on a coulé les bouche-fissures dans des fraises de 12 x 12 mm², 19 x 19 mm² et 40 x 40 mm² (largeur et profondeur). On trouvera à l'annexe A une description détaillée des travaux.

Tableau 1. Bouche-fissures étudiés à Montréal*

Mastic	Fabricant	Origine
Beram 195	McAsphalt	Canada
Bakelite 590-13A	Bakor	Canada
Husky 1074	Husky Oil	Canada
Husky 1627	Husky Oil	Canada
Superflex 100	Bitumar	Canada
Hi-spec	W.R. Meadows	É-U
Sof-seal**	W.R. Meadows	É-U
Roadsaver 522	Crafco	É-U
Roadsaver 221	Crafco	É-U
Sealz 6165	Hydrotech	É-U
Flexochape J	Beugnet	France
Pertex	Esha	Hollande

* Produits réputés satisfaire ou dépasser la norme ASTM D3405

** Produit réputé satisfaire ou dépasser la norme ASTM D1190

Après trois mois de service et une exposition à des températures de -5 °C, aucun des bouche-fissures n'avait arraché mais ils avaient tous commencé à décoller (tableau 2). Après leur exposition à des températures de -35 °C pendant le premier hiver, tous les produits ont montré une augmentation du décollement et de l'arrachement.

Tableau 2. Pourcentage de la longueur des bouche-fissures s'étant arrachée et décollée, tel que mesuré avant et après un premier hiver de service

Produit ¹	Avant ²		Après ³	
	décollement	arrachement	décollement	arrachement
A	1	<1	12	9
B	5	<1	5	<1
C	15	<1	26	16
D	7	<1	10	1
E	1	<1	11	1
F	2	<1	19	4
G	3	<1	24	3
H	7	<1	13	2
J	1	<1	8	6
K	2	1	2	2
L	1	<1	8	3
M	<1	<1	7	2

¹ L'ordre alphabétique ne correspond pas à celui du tableau 2.1.

² 3 mois de service

³ 7 mois de service

Tableau 3. Pourcentage de la longueur de décollement des bouche-fissures tel que mesuré à Montréal après quatre hivers

Produit ¹	Fraisures transversales			Fraisures longitudinales			Orientations mixtes			Rain. T ²	Rain. L ²	Moy. pond. ³
	12	19	40	12	19	40	12	19	40			
A	14	16	17	4	6	9	7	10	14	16	6	11
B	22	22	31	13	21	15	16	21	24	27	17	22
C ⁴	32	29	35	18	6	9	26	24	27	32	13	26
D	20	25	33	12	16	23	15	20	30	28	16	22
E	12	16	31	3	13	24	9	14	28	24	15	20
F	19	16	19	8	9	22	14	13	19	17	10	15
G	30	42	47	30	29	32	30	36	40	41	31	36
H	16	9	20	0	6	5	13	8	15	12	6	9
J	15	13	17	7	5	6	14	11	16	15	7	13
K	29	36	27	8	9	26	17	24	27	31	9	21
L	10	8	7	3	5	6	7	5	7	9	4	6
M	19	19	21	12	11	16	15	14	17	20	13	16

¹ L'ordre alphabétique ne correspond pas à celui du tableau 2.1.

² T : transversales; L : longitudinales.

³ Moy. pond. : Moyenne pondérée calculée à partir des longueurs de défaillance des produits dans toutes les fraisures et les orientations.

⁴ Résultats après le premier hiver, contrôle interrompu par la suite.

Tableau 4. Pourcentage de la longueur d'arrachement des bouche-fissures tel que mesuré à Montréal après quatre hivers

Produit ¹	Fraisures transversales			Fraisures longitudinales			Orientations mixtes			Rain. T ²	Rain. L ²	Moy. pond. ³
	12	19	40	12	19	40	12	19	40			
A	19	15	20	4	12	15	9	13	18	18	10	14
B	0	2	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1
C ⁴	31	19	14	6	1	3	21	16	11	21	4	16
D	3	12	6	4	3	5	3	7	6	8	4	6
E	5	1	4	1	0	1	3	1	3	3	1	2
F	11	9	3	6	4	20	9	4	5	5	6	5
G	17	7	30	8	9	15	13	8	24	18	10	14
H	10	5	10	0	1	1	8	3	7	6	1	4
J	18	10	15	3	7	6	15	9	14	14	6	12
K	9	24	5	3	5	12	5	16	16	13	9	11
L	7	4	2	0	16	0	4	14	1	5	12	10
M	3	5	11	1	4	2	2	5	5	8	3	5

¹ L'ordre alphabétique ne correspond pas à celui du tableau 2.1.

² T : transversales; L : longitudinales.

³ Moy. pond. : Moyenne pondérée calculée à partir des longueurs de défaillance des produits dans toutes les fraisures et les orientations.

⁴ Résultats après le premier hiver, contrôle interrompu par la suite.

La détérioration des bouche-fissures s'est ensuite poursuivie. Les relevés des quatre printemps suivants ont montré que les pourcentages de décollement et d'arrachement avaient augmenté considérablement pendant l'hiver. Les tableaux 2 à 4 donnent les pourcentages de décollement et d'arrachement après les premier et quatrième hivers de service.

Comme les bouche-fissures vieillissent et durcissent avec le temps, ils peuvent perdre leur élasticité encore davantage à basse température. Par conséquent, il est difficile de prévoir leur performance à long terme en se basant sur les défaillances mesurées après une seule année, alors que les produits sont encore relativement jeunes. Il est préférable d'évaluer la performance à long terme des bouche-fissures en se basant sur les niveaux de défaillance (décollement et arrachement) après quatre années de service ou plus.

À cette fin, on peut établir un « indice de performance » à l'aide de l'équation suivante :

$$I_p = 100 - (D + nP)$$

où

- I_p = indice de performance du bouche-fissures
- D = longueur de décollement du produit en pourcentage
- P = longueur d'arrachement, en pourcentage
- n = facteur entier de pondération de l'arrachement¹

Il est raisonnable de poser $n = 4$, compte tenu du fait que l'absence de bouche-fissures sur une longueur de 1 mètre peut permettre :

- la pénétration, dans la fissure, de sable et de cailloux susceptibles d'endommager le revêtement au moment de la fermeture des fissures en été;

¹ La simple addition des niveaux d'arrachement et de décollement supposerait que les deux types de défaut endommagent également le revêtement (ce qui n'est pas le cas) et, ainsi, sous-estimerait l'effet de l'arrachement sur la dégradation du revêtement. Il faut donc accorder plus de poids à la longueur d'arrachement qu'à la longueur de décollement dans le calcul d'un indice de performance.

Tableau 5. Bouche-fissures par ordre décroissant de performance

Produit	Décollement	Arrachement	Indice de performance	Performance sur 4 ans
H	9	4	75	bonne
B	22	1	74	
E	20	2	72	
F	15	5	65	moyenne
M	16	5	64	
L	6	10	54	
D	22	6	54	
J	13	12	39	mauvaise
K	21	11	35	
A	11	14	33	
C	26	16	10	très mauvaise
G	36	14	8	

- la pénétration, dans la fissure, d'une quantité d'eau plus grande que dans le cas d'un simple décollement du produit sur la même longueur.

Cette approche est certes simpliste et le choix de n est arbitraire, mais elle permet de bien apprécier la performance des bouche-fissures et de comparer facilement les performances. (Les valeurs de $n < 4$ permettent un classement comparable des matériaux, mais l'écart des I_p entre les différents bouche-fissures est alors réduit.) On trouve au tableau 5 l'indice de performance des différents bouche-fissures.

Éléments agissant sur la performance du bouche-fissures

Les résultats des relevés montrent que la performance et la durabilité des bouche-fissures peuvent être influencées par l'orientation et le rapport largeur/hauteur (L/H) de la fraisure dans laquelle le bouche-fissures est appliqué (tableaux 3 et 4).

Orientation des fissures. On a observé dans tous les cas que les bouche-fissures des fissures transversales montraient davantage de défaillance que ceux des fissures longitudinales (tableaux 3 et 4). Comme les fissures transversales s'ouvrent plus que les fissures longitudinales (tableau 6, colonnes 3 et 7), les trois types de fraisure montrent cette même tendance.

Géométrie de la fraisure. La méthode de scellement des fissures utilisée aujourd'hui dans les villes exposées à un climat froid est le

résultat de l'évolution de la technique au cours des 30 dernières années. Au départ, on se contentait de nettoyer la fissure à l'air comprimé avant de la remplir de bouche-fissures. La géométrie ainsi produite est illustrée à la figure 2a. Une variante de cette méthode consistait à ponter la fissure

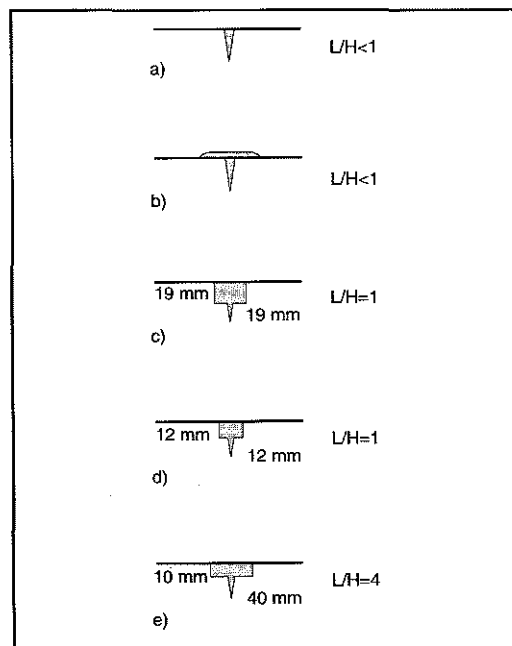


Figure 2. Géométries du bouche-fissures sans fraisure (a et b) et avec fraisure (c à e). Quand la hauteur du bouche-fissures est plus grande que sa largeur ($L/H < 1$) et que la fissure est dynamique, les forces de traction à l'interface sont plus importantes que lorsque le bouche-fissures est coulé dans une fraisure où $L/H \geq 1$.

Tableau 6. Ouverture annuelle des fraises dans un revêtement bitumineux reposant sur un béton hydraulique

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Site	Larg. rain. (mm)	Orientation ¹	Ouv. min. ² (mm)	Ouv. max. ² (mm)	Écart max. ³ (mm)	Ouv. moy. ⁴ (mm)	Ouv. moy. ⁵ (mm)	% ouv. ⁶
1	12	+	-0.17	0.63	0.80			
7	12	+	-0.24	1.25	1.49	1.82		
14	12	+	-0.54	0.81	1.35			
29	12	+	-1.29	1.61	2.90			
35	12	+	-0.68	1.89	2.57		1.73	14
2	12	//	-0.00	1.24	1.24			
9	12	//	-0.24	0.66	0.90			
28	12	//	-0.95	0.99	1.94	1.62		
32	12	//	-0.24	2.17	2.41			
10	19	+	-0.74	2.06	2.80			
18	19	+	-1.04	2.47	3.51	3.09		
19	19	+	-0.53	1.81	2.34			
22	19	+	-0.71	1.97	2.68		2.83	15
31	19	+	-1.65	2.81	4.46			
34	19	+	-0.40	2.33	2.73			
3	19	//	-0.33	1.70	2.03	2.06		
5	19	//	-0.55	1.54	2.09			
4	40	+	-0.40	3.37	3.77			
8	40	+	-0.63	3.79	4.42	3.62		
13	40	+	-0.37	2.50	2.87			
17	40	+	-1.39	1.57	2.96			
20	40	+	-0.41	2.98	3.39		3.41	8
24	40	+	-0.91	3.40	4.31			
12	40	//	-1.12	1.25	2.37	2.79		
15	40	//	-1.12	2.60	3.21			

¹ + fraisure transversale; // fraisure longitudinale.

² Depuis l'ouverture le 23 avril 1992, résultat d'une température hebdomadaire moyenne de 7 °C.

³ Écart entre ouvertures minimale et maximale.

⁴ Moyenne selon l'orientation et la largeur de la fraisure.

⁵ Moyenne selon les dimensions de la fraisure.

⁶ Ouverture maximale en pourcentage (colonne 8 / colonne 2).

(figure 2b). Dans les deux cas le rapport largeur/hauteur du bouche-fissures est inférieur à 1 ($L/H < 1$). Ces bouche-fissures peuvent assurer le scellement des fissures statiques mais pas celui des fissures dynamiques, dans les chaussées nordiques. En raison de l'amplitude élevée du mouvement cyclique des fissures de ces chaussées, on observe rapidement une défaillance des bouche-fissures dont le rapport $L/H < 1$.

D'après des modèles mathématiques, la performance des bouche-fissures peut être améliorée si le produit a une géométrie telle que $L/H > 1$. En effet, lorsque le rapport L/H augmente, les contraintes de traction à l'interface bouche-fissures/béton bitumineux diminuent. C'est sur la base de ces prédictions

de performance qu'on utilise aujourd'hui une fraiseuse pour élargir et normaliser la géométrie des fissures. Suite à l'alignement des fraises sous la fraiseuse (figure 3), la géométrie d'une fissure passe ainsi de $L/H < 1$ à $L/H = 1$ et $L/H \approx 4$ puisque les fraises de $12 \times 12 \text{ mm}^2$, $19 \times 19 \text{ mm}^2$ et $40 \times 10 \text{ mm}^2$ sont les plus communes. A cause des tractions à l'interface bouche-fissures/béton bitumineux, on s'attend à ce que les bouche-fissures de $40 \times 10 \text{ mm}^2$ montrent une meilleure performance que les bouche-fissures de $12 \times 12 \text{ mm}^2$ ou de $19 \times 19 \text{ mm}^2$.

En milieu urbain froid, et contre toute attente, la performance des bouche-fissures de $40 \times 10 \text{ mm}^2$ s'est montrée inférieure à ceux de $19 \times 19 \text{ mm}^2$ ou de $12 \times 12 \text{ mm}^2$ (tableau 7), la

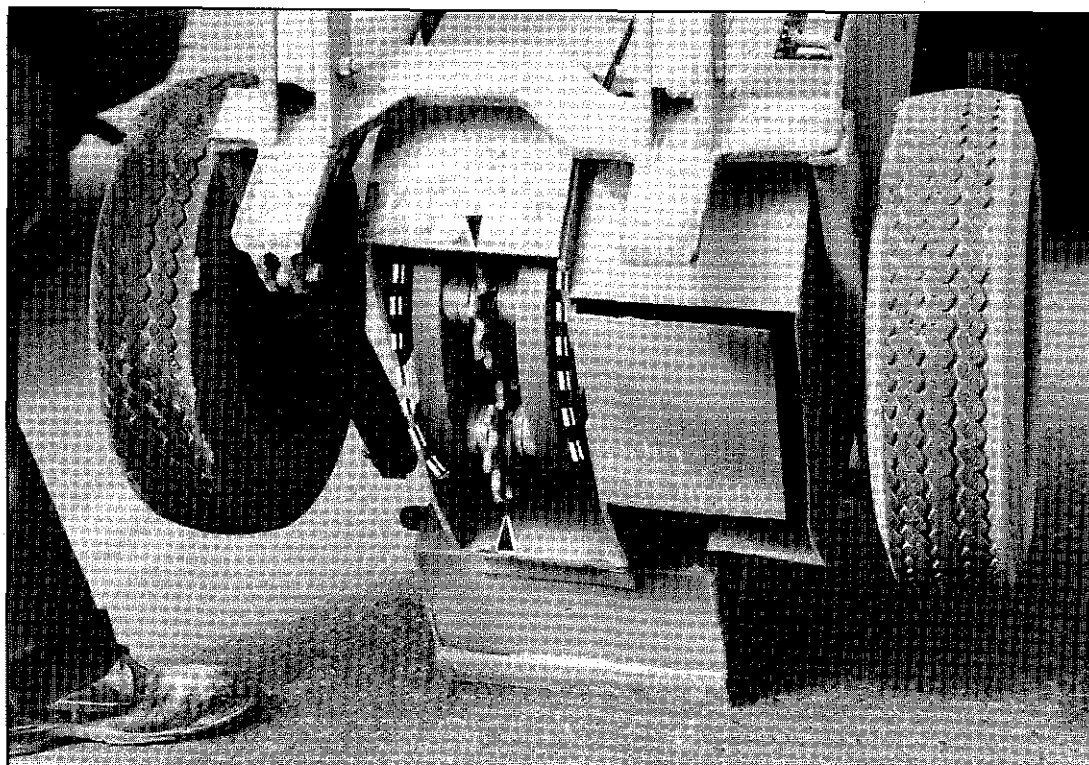


Figure 3. Vue des couteaux (voyez les flèches) sous une fraiseuse à impact

Tableau 7. Fréquence de défaillance dans les différentes fraises

Fraisure (mm x mm)	Décollement			Arrachement		
	faible	moyen	élevé	faible	moyen	élevé
12 x 12	6	5	0	5	2	4
19 x 19	6	6	0	5	2	5
40 x 10	0	0	12	2	4	6

performance des mastics de 12 x 12 mm² étant la meilleure. Selon toute vraisemblance, plus le mastic est large, plus il est exposé à la circulation. Il serait soumis à de plus grandes contraintes de cisaillement. Les risques de décollement du bouche-fissures dans la fraisure de 40 mm de largeur seraient ainsi supérieurs à ceux des fraises de 19 ou de 12 mm. La prise en considération des contraintes de cisaillement à la surface des bouche-fissures permettrait aussi d'expliquer pourquoi le niveau d'arrachement augmente avec la largeur du bouche-fissures (tableau 7).

Essais normalisés

L'évaluation rapide des bouche-fissures et le contrôle de la qualité s'effectuent normalement en soumettant les produits à des essais de pénétration, de fluidité, de résilience et d'adhérence conformément à la norme ASTM D5329 (anciennement D3407). Les résultats des essais doivent se situer dans les limites prescrites par la norme ASTM D3405. Sur les 12 bouche-fissures ayant fait l'objet d'essais sur le terrain, sept ont donné des résultats conformes à ceux prescrits par la norme (tableau 8). Une comparaison des résultats à l'essai normalisé et à l'évaluation

Tableau 8. Résultats des essais normalisés †

Produit	Pénétration (<90 dmm)*, @	Fluidité (<3 mm)*	Résilience (>60%)*	Adhérence (3 cycles)*
A 86	0.5	57	non	
B	68	0.5	64	oui
C	78	0	59	oui
D	67	0.5	62	oui
E	104	1	73	oui
F	122	2	42	oui
G	50	0.5	51	non
H	93	0.5	48	oui
J	66	6	48	oui
L	67	0	64	oui
L	76	0.5	63	oui
M	53	0.5	61	oui

† Les résultats en caractères gras indiquent les résultats contrevenant aux exigences de la norme ASTM D 3405.

* Exigences de la norme

@ 1dmm=0,1 mm

sur le terrain montre toutefois qu'il y a peu de corrélation entre les deux séries de résultats (tableau 9).

La norme a permis de prévoir la mauvaise performance des produits A, C et G. D'autre part, les produits conformes à la norme ASTM D3405 présentaient pour la plupart une performance moyenne après quatre ans (tableau 9). Trois des meilleurs produits sur le terrain, les bouche-fissures E, F et H, n'ont pas satisfait aux essais.

Il s'avère donc que la norme ASTM D3405 ne peut nous guider dans le choix d'un bouche-fissures de qualité, approprié au milieu urbain froid. La norme ne tient pas compte des conditions connexes. Par exemple, aucun des essais n'inclut des températures comprises entre -35 et -40 °C, qui sont pourtant atteintes à travers le Canada chaque hiver, ni ne considère le vieillissement en service ou pendant la mise en oeuvre. On voit aussi au tableau 10 qu'il n'y a pas de corrélation entre la résilience à 25 °C et l'allongement à basse

Tableau 9. Correspondance entre la performance en chantier et les résultats des essais normalisés

Produit	Produit normalisé	Indice de performance	Performance sur 4 ans
H	non	75	
B	oui	74	bonne
E	non	72	
F	non	65	
M	oui	64	
L	oui	54	moyenne
D	non	54	
J	oui	39	
K	oui	35	mauvaise
A	non	33	
C	non	10	
G	non	8	très mauvaise

température, où une bonne élasticité reste essentielle. Cela pourrait expliquer pourquoi les bouche-fissures F et H, efficaces par temps froid, ne satisfont pas à l'essai de résilience. De même, l'essai de pénétration, qui mesure la consistance d'un matériau bitumineux, donne une indication de la viscosité du matériau à 25 °C seulement. Par conséquent, l'utilité de l'essai de pénétration pour caractériser un bouche-fissures est limitée. On ne possède donc aujourd'hui aucune méthode pour choisir un bouche-fissure efficace à long terme. Au mieux, on écarte les pires produits. On verra plus tard comment on pourra pallier cet inconvénient.

Tableau 10. Allongement* et résilience** des bouche-fissures

Produit	ΔL * à -37 °C (%)	Résilience à 25 °C (%)
E	700	73
F	300	42
C	120	59
D	100	62
A	25	57
M	6	61
G	6	51

* selon ASTM D638

** selon ASTM D3405

LA MISE EN OEUVRE

Nous l'avons déjà mentionné, un bouche-fissures peut s'avérer inefficace parce qu'il est mal installé ou parce que l'équipement est inadéquat ou mal utilisé. Nous allons maintenant nous intéresser à cette question. Nous examinerons ce qui arrive au bouche-fissures quand il est chauffé jusqu'à ce qu'il devienne assez fluide pour être épandu. Nous verrons aussi ce qui arrive à la fissure lors du fraisage et du traitement avec la lance thermopneumatique.

Commençons par examiner les problèmes qui se posent au moment du chauffage du bouche-fissures.

La température dans le fondoir

Pour mettre en oeuvre les bouche-fissures bitumineux, il faut les chauffer jusqu'à une température où ils deviennent fluides. Cette opération s'effectue dans un fondoir à double paroi, entre lesquelles circule une huile chauffée électriquement ou par une flamme. Une fois fondus, les mastics sont versés dans la fraisure à l'aide d'un boyau ou d'une brouette d'épandage. En dépit des recommandations prescrivant l'utilisation de fondoirs thermostatés, on retrouve encore des fondoirs qui en sont dépourvus. Ici, nous avons comparé la performance de deux fondoirs:

- Fondeir A, non thermostaté;
- Fondeir B, thermostaté.

En suivant des équipes utilisant soit le fondoir A, soit le fondoir B, nous avons recueilli des données sur la température du bouche-fissures afin de comparer les conditions dans lesquelles on le conserve pendant une journée de travail normale. En premier lieu, et comme l'on pouvait s'y attendre, nous avons observé que le fondoir A (sans thermostat) avait tendance à porter périodiquement les bouche-fissures à une température supérieure à la température de pose prescrite par le fabricant (tableau 11, colonne A).

La température était mieux réglée dans le fondoir B que dans le fondoir A, mais pas autant que ce à quoi on aurait pu s'attendre dans le cas d'un appareil doté d'un régulateur automatique de température. La température devait être étroitement surveillée par les équipes de travail. Elle pouvait rester relativement stable à 193 ± 4 °C, par exemple, pendant trois à quatre heures. Mais si on devait cesser les opérations de scellement pendant plus de 15 minutes, la température du bouche-fissures pouvait facilement monter de plus de 10 °C au-dessus de la température initiale.

Tableau 11. La température d'application et la viscosité des bouche-fissures

Bouche-fissures	Température d'application (°C)		Viscosité (Pa·s) ¹	
	A	B	C	D
	Suggérée	Mesurée	185 °C	210 °C
A	190-205	205 (A)	70	35
B	170-200	215 (A)	30	16
C	190-200	- (B)	20	15
D	175-185	- (A)	15	10
E	185-195	195 (A)	9	5
F	190-200	- (A)	9	5
G	170-180	175 (B)	8	6
H	190-200	197 (B)	5	3
J	185-195	- (A)	16	5
K	170-190	210 (A)	7	4
L	190-200	215 (B)	6	3
M	185-200	200 (B)	19	14

¹ 1 pascal-seconde = 1 000 centipoises

Il existe une relation inverse entre la viscosité des bouche-fissures et la température d'application. Plus la température du bouche-fissures est élevée, plus il devient fluide et plus il devient facile de l'épandre. Par conséquent, on perçoit souvent un avantage à accroître le débit du bouche-fissures en le chauffant à la température maximale de la gamme de température recommandée par le fabricant, ou même à une température plus élevée, c.-à-d. entre 200 et 210 °C.

Deux facteurs contribuent donc aux températures élevées d'application :

1. contrôle insuffisant de la température dans les fondoirs avec ou sans thermostat,
2. tendance des équipes de travail à surchauffer le produit pour faciliter l'épandage.

Ce dernier point s'observe particulièrement dans le cas des bouche-fissures assez visqueux à la température d'application recommandée (viscosité supérieure à 15 Pa·s). Parmi les produits évalués, 50 % se retrouvaient dans cette catégorie. En d'autres termes, quand on choisit un bouche-fissures au hasard parmi les produits disponibles, il y a 50 % de chances qu'il soit surchauffé lors de son application.

Comportement des bouche-fissures

Nous avons mesuré en laboratoire, à l'aide d'essais de viscosimétrie, de thermogravimétrie et de traction, l'effet de la température d'application et du temps de chauffage sur les bouche-fissures. (On trouve les procédures expérimentales à l'annexe B.)

Effets de la chaleur sur la viscosité

Avant d'aborder les effets de la chaleur sur la viscosité des bouche-fissures, il convient de préciser que ces produits sont des mélanges de bitume et d'élastomère. C'est la composition et les proportions relatives de ces constituants bitumineux et élastomériques (y compris les polymères et le caoutchouc recyclé) qui déterminent la viscosité du bouche-fissures. Le bitume contribue peu à la viscosité des bouche-fissures à l'état fondu (comparez les viscosités affichées aux figures 4 et 5). Les principaux facteurs qui gouvernent la viscosité des produits sont:

- le degré de dispersion du mélange élastomère-bitume;
- la concentration et le poids moléculaire des élastomères;
- la compatibilité entre l'élastomère et le bitume.

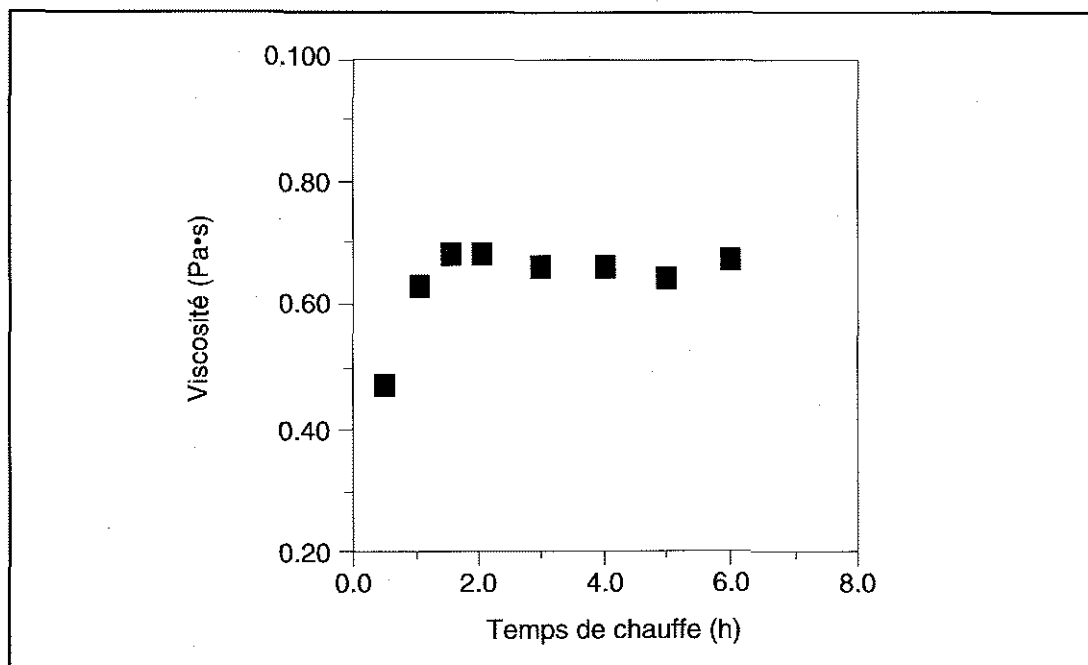


Figure 4. Viscosité Brookfield à 185 °C d'un bitume de pénétration 300/400

S'il existe pour tous les bouche-fissures une relation inversement proportionnelle entre la viscosité et la température, ils présentent tous une viscosité différente à la même température d'application (tableau 11, colonnes C et D). À 185 °C, la viscosité des 12 bouche-fissures étudiés était entre 5 et 70 Pa·s. Les produits dont la viscosité était inférieure à 10 Pa·s se coulaient facilement, tandis que ceux dont la viscosité était supérieure à 30 Pa·s se versaient difficilement. À 210 °C, la viscosité diminue entre 3 et 35 Pa·s. La baisse de viscosité entre 185 et 210 °C dépend donc du produit, la baisse variant entre 25 et 70 %.

La viscosité d'un bouche-fissures n'est pas seulement fonction de la température d'application mais aussi du temps de chauffage. Le chauffage continu d'un bouche-fissures à 185 °C, température d'application type, peut également provoquer une réduction de la viscosité (figure 5). À 185 °C, la viscosité diminue rapidement (produits A et D), modérément (produits B et L) ou lentement (produits E, F et G). D'autres

produits affichent une viscosité constante (produits K et H) ou en légère augmentation (produits C et M).

Pour bon nombre de produits, la réduction de la viscosité à 210 °C semble être une extrapolation de la réduction de la viscosité à 185 °C. Cela vaut particulièrement pour les produits A, D, F et L. Au contraire, les produits B, C, J et M présentent une viscosité plus faible à 210 °C qu'à 185 °C. Comme on le verra plus loin, ce comportement se reflète dans les propriétés de traction des produits.

En chauffant un bouche-fissures, on modifie donc sa viscosité. Ce changement témoigne d'une modification chimique du bouche-fissures. La viscosité d'un bouche-fissures étant directement proportionnelle au poids moléculaire des élastomères qu'il contient, toute réduction de sa viscosité lors du chauffage indique un abaissement du poids moléculaire de l'élastomère, c.-à-d. une dégradation thermique.

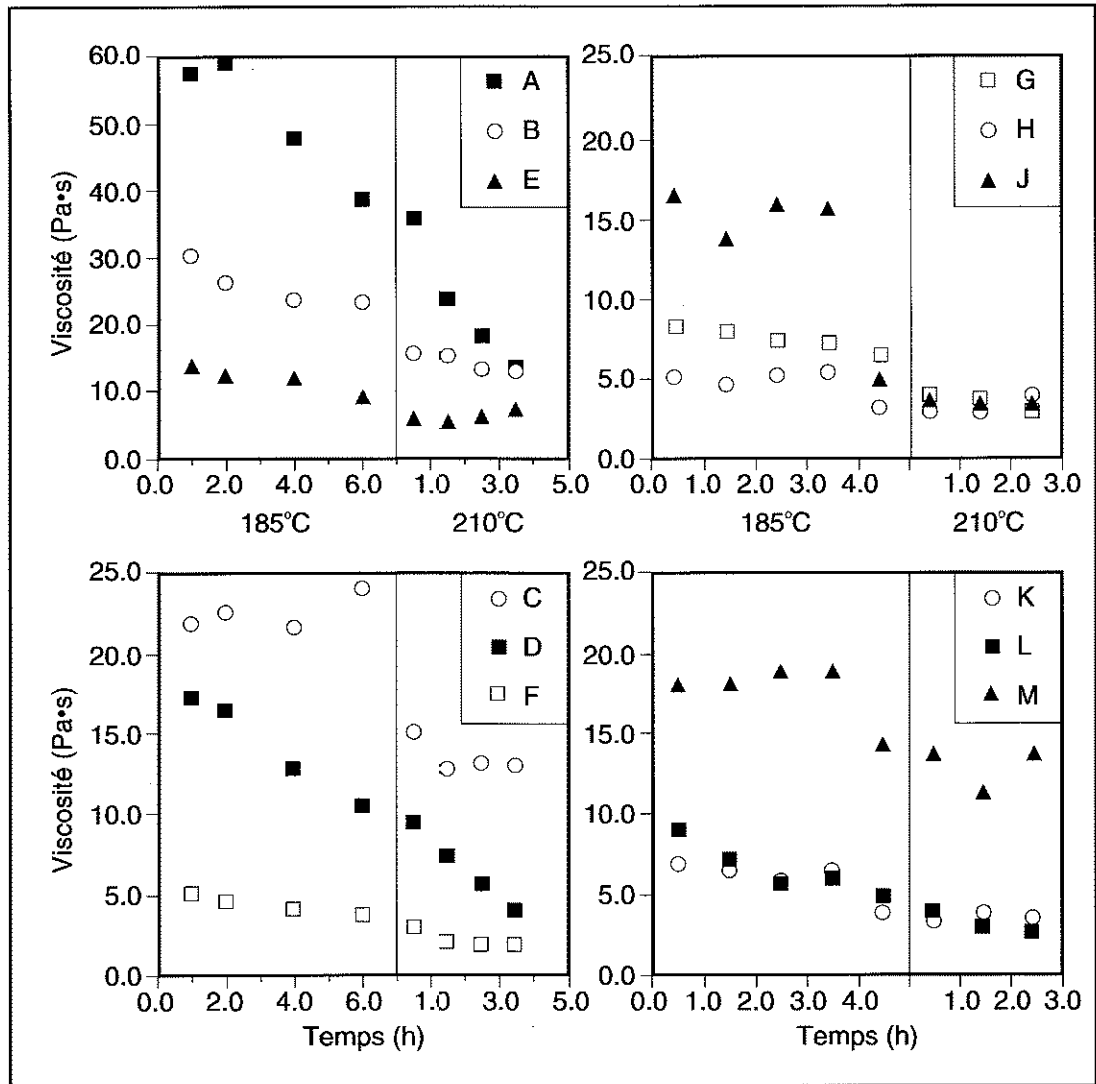


Figure 5. Viscosité Brookfield des bouche-fissures en fonction du temps et de la température. Dans chaque graphique, les valeurs à gauche de la ligne ont été mesurées à 185 °C et celle de droite à 210 °C.

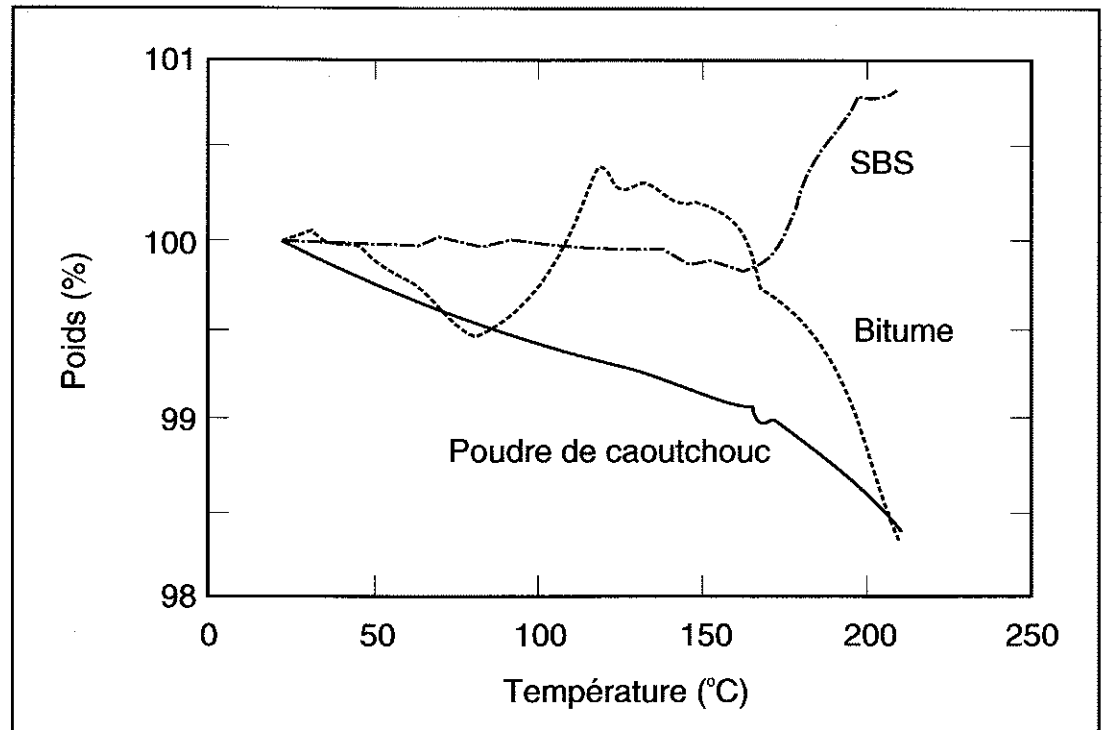


Figure 6. Variations de masse typiques des constituants des bouche-fissures chauffés dans l'air à raison de 5 °C/min, telles que mesurées par thermogravimétrie. La masse du copolymère SBS demeure constante jusqu'à 170 °C environ, puis augmente par absorption d'oxygène, c'est-à-dire par oxydation. Par ailleurs, la poudre de caoutchouc recyclé perd de sa masse à mesure que ses huiles s'évaporent. Le bitume combine un gain de masse dû à l'oxydation et une perte de masse causée par l'évaporation des huiles légères.

Effets de la chaleur sur les constituants du bouche-fissures

Le bitume et les élastomères, qui sont les principaux constituants des bouche-fissures, sont composés pour l'essentiel de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote. Par conséquent, le bitume et les élastomères peuvent s'oxyder, se dégrader ou perdre des constituants volatils lorsqu'ils sont chauffés (figure 6). Les constituants types peuvent perdre plus de 15 % de leur masse lorsqu'ils sont maintenus à 210 °C pendant une heure (figure 7).

La masse des bouche-fissures diminue aussi quand on les chauffe (figure 8). Comme aucun d'eux n'a la même composition, la perte de masse dépend du produit, mais la tendance est identique pour tous les bouche-fissures. La perte de masse augmente en fonction du temps et de la température et elle se produit surtout

au cours de la première heure de chauffage. Après 1 heure à 185 °C, le bouche-fissures peut perdre jusqu'à 17 % de sa masse. Après trois heures de chauffage, la perte de masse continue mais l'écart entre les pertes en masse des divers bouche-fissures rétrécit. Lors de l'application, les fumées blanches qui s'échappent du fondoir témoignent de la perte de masse des bouche-fissures.

La perte de masse lors du chauffage est principalement attribuable à l'évaporation des huiles légères qui confèrent à ces produits une certaine élasticité. Nous verrons plus loin que cette perte d'huile affecte la performance du bouche-fissures. La perte de masse lors du chauffage peut également s'expliquer par la dégradation des élastomères présents dans le produit et par l'évaporation des produits de dégradation.

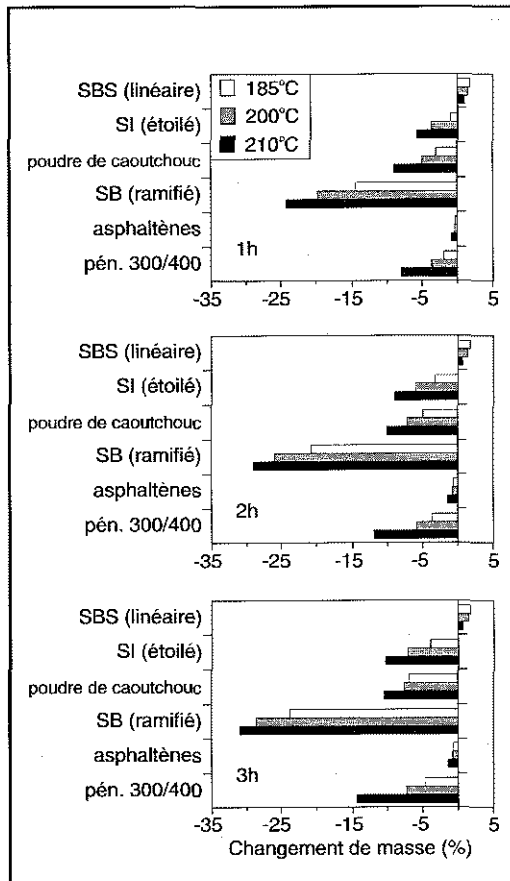


Figure 7. Après chauffage rapide à des températures représentatives de celles obtenues pendant la pose du bouche-fissures, les constituants ont été maintenus isothermiquement à ces températures. Tous les constituants sauf le SBS ont subi une perte de masse en fonction du temps et de la température, telle que mesurée par thermogravimétrie.

Les bouche-fissures dont la viscosité diminue en fonction du temps contiennent un élastomère sensible à l'oxydation thermique, tandis que ceux qui conservent une viscosité constante contiennent un élastomère probablement plus résistant à l'oxydation et à la dégradation. Nous insistons ici sur « probablement », car une viscosité constante peut être le résultat de deux processus ayant des effets opposés:

1. la perte d'hydrocarbures légers, perte qui accroît la viscosité;

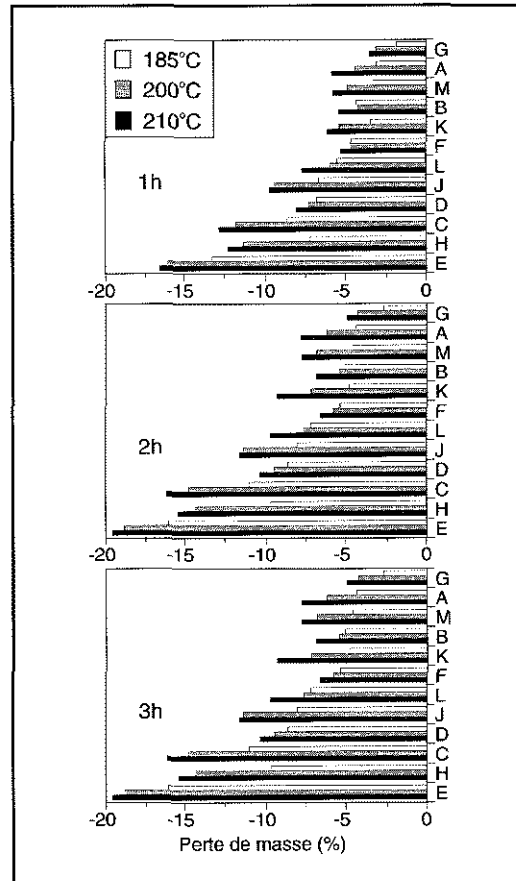


Figure 8. Perte de masse des bouche-fissures en fonction du temps et de la température

2. la dégradation des élastomères, qui réduit la viscosité.

Dans ce cas, les propriétés de traction peuvent indiquer si un bouche-fissures est affecté par la température.

Les bouche-fissures sont des matériaux viscoélastiques. Par conséquent, ils se déforment et s'allongent quand ils sont soumis à des tractions, l'allongement diminuant de pair avec un refroidissement. À une température donnée, les propriétés mécaniques

des bouche-fissures, comme celles des autres matériaux viscoélastiques, sont régies par la composition. La teneur en hydrocarbures et en polymères joue un rôle clé sur les propriétés mécaniques; une teneur élevée en élastomères et un haut poids moléculaire confèrent aux produits un module élevé, tandis que les hydrocarbures compatibles réduisent la fragilité. Dans les bouche-fissures comme dans les autres bitumes modifiés avec des polymères, les hydrocarbures compatibles proviennent des maltènes du bitume ou d'huiles ajoutées à la formulation. Ainsi, à partir de la composition d'un bouche-fissures, il est possible de prévoir ses propriétés mécaniques. On ignore la composition exacte des produits évalués ici mais on peut déterminer leur composition relative à partir de mesures viscosimétriques et thermogravimétriques (figures 5 et 8). Les compositions relatives des bouche-fissures A, F et C sont indiquées au tableau 12.

Tableau 12. Composition relative des bouche-fissures

Bouche-fissures	Teneur en hydrocarbures	Teneur en élastomères
A	faible	élevée
C	moyenne	moyenne
F	élevée	faible

Teneur faible en hydrocarbures et teneur élevée en élastomères. Le bouche-fissures A contient peu d'hydrocarbures et beaucoup d'élastomères. C'est pourquoi il a un module élevé et un allongement faible. C'est le contraire dans le cas du produit F. Lorsqu'on chauffe les bouche-fissures, leur composition se transforme et, automatiquement, leurs propriétés mécaniques s'en trouvent altérées (figures 9 et 10). Par le changement des propriétés mécaniques, on a pu déduire le changement de la composition lors du chauffage. Dans le cas d'un bouche-fissures ayant une faible teneur en hydrocarbures et, au départ, une teneur élevée en élastomères (produit A), c'est la dégradation thermique des polymères qui l'emporte sur la perte des hydrocarbures. Ceci explique la diminution du module à mesure que l'élastomère se dégrade.

La formation de produits de dégradation équivaut à un apport en huile qui augmente l'allongement (figures 9 et 10).

Teneur élevée en hydrocarbures et teneur faible en élastomères. Dans un bouche-fissures présentant une teneur initiale élevée en hydrocarbures (produit F), la perte d'hydrocarbures l'emporte sur la dégradation de l'élastomère. Au fur et à mesure que la teneur en hydrocarbures diminue, le mastic devient plus fragile, son module augmente et son allongement diminue (figures 9 et 10). Dans le cas intermédiaire, par exemple pour le produit C, tant la perte d'huile que la dégradation des élastomères contribuent à en altérer les propriétés mécaniques. Pendant la première heure de chauffage, la dégradation thermique des polymères domine, les sous-produits contribuant à accroître la teneur en huile, ce qui entraîne une augmentation de l'élasticité. Après une heure, la perte d'huile devient plus importante et l'élasticité commence à diminuer. Il convient de souligner qu'on peut relier ce double mécanisme de dégradation à une diminution non linéaire de la viscosité du bouche-fissures entre 185 et 210 °C (figure 4). Lorsqu'un seul mécanisme de dégradation domine, la diminution de la viscosité est linéaire et la viscosité à 210 °C est l'extrapolation de la valeur observée à 185 °C.

Performance et chauffage

Conformément à la norme ASTM D3405, les caractéristiques d'application du bouche-fissures doivent rester relativement constantes après que celui-ci a été maintenu pendant six heures à la température d'application recommandée. Toutefois, comme l'indique la variation des propriétés de traction, les propriétés des bouche-fissures ne restent pas constantes dans de telles conditions.

Ainsi, compte tenu de la dégradation du bouche-fissures lors du chauffage, une performance *constante* de celui-ci ne pourrait être qu'exceptionnelle. Il faut s'attendre à une performance moyenne, voire médiocre d'un bouche-fissures surchauffé, ou installé après plusieurs heures à la température d'application recommandée.

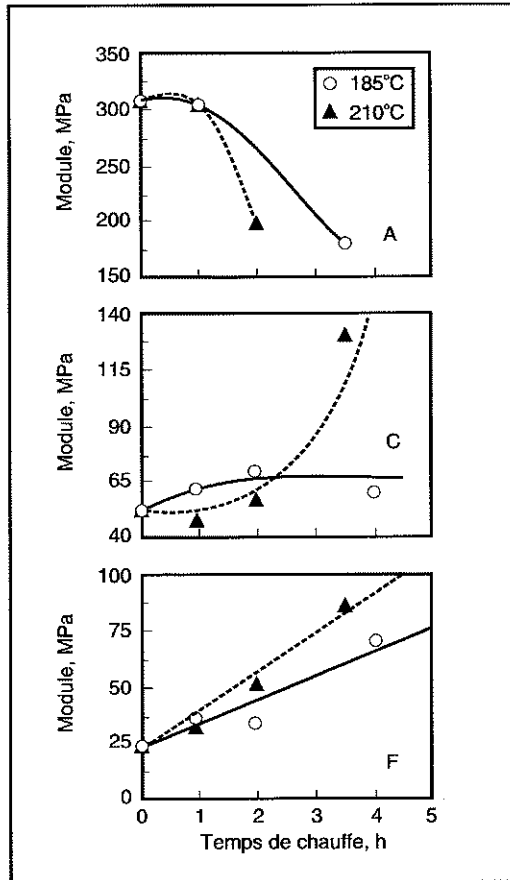


Figure 9. Variation du module de traction des bouche-fissures à basse température (-37 °C) après chauffage à 185 °C et à 210 °C

LE TEMPS PROPICE AUX TRAVAUX

La largeur des fissures varie en fonction du temps. Les fissures s'ouvrent par temps chaud et se referment par temps froid. Trois mouvements des fissures sont tout de même possibles :

- le mouvement latéral, relié aux changements thermiques, dans la chaussée;
- le mouvement vertical ascendant, attribuable principalement à l'action du gel et à l'intrusion de matériaux incompressibles dans les fissures;
- le mouvement vertical descendant, tenant surtout à la perte d'intégrité structurale du revêtement provoquée par l'infiltration d'eau dans les fissures.

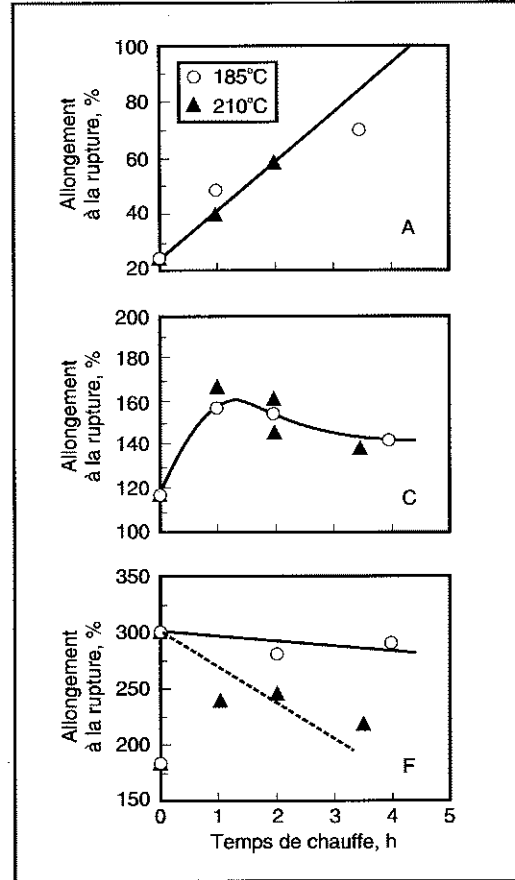


Figure 10. Variation de l'élasticité des bouche-fissures à basse température (-37 °C) après chauffage à 185 °C et à 210 °C

Si la pénétration d'eau est faible ou nulle (l'objectif du scellement de fissures), c'est alors le mouvement latéral qui prédomine. C'est ce mouvement qui nous intéresse ici. Au Canada, les mouvements des fissures se produisent surtout durant une période de six à huit mois, l'ouverture étant maximale en février (figure 11). Toutefois, les mouvements des fissures ne varient pas en fonction de la température atmosphérique, mais en fonction du changement de température dans l'ensemble de la structure de la chaussée. Ce changement est lent et en corrélation étroite avec la température moyenne sur quatre jours. En général, les mouvements des fissures sont de l'ordre de 5 à 25 mm au cours d'un cycle annuel et l'ouverture s'agrandit de 1 à 3 mm par année à cause de l'usure et du vieillissement de la fissure.

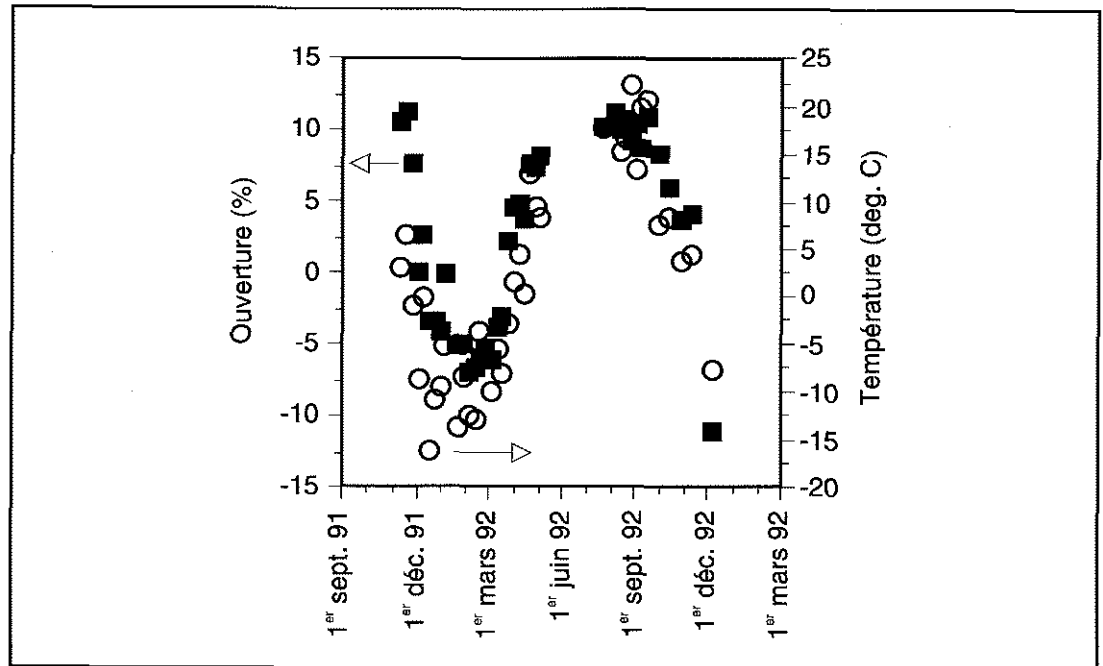


Figure 11. Ouverture cyclique d'une fissure dans une chaussée mixte et température moyenne sur quatre jours

Le scellement des fissures doit être effectué à un moment de l'année où les températures sont modérées, c-à-d. au printemps ou à l'automne. Il n'est toutefois pas rare d'assister à des opérations de scellement des fissures en été. On y trouve des conditions de travail agréables et les fissures sont en général sèches. De toute évidence, la performance du bouche-fissures dépend étroitement de la qualité et de la constance d'exécution du travail, tant au stade de la préparation de la fissure qu'à celui du scellement. Une bonne qualité de travail a plus de chance d'être atteinte dans de bonnes conditions. Malheureusement, quand les fissures sont scellées en été, le bouche-fissures reste toujours en traction, ce qui accroît les risques de décollement (figure 12). Si les fissures sont scellées alors qu'elles ne sont qu'à demi ouvertes, le bouche-fissures n'est pas exposé à des tractions ou à des compressions excessives. Comme on le montre à la figure 11, il est évident que les fissures ne sont à demi ouvertes qu'en décembre ou en avril. En ce sens, ces deux périodes sont les plus propices au scellement des fissures. Le scellement des fissures en décembre présente

toutefois peu d'avantages : les journées sont courtes et froides, et le produit ne peut bénéficier d'un mûrissement propice à une bonne adhérence avant d'être soumis aux tractions reliées à l'ouverture des fissures.

Il est préférable de sceller les fissures au printemps. La plupart des chaussées sont dépourvues de neige en mars et en avril. De nouvelles fissures auront fait leur apparition au cours de l'hiver et leurs parois seront en meilleur état que celles des fissures plus anciennes. C'est alors le moment le plus approprié pour sceller les fissures. Mais la structure de la chaussée peut être encore gelée et les fissures peuvent être humides. Il faut s'assurer de pouvoir nettoyer et assécher les fissures suffisamment pour pouvoir y couler un bouche-fissures. On verra plus loin qu'une lance ne devrait pas être utilisée pour assécher ces fissures. Contrairement à une intervention en décembre, une intervention au printemps permet de renforcer l'adhérence à l'interface bouche-fissures/béton bitumineux, ce qui améliore la performance hivernale du produit.

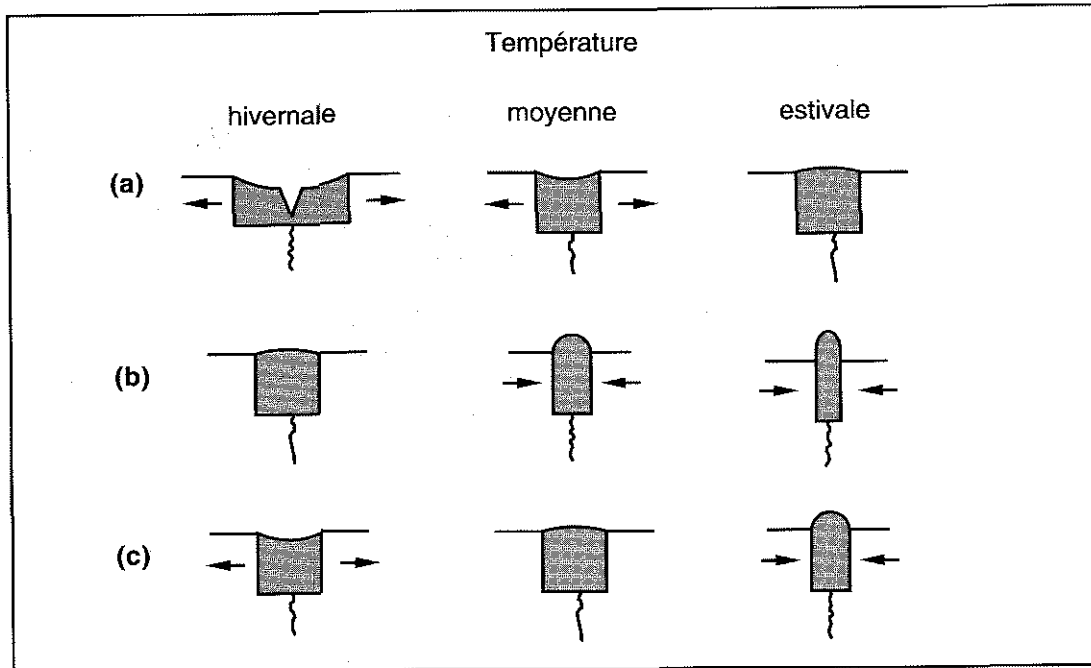


Figure 12. Effets de l'ouverture cyclique des fissures sur un bouche-fissures épandu en été (a), en hiver (b) et au printemps ou en automne (c)

L'ÉQUIPEMENT

Pour préparer une fissure avant d'y couler le mastic, on utilise souvent deux appareils : la fraiseuse et la lance thermopneumatique (plus simplement dit, la lance). Nous avons traité brièvement du rôle de la fraiseuse en relation avec la géométrie de la fissure. La fraiseuse élargit mécaniquement la fissure pour donner un contour régulier à l'ouverture. Ensuite, on utilise une lance, en principe pour contribuer à une bonne adhérence entre le béton bitumineux et le bouche-fissures.

On a constaté que la défaillance du bouche-fissures pouvait s'expliquer par plusieurs mécanismes. Elle peut être imputée à un mauvais produit, bien sûr, mais aussi à la présence d'une couche faible à la surface de la fraiseuse. La couche faible peut être le résultat d'un mauvais nettoyage, de microfissures induites par l'action de la fraiseuse ou du recours à la lance thermopneumatique.

Effets de la fraiseuse sur le béton bitumineux

On a déterminé l'effet possible de la fraiseuse sur le béton bitumineux suite à l'étude au microscope de coupes transversales de béton bitumineux avant et après fraissage. Avant le fraissage, toutes les coupes étaient dépourvues de microfissures. Après le fraissage, des microfissures apparaissaient à l'interface bitume-granulats et au sein des granulats eux-mêmes (figures 13 et 14). Les microfissures se propagent avec les cycles de gel et de dégel et réduisent la résistance mécanique du béton bitumineux. Elles constituent donc des défauts à l'interface bouche-fissures/béton bitumineux qui peuvent favoriser un décollement du bouche-fissures.

Un grossissement de l'interface bouche-fissures/béton bitumineux montre comment ce phénomène peut se produire (figure 15). Lorsque le bouche-fissures exerce une traction sur le granulat au cours des mois d'hiver (en raison des contraintes liées à la température ou à la circulation), le granulat fissuré se fracture encore davantage, laissant des cristaux



Figure 13. Vue en plan (grossissement 6 X) d'un granulat au fond d'une fraisure. L'emploi d'une fraiseuse a provoqué le bris du granulat et son décollage du liant bitumineux (flèches).

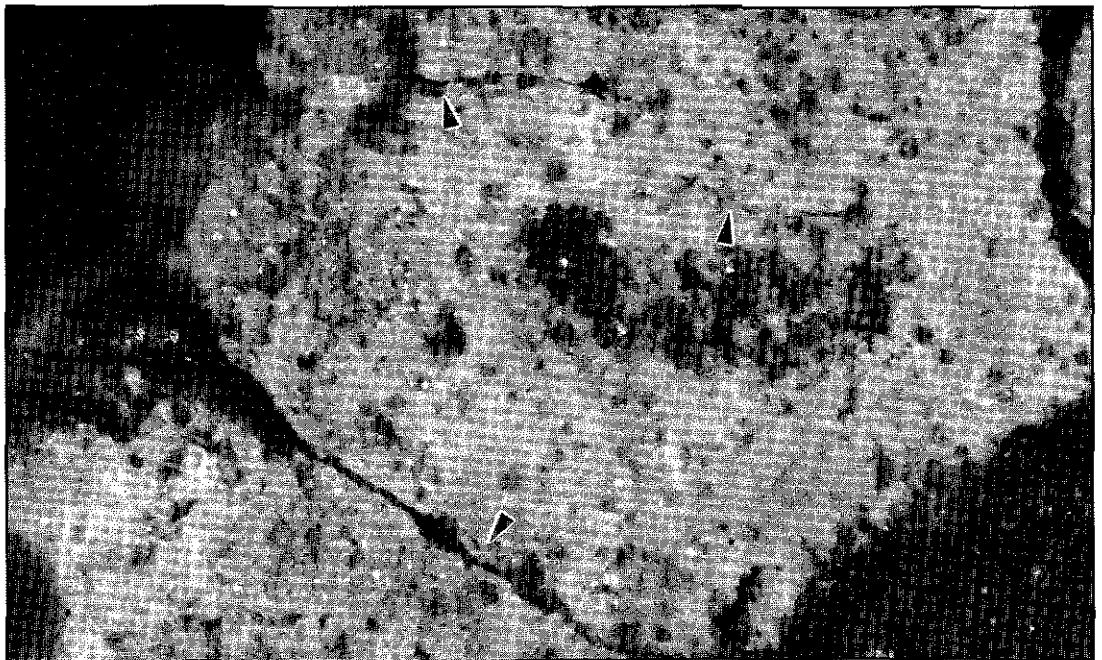


Figure 14. Grossissement (20 X) d'un granulat dans une fraisure. Les flèches indiquent des microfissures produites par l'impact des couteaux de la fraiseuse sur les granulats.

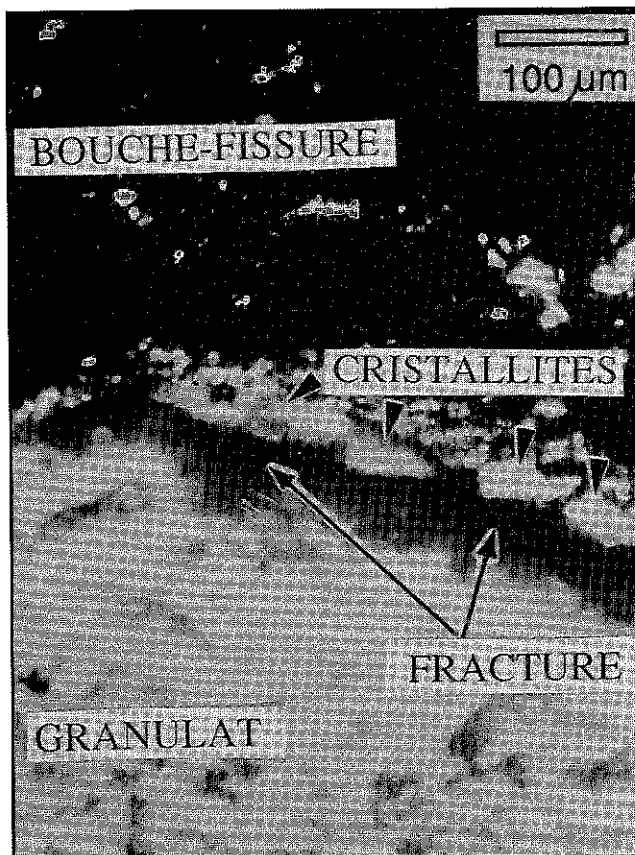


Figure 15. Effets des microfissures dans les granulats (flèches longues) à l'interface entre le bouche-fissures et le béton bitumineux. Contrainte par le bouche-fissures, la microfissure s'est élargie et des cristaux (flèches courtes) sont restés accrochés au bouche-fissures. Par conséquent, le bouche-fissures n'adhère plus fermement au béton bitumineux.



Figure 16. Lorsque l'interface granulat/bitume présente des microfissures, un bouche-fissures très adhérent peut arracher des granulats du béton bitumineux. Il est intéressant de noter que les granulats de la paroi verticale de la fraisure restent en place, ce qui indique qu'un autre mécanisme régit le décollement de cette paroi.

rattachés au bouche-fissures. Le lien entre le bouche-fissures et le béton bitumineux s'en trouve brisé. De même, un granulat entier peut être tiré hors de la matrice du béton bitumineux par un bouche-fissures (figure 16). On en conclut donc que la fraiseuse peut causer une rupture cohésive du béton bitumineux près de la surface de la fraisure et entraîner l'ouverture du joint bouche-fissures/béton bitumineux. Il nous reste toutefois à déterminer la fréquence et les conditions exactes menant à ce type de rupture.

Effets de la lance thermopneumatique sur le béton bitumineux

Avant de remplir la fraisure de bouche-fissures, on chauffe souvent la fraisure avec une lance thermopneumatique. À l'origine, on pensait tirer avantage du recours à la lance, notamment pour augmenter le nombre de jours par année pendant lesquels on pouvait effectuer le scellement des fissures et pour sceller les fissures humides. Toutefois, on n'avait pas évalué l'incidence de la lance sur la performance des bouche-fissures.

On dit toujours que la lance favorise l'adhérence du bouche-fissures et, ainsi, améliore sa performance. Nous avons des réserves quant à ce fait. Nous nous sommes donc proposés d'examiner

les conditions d'utilisation de la lance sur le terrain et de reproduire son effet sur les revêtements de béton bitumineux à l'aide d'une lance automatisée, et ce dans le cadre d'une série d'expériences réalisées en laboratoire. Nous avons ainsi comparé l'adhérence de trois bouche-fissures appliqués sur des substrats de béton bitumineux non chauffés, chauffés et surchauffés contenant des granulats de quartz ou de calcaire.

Nos résultats montrent que l'utilisation d'une lance thermopneumatique ne permet pas d'augmenter l'adhérence des bouche-fissures au béton bitumineux, qu'il soit sec ou humide. Au contraire, elle peut accélérer son décollement. Voyons comment on arrive à cette conclusion.

Profil de température

Sur le terrain, le chauffage normal d'une fraisure avec la lance provoque un léger noircissement de la surface de la fraisure. Pendant le passage de la lance, la température augmente rapidement pour atteindre environ 220 °C, avant de retourner à la température initiale de 30 °C en l'espace de 60 secondes (figure 17). Nous n'avons pu mesurer l'élévation de la température dans les fraisures surchauffées (figure 18) et nous avons reporté ces mesures jusqu'à l'évaluation de la lance en laboratoire.

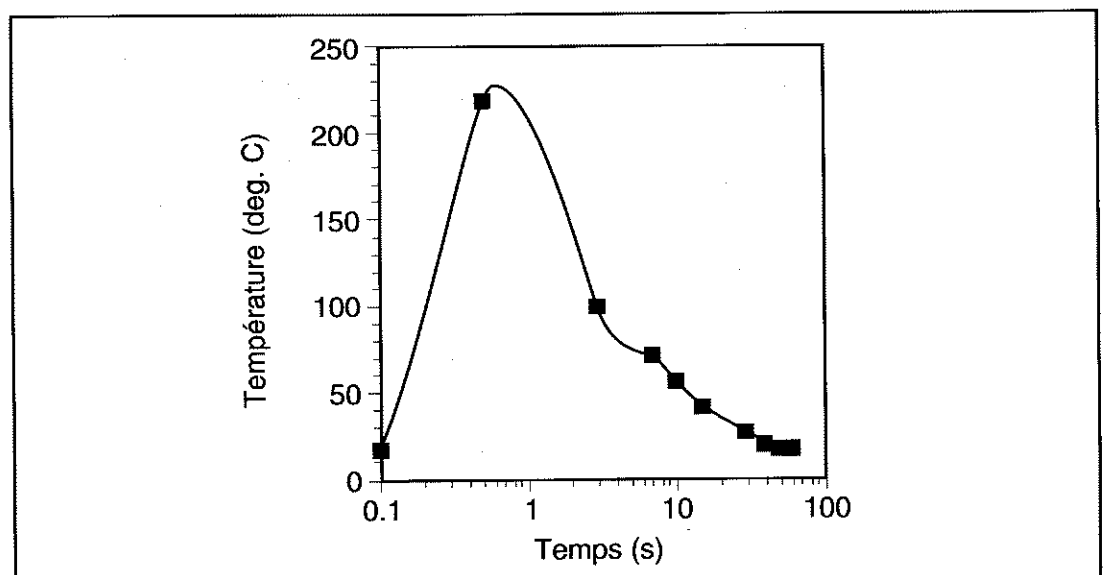


Figure 17. Profil type de la température en surface d'une fraisure chauffée normalement

On a déjà pensé que la lance améliorerait l'adhérence du bouche-fissures en ramollissant le bitume à la surface de la fraisure et favorisait ainsi l'interdiffusion du bitume et du bouche-fissures. Toutefois, les profils de température de la fraisure révèlent que la lance ne peut favoriser l'adhérence du bouche-fissures. Pour que le bitume devienne collant, il doit être maintenu à 140-160 °C. Dans les conditions normales d'utilisation de la lance, la température de la fraisure est supérieure à 100 °C pendant moins de 10 secondes après le passage de la lance (figure 17). L'intervalle de temps entre le chauffage de la fraisure et le scellement de la fissure étant de une à cinq minutes, la surface de la fissure ne peut être chaude et collante au moment de l'application du bouche-fissures.

Béton bitumineux sec

Pour évaluer l'effet de la lance sur le béton bitumineux et l'adhérence du bouche-fissures, nous avons fabriqué une lance automatisée et nous avons reproduit les conditions obtenues sur le terrain. Après avoir chauffé le béton

bitumineux à l'aide de la lance, nous avons coulé du bouche-fissures sur le béton bitumineux et nous avons procédé à des tractions à petite et grande échelles, et ce à -37 °C (on trouvera les détails de ces essais à l'annexe B).

Lors des essais à petite échelle, la lance n'a pas permis d'accroître l'adhérence des bouche-fissures aux substrats par rapport à ce qui était possible avec des briquettes non chauffées (tableau 13); statistiquement, l'adhérence du bouche-fissures aux briquettes chauffées est la même que l'adhérence aux briquettes non chauffées. Par contre, si la surface était surchauffée, la force d'adhérence du bouche-fissures au béton bitumineux était dans la plupart des cas réduite de 50 %, parfois plus.

On a aussi noté que la force d'adhérence mesurée est liée au mécanisme de rupture du bouche-fissures. Quand la surface du béton bitumineux n'était pas traitée, ou qu'elle était chauffée normalement, la force d'adhérence était élevée et la rupture à l'interface bouche-fissures/béton bitumineux était de



Figure 18. Fraisure surchauffée. Le premier quart de la fraisure (à l'avant-plan) a été surchauffé en un seul passage de la lance tandis que le reste a été surchauffé à la suite de passages répétés.

Tableau 13. Force d'adhérence moyenne entre un bouche-fissures et une briquette de béton bitumineux

Granulats de quartz			Granulats de calcaire		
Bouche-fissures A	Adhérence (mJ/cm²)	É.-T. *	Bouche-fissures A	Adhérence (mJ/cm²)	É.-T.
témoin	53	11	témoin	28	9
chauffé**	41	13	chauffé	21	10
surchauffé***	18	6	surchauffé	11	4
Bouche-fissures M	Adhérence (mJ/cm²)	É.-T.	Bouche-fissures M	Adhérence (mJ/cm²)	É.-T.
témoin	35	12	témoin	33	13
chauffé	51	24	chauffé	29	1
surchauffé	17	5	surchauffé	18	7
Bouche-fissures L	Adhérence (mJ/cm²)	É.-T.	Bouche-fissures L	Adhérence (mJ/cm²)	É.-T.
témoin	22	7	témoin	30	7
chauffé	22	6	chauffé	19	7
surchauffé	15	6	surchauffé	14	4

* écart-type

** vitesse de la lance: 40 cm/s

*** vitesse de la lance: 15 cm/s

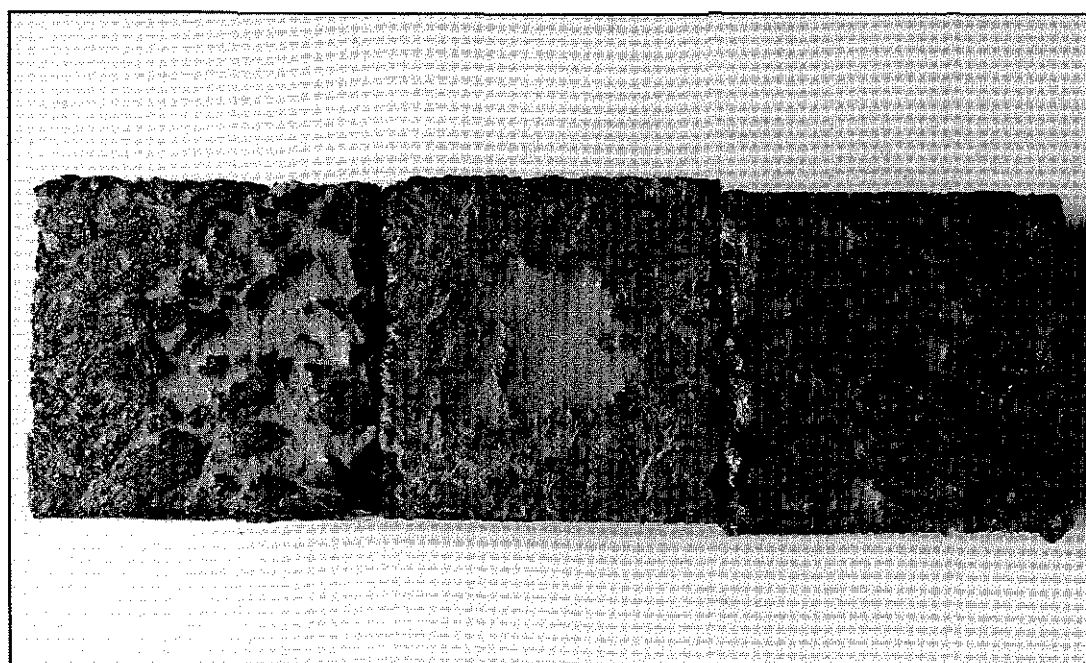


Figure 19. Surface des briquettes de béton bitumineux avant et après des tractions. A gauche, une briquette surchauffée après traction; au milieu, le contrôle après traction et à droite, le contrôle avant l'application du bouche-fissures. Les briquettes ont été couvertes d'une pâte colorée pour augmenter le contraste entre la surface et les trous dans la briquette. Sur le témoin, le bouche-fissures a arraché les granulats de la surface en laissant un trou au centre de la briquette. Sur la surface surchauffée, il n'y a aucun trou au point d'adhésion du bouche-fissures. Il y a plutôt de petits trous dispersés sur la surface où la lance thermopneumatique a causé des dommages.

nature à la fois cohésive et adhésive. La rupture cohésive se produisait à la surface du béton bitumineux suite à l'arrachement de fines et de petits granulats (figures 19 et 20), tandis que la rupture adhésive se produisait à la surface des gros granulats (figure 20).

D'autre part, quand la surface du béton bitumineux était surchauffée, la force d'adhérence était faible et la rupture à l'interface bouche-fissures/béton bitumineux était exclusivement adhésive (figure 21). Après l'essai, la surface du bouche-fissures était irrégulière et correspondait à une réplique des trous dans la surface de la briquelette découlant de la disparition des fines et des granulats éjectés par le souffle chaud de la lance. La surface du bouche-fissures contenait alors peu de bitume et peu ou pas du tout de fines, comme si le bouche-fissures n'avait pu réussir à s'accrocher à la surface. Il est possible que le bouche-fissures, en raison de sa viscosité relativement élevée, n'ait pu mouiller en profondeur les pores du béton bitumineux et ainsi bien s'accrocher à sa surface.

Les résultats des essais à grande échelle mettent en lumière une différence importante entre la capacité des bouches-fissures à s'adapter à l'ouverture des fissures à basse température sans se décoller (figure 22). Par exemple, le bouche-fissures L se décollait rapidement après un allongement de 30 % mais le bouche-fissures M restait collé sur presque toute sa longueur au-delà de 130 % d'élongation.

Les résultats indiquent qu'il n'est guère avantageux d'utiliser la lance lorsque le bouche-fissures possède une bonne élongation et peut facilement s'adapter à l'ouverture des fissures, comme dans le cas du produit M. La contrainte de traction à l'interface bouche-fissures/béton bitumineux était semblable-t-il suffisamment faible pour interdire tout décollement, sans égard au traitement appliqué à la surface du béton bitumineux. Dans le cas du bouche-fissures A avec une élasticité moyenne à basse température, l'utilisation de la lance a amélioré l'adhérence du bouche-fissures quand l'ouverture de la

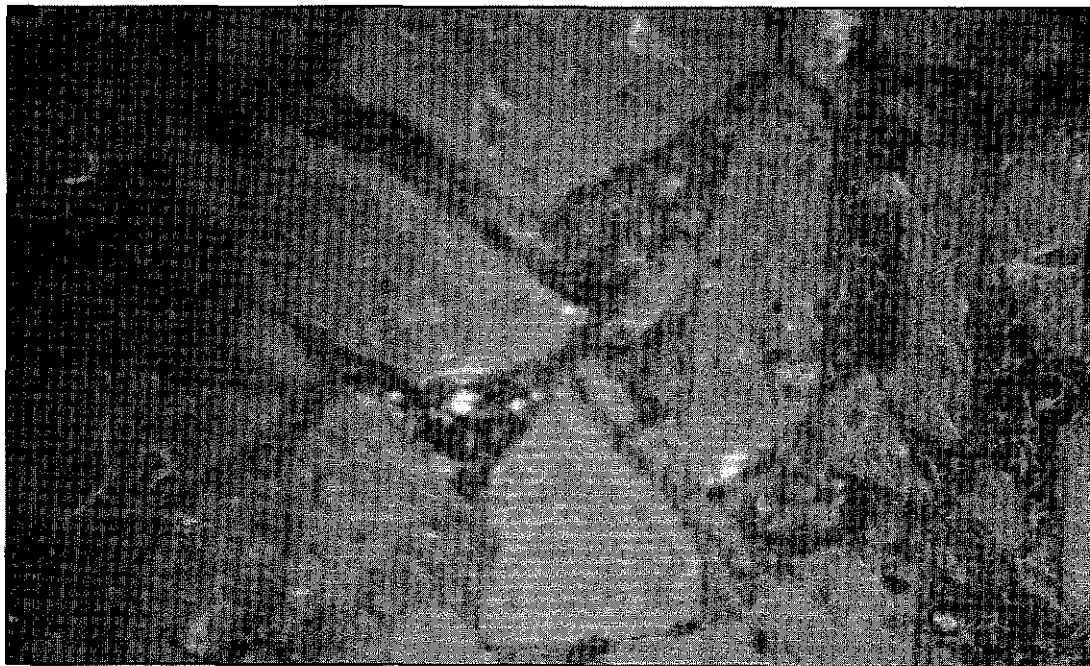


Figure 20. Surface du bouche-fissures après une traction de l'éprouvette bouche-fissures/briquelettes, pour une briquelette témoin. La surface du bouche-fissures est une réplique du témoin. Elle contient des fines et du bitume arraché de la briquelette (en noir) et présente une surface propre de couleur verte lorsque le bouche-fissures s'est décollé.

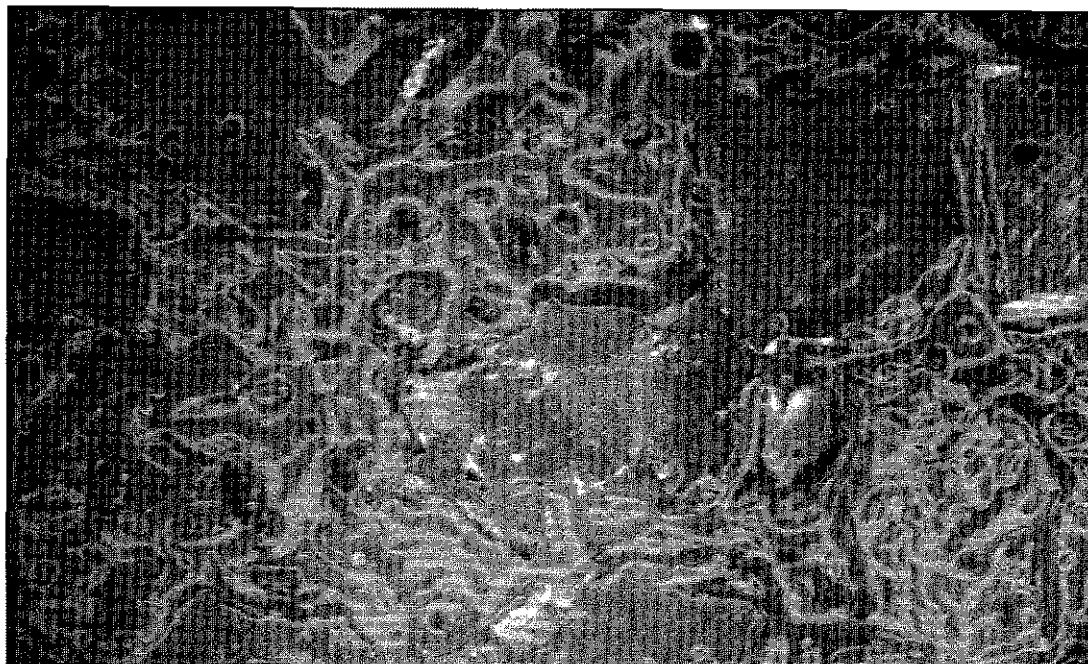


Figure 21. Surface du bouche-fissures après un essai de traction effectué sur un ensemble bouche-fissures-briquettes, pour une brique surchauffée. La lumière réfléchi par la surface incurvée (en blanc) permet de voir un motif texturé qui rappelle les courbes de niveau d'une carte topographique.

Tableau 14. Adhérence du bouche-fissures M sur des surfaces moites et asséchées

Surface	Adhérence, mJ/cm ²	Mode de rupture
sèche (témoin n° 1)	25 (6)*	cohésive - BB
sèche (témoin n° 2)**	22 (3)	cohésive - BB
moite	36 (11)	cohésive - bouche-fissures
moite et asséchée	10 (3)	adhésive

* (n): écart type

** immergé dans l'eau 1 heure et séché sous vide 20 minutes

fissure dépassait 80 %. Par contre, quand la capacité d'élongation du bouche-fissures était très inférieure à celle du produit M, alors la lance accélérât un décollement déjà rapide (bouche-fissures L).

Par ces essais, on conclut que la lance peut à l'occasion améliorer l'adhérence du bouche-fissures au béton bitumineux. Mais si le bouche-fissures a été choisi en vue d'une utilisation dans un climat froid, c'est-à-dire qu'il reste bien élastique à très basse température, alors la lance devient inutile.

Béton bitumineux humide

Dans une deuxième série d'essais, nous avons mesuré l'adhérence du bouche-fissures M à des briquettes de béton bitumineux qui cette fois étaient moites ou avaient été asséchées avec la lance avant d'y couler le produit (tableau 14). On a ainsi pu constater que l'adhérence dépend peu de l'humidité en surface. L'adhérence sur les briquettes sèches ou humides était statistiquement la même, mais si la briquette avait été asséchée par la lance, l'adhérence était alors moins bonne. La lance avait donc une fois encore un effet négatif sur l'adhérence.

On a aussi constaté que la rupture à l'interface bouche-fissures/béton bitumineux était strictement adhésive quand la lance était utilisée, alors qu'elle était cohésive dans les autres cas. Cette situation est identique à celle illustrée plus tôt, alors que les briquettes étaient toutes sèches. On a aussi noté que lorsque la surface de la briquette était humide, la rupture cohésive se faisait dans le mastic près de l'interface au lieu de se faire dans la briquette, comme dans le cas des témoins. La raison de cette différence reste à déterminer. Il apparaît néanmoins que la présence d'eau à la surface du béton bitumineux n'empêche pas une bonne adhérence du bouche-fissures.

Les conclusions tirées ici doivent être appliquées avec discernement. Elles n'indiquent pas que les fissures humides peuvent être scellées sans aucun traitement. Les surfaces utilisées ici étaient moites mais propres. Les fissures, elles, sont moites mais sales. L'humidité ne semble pas affecter l'adhérence du bouche-fissures mais la saleté l'affecte très certainement. Comme la lance

thermopneumatique ne doit pas servir pour le nettoyage et qu'une certaine humidité peut être tolérée, on aura avantage à nettoyer les fissures humides avec un jet d'air comprimé au lieu d'utiliser la lance thermopneumatique.

Effet du granulat

L'adhérence des bouche-fissures au béton bitumineux peut dépendre du granulat que ce dernier contient (tableau 13). Le bouche-fissures A, par exemple, adhérait près de deux fois plus fortement à des briquettes avec des granulats de quartz qu'à des briquettes avec des granulats de calcaire. L'adhérence aux briquettes avec le quartz a provoqué un arrachement de granulats plus important que l'adhérence au calcaire. En pratique, cela signifie qu'un bouche-fissures pourrait montrer une bonne performance et adhérer fortement au béton bitumineux, par exemple à Chicoutimi, en raison de sa compatibilité avec les granulats qu'on y retrouve, mais montrer une performance médiocre à Longueuil, par exemple, pour cause d'incompatibilité avec les granulats.

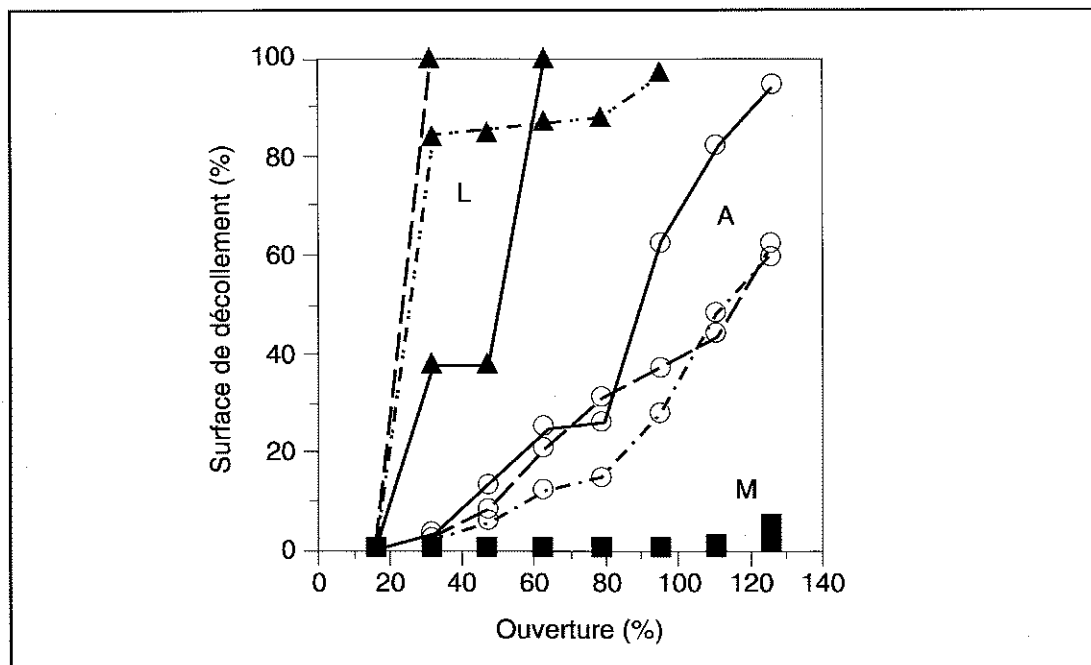


Figure 22. Surface de décollement des bouche-fissures pendant des tractions à échelle réelle, pour une fraisure témoin (ligne), chauffée (traits) et surchauffée (pointillé) avec la lance thermopneumatique

MÉTHODE D'APPLICATION RECOMMANDÉE

Le scellement des fissures des chaussées vise à réduire les infiltrations qui engendrent la dégradation. Comme on a pu le constater, la méthode est encore imparfaite; le décollement et l'arrachement du bouche-fissures sont courants et, en milieu urbain froid, ils peuvent atteindre des niveaux élevés après seulement quelques années.

Le scellement des fissures est une méthode d'entretien qui doit avant tout être appliquée avec discernement. Toutes les fissures ne se prêtent pas à l'application d'un bouche-fissures. Ces produits offrent de meilleures performances dans les fissures relativement jeunes dans lesquelles le béton bitumineux est en bon état. C'est pourquoi, nous avons constaté que les bouche-fissures des fraises de 12 x 12 mm², appliqués ici aux plus petites fissures, plus jeunes, présentaient une bonne performance.

Après avoir établi que le scellement des fissures est la méthode d'intervention la plus appropriée, il faut alors voir comment procéder. Un résumé des travaux exposés et des connaissances pertinentes aidera à répondre à cette question :

Géométrie des fraises. La performance des bouche-fissures dans les fraises de 40 x 10 mm² laisse à désirer, tandis que celle des produits dans les fraises de 12 x 12 mm² se révèle supérieure. En pratique, il est difficile de recouvrir une fissure d'une fraise de 12 mm. D'autre part, un bouche-fissures présente une meilleure performance s'il est plus large que profond. Mais, s'il est trop large, il devient trop exposé aux pneus. Une solution pratique s'impose ici d'elle-même : fraiser à plus de 12 mm mais à moins de 40 mm de largeur, et conserver un rapport L/H >1. Nous recommandons donc un fraisage de 20 x 10 mm² (largeur, profondeur). Si la fissure est relativement large (et vieille), la fraise peut-être de 30 x 15 mm² (largeur, profondeur).

Fraiseuses et fraisage. Le fraisage améliore la performance du bouche-fissures en lui donnant une géométrie avantageuse. Mais le fraisage par impact tel qu'on le connaît crée des microfissures qui ne peuvent que réduire la performance du mastic. Cette microfissuration est aujourd'hui difficile à éliminer puisqu'elle est inhérente à la méthode de fraisage. On pourrait sans doute réduire la microfissuration en changeant les fraises plus souvent mais la réduction de la fissuration serait probablement négligeable. C'est donc dire qu'une nouvelle technologie de fraisage sera nécessaire pour éliminer la microfissuration. Comme la microfissuration est plus étendue dans un béton bitumineux faible, ce qui est le cas des vieilles fissures, on aura avantage à calfeutrer les fissures alors qu'elles sont encore jeunes afin de minimiser la microfissuration.

Fraisat. À l'heure actuelle, on recueille le fraisat à l'aide d'un balai mécanique, la poussière qui reste dans les fraises étant souvent soufflée avec la lance. Cette méthode est inadéquate. La pression de la lance est souvent insuffisante pour bien nettoyer la fraise d'un seul coup et les passages répétés de la lance finissent par endommager le béton bitumineux. Il est préférable de nettoyer les fraises à l'aide d'un jet d'air à haute pression exempt d'huile et d'humidité. Pour vérifier l'état de la surface, on peut appliquer un ruban gommé très collant (« duct tape ») dans la fraise pour ensuite le retirer. Un nettoyage suffisant ne laissera aucun dépôt sur le ruban.

La lance thermopneumatique Nous n'avons pu démontrer que dans des conditions normales d'utilisation, la lance thermopneumatique à haute température (1 350 °C) pouvait améliorer la performance des bouche-fissures. De fait, elle peut endommager le béton bitumineux. Si le bouche-fissures a été choisi parce qu'il résiste aux basses températures et reste élastique, la lance devient inutile. Elle n'accroît pas l'adhérence du bouche-fissures, que le béton bitumineux soit sec ou humide. Si le bouche-fissures a été mal choisi et qu'il tend à devenir rigide à basse température, la lance accélère le décollement. Seulement deux

situations justifient le recours à une lance thermopneumatique, lance qui dans les deux cas ne doit pas atteindre plus de 400 °C:

- les bétons bitumineux contaminés par l'argile, cette dernière étant difficile à souffler sans application de chaleur.
- le temps froid (5 à 10 °C). A ces températures, le mastic doit être épandu immédiatement (< 30 s) après le passage de la lance.

C'est dire que dans ces cas spéciaux la lance thermopneumatique et le boyau d'épandage doivent tous deux suivre le train de mise en oeuvre. Devant le train de mise en oeuvre, on retrouvera la lance à air comprimé.

Chauffage du bouche-fissures. Dans la pratique actuelle de mise en oeuvre, le bouche-fissures est chauffé à 180-210 °C pendant 3-6 h. Dans ces conditions, il se dégrade. Pour éviter la dégradation, il devrait être chauffé moins d'une heure à des températures inférieures à 170 °C. Mais à cette température, la plupart des produits sont trop visqueux pour être épandus facilement. On aurait donc avantage à les reformuler pour un épandage plus facile. Dans l'intervalle, il est possible de ralentir la dégradation du bouche-fissures en l'appliquant à la température la plus basse suggérée. En outre, le produit doit rester moins longtemps dans le fondoir. La tendance actuelle favorise la productivité accrue et les fondoirs de 800 L et plus dans lesquels le bouche-fissures peut séjourner toute une matinée, sinon plus longtemps. Dans un fondoir de 400 L, le temps de chauffage serait réduit. L'autre choix est de ne remplir qu'à moitié le gros fondoir.

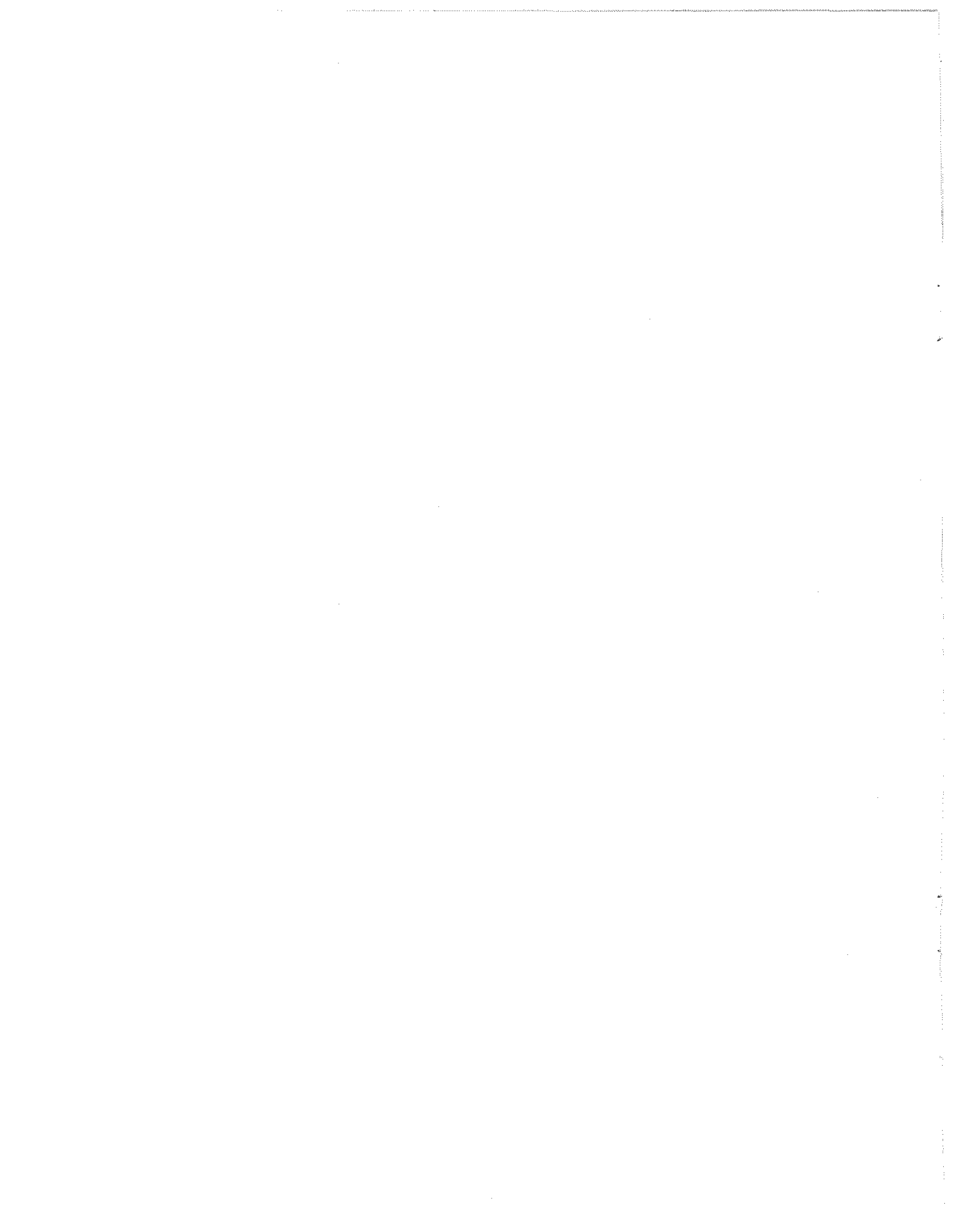
Choix du bouche-fissures. La norme ASTM D3405 qui s'applique au choix de bouche-fissures ne permet pas de sélectionner les bouche-fissures les plus performants, ceux qui sont appropriés pour les conditions urbaines et froides. Dans le contexte actuel de réductions budgétaires, cette situation est inacceptable. Elle force les autorités municipales à refaire les travaux de scellement des fissures beaucoup plus tôt que prévu. De plus, comme le contrôle de la qualité des bouche-fissures peut laisser à désirer, il est difficile de dresser *une liste permanente des produits les plus performants*. Devant ces problèmes, une solution unique s'impose : la norme de performance. Ce type de norme s'appuie sur une description phénoménologique des conditions de chantier; des essais de vieillissement et de comportement simulent les conditions réelles de service, ce qui n'est pas le cas des essais actuels. Cette norme de performance pour les bouche-fissures reste toutefois à établir. Dans l'intervalle, la norme actuelle peut toujours être utilisée pour écarter les pires produits.

Annexe A

Mise en oeuvre des bouche-fissures et mesure de leur performance

Les 12 produits étudiés ont été appliqués par la méthode du fraisage-nettoyage-chauffage-calfeutrage décrite dans l'introduction. Le profil de fraisure était soit carré, soit rectangulaire. Seules les fissures relativement jeunes ayant peu de ramifications ont été fraisées et scellées. Quoique jeunes, les fissures avaient des largeurs très variables. Les fissures larges ont été fraisées à $40 \times 10 \text{ mm}^2$ (largeur x hauteur), les petites à $12 \times 12 \text{ mm}^2$, et celles de largeur intermédiaire à $19 \times 19 \text{ mm}^2$. Chaque produit a été coulé dans 2 000 mètres linéaires de fraisure. Trois fraiseuses ont été utilisées en parallèle, chacune étant munie de fraises correspondant au profil de fraisure prédéfini.

Les travaux de scellement ont été réalisés en septembre 1991. Pour évaluer la performance des bouche-fissures et suivre l'évolution de leur rupture, on a mesuré périodiquement la longueur respective de décollement et d'arrachement à l'aide d'une roue étalonnée. Les longueurs de rupture, en pourcentage, ont été mesurées en tenant compte de la dimension et de l'orientation (transversale ou longitudinale) des fraises. Le premier relevé de la performance a été réalisé en décembre 1991, quelques semaines après l'exposition des mastics à des températures se situant entre -5 et -10 °C. D'autres relevés ont été effectués aux printemps 1992, 1993, 1994 et 1995, après que les bouche-fissures eurent été exposés à des températures annuelles oscillant entre -40 °C et $+37$ °C.



Annexe B

Essais en laboratoire

Les bouche-fissures ont été comparés sur la base de leurs caractéristiques viscosimétriques et thermogravimétriques et de leurs propriétés de traction.

Analyse viscosimétrique

La viscosité des bouche-fissures, maintenus isothermiquement à 185 °C et à 210 °C, a été mesurée à l'aide d'un viscosimètre Bohlin Visco-88-BV muni d'un mandrin cylindrique de 14 mm de diamètre et de 20 mm de longueur. Les mesures ont été prises périodiquement à une vitesse de cisaillement de 3,43 Hz dans un récipient assez grand pour prévenir les effets de bord. Les bouche-fissures ont été chauffés pendant six heures. Entre les lectures de viscosité, le bouche-fissures était agité lentement dans un récipient fermé et maintenu à température constante dans un bain d'huile thermostaté.

Analyse thermogravimétrique

Lors des analyses thermogravimétriques, nous avons utilisé des constituants types des bouche-fissures: trois élastomères, une poudre de caoutchouc recyclé et un bitume. Le bitume avait un grade de pénétration de 300/400 et contenait 11 % de composés saturés, 53 % de composés aromatiques, 26 % de résines et 10 % d'asphaltènes. La poudre de caoutchouc recyclé (Ultrafine GF-80, de Rouse Rubber Industries) contenait 13 % d'huiles. Les élastomères, vendus par Shell pour la modification de bitume, ne contenaient pas d'hydrocarbures. Il s'agissait d'un copolymère styrène-butadiène-styrène (SBS) (Kraton D1101), d'un copolymère styrène-isoprène (SI) ramifié (Kraton D1320X), et d'un copolymère styrène-butadiène (SB) ramifié (Kraton 4240P).

La perte de masse des matériaux, lors du chauffage, a été mesurée à l'aide d'un thermogravimètre Dupont 2200. Entre 15 et 20 mg de bouche-fissures et de leurs constituants types ont été chauffés rapidement jusqu'à 185 °C, 200 °C ou 210 °C. Une fois la température atteinte, le produit a été maintenu à cette température pendant trois heures. Les constituants types des bouche-fissures ont également été chauffés dans l'air à un taux de 5 °C/min et portés de 25 à 210 °C. Les changements de masse ont été enregistrés dans un flux d'air de 100 mL/min.

Traction des éprouvettes de bouche-fissures

Trois bouche-fissures ont été chauffés conformément à la méthode décrite pour les mesures de la viscosité. À intervalles réguliers, ils ont été étalés en nappes d'environ 3 mm d'épaisseur, puis mûris pendant 24 heures. Les éprouvettes ont été découpées en forme d'haltères M-III, comme le stipule la méthode d'essai ASTM D638, *Tensile Properties of Plastics*. Les éprouvettes ont été conditionnées à -40 °C pendant 24 heures, puis mises sous traction à raison de 50 mm/min dans un appareil de traction Instron équipé d'une enceinte maintenue à -37 ± 2 °C, lors de l'essai.

Essais d'adhérence

On a effectué des essais de traction à petite échelle et à échelle réelle pour évaluer l'adhérence des bouche-fissures au béton bitumineux. Dans l'essai à petite échelle, des éprouvettes bouche-fissures/briquettes de béton bitumineux ont été soumises à des tractions à -37 °C, à l'aide d'un appareil de traction Instron. La température d'essai était représentative des conditions climatiques rigoureuses auxquelles peuvent être exposés les bouche-fissures utilisés au Canada ou dans le nord des États-Unis.

Essais de traction à petite échelle. Les éprouvettes bouche-fissures/briquelette destinées aux essais à petite échelle ont été préparées avec un bitume de pénétration 85/100 et un granulat de calcaire ou de quartz (figure B1). Le granulat constituait 35 % de la section de la briquelette, soit à peu près celle d'un mélange bitumineux HL3 du ministère des Transports de l'Ontario, qui est de 42 %. Avant de couler le bouche-fissures entre les briquelettes, ces dernières ont été coupées en deux et leurs faces exposées ont été laissées sans traitement (témoin) ou ont été chauffées avec une lance thermopneumatique automatisée. La lance était le modèle B de L/A Manufacturing, Inc. (Covington, KY). Le traitement consistait :

- à noircir légèrement la surface du béton bitumineux (« chauffage normal » avec élévation de la température de surface jusqu'à 150-250 °C) par un passage de la lance à une vitesse de 40 cm/s à une distance de 50 mm de la surface;
- et à noircir la surface du béton bitumineux (« surchauffage » avec une élévation de la température de surface jusqu'à 250-350 °C) par le passage de la lance à une vitesse de 15 cm/s à une distance de 50 mm.

Pour les essais d'adhérence sur surface humide, le bouche-fissures a été coulé sur des briquelettes de béton bitumineux qui a) avaient été immergées dans l'eau 1 heure et asséchées avec un papier buvard ou b) qui

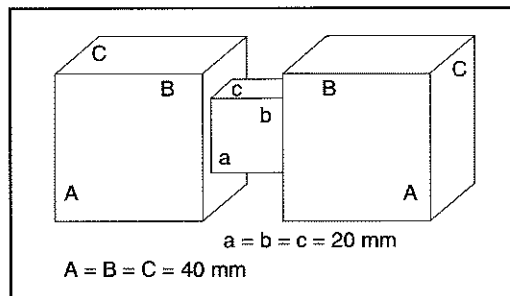


Figure B1. Diagramme illustrant un ensemble bouche-fissures/briquelettes. Les tailles des briquelettes et du bouche-fissures sont indiquées par des majuscules et des minuscules, respectivement.

avaient été traitées comme en a) en plus d'être chauffées normalement comme décrit ci-haut.

Afin de couler les bouche-fissures, ils ont été chauffés dans un bain d'huile à 185 °C. Les produits ont été agités lentement pendant 45 minutes avant d'être versés entre les briquelettes, pour prendre la forme d'un cube de 20 mm de côté (figure B1). Après un refroidissement jusqu'à environ 25 °C, les ensembles ont été conditionnés pendant 16 heures à 35 °C avant d'être soumis à des essais de traction dans l'appareil Instron. Les essais ont été effectués à -37 ± 2 °C et à une vitesse de traction de 10 mm/min. Dans ces conditions, les bouche-fissures se comportaient comme des éléments rigides et l'aire sous la courbe effort-déformation pouvait être assimilée à l'énergie de rupture de l'éprouvette, c.-à-d. à la force d'adhérence. Chaque valeur signalée est la moyenne de 9 à 15 mesures.

Essais de traction à échelle réelle. Dans le cas des essais de traction à échelle réelle, on a utilisé comme substrat un béton bitumineux au lieu de briquelettes. Il s'agissait d'un mélange HL3 du ministère des Transports de l'Ontario contenant un granulat de calcaire (taille maximale des granulats, 13 mm) et vieilli trois ans sur une planche d'essai située sur le terrain du CNRC à Ottawa. Pendant ces trois ans, la température de l'air avait varié de -37 °C à +35 °C. Avant les tractions le béton bitumineux a été fraisé à l'aide d'une fraiseuse Crafcro munie de fraises de carbure neuves; la fraisure mesurait 20 x 20 mm². Des sections de chaussée mesurant chacune 300 x 600 mm² et présentant en leur centre une portion fraisée ont été prélevées de la planche d'essai et rapportées au laboratoire, où elles ont été nettoyées et chauffées à la lance thermopneumatique, ou seulement nettoyées selon les conditions requises pour l'essai. Finalement, on a versé le bouche-fissures dans la fraisure, où il a formé un cordon de 20 mm d'épaisseur, de 20 mm de largeur et de 300 mm de longueur; l'échantillon bouche-fissures/béton bitumineux a ensuite été déposé sur la table d'essai (figure B2).

La table d'essai est constituée de deux platines d'acier pouvant être déplacées indépendamment l'une de l'autre. La platine de droite (figure B2) se déplace verticalement, tandis que celle de gauche se déplace horizontalement. Normalement, on dépose sur ces deux platines une éprouvette constituée de deux plaques de béton bitumineux; ces deux plaques sont collées aux platines et les bords adjacents des plaques constituent les joints. Chaque plaque se trouve ainsi sur une platine. En imprimant un mouvement approprié aux deux platines, on peut alors soumettre à des contraintes de traction, de compression ou de cisaillement le bouche-fissures versé entre les plaques adjacentes. La coordination du mouvement est assurée par des vérins hydrauliques commandés par ordinateur. Cet appareil permet donc de simuler les mouvements de la chaussée provoqués par la chaleur ou par la circulation. En installant la plate-forme d'essai dans une chambre froide, on peut simultanément exercer des mouvements cycliques dans les deux directions tout en déterminant l'effet des basses températures jusqu'à $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Nous avons comparé l'adhérence de bouche-fissures à un substrat de béton bitumineux sec chauffé à la lance thermopneumatique et à d'autres laissés sans traitement. Le mouvement de la fissure a été simulé par des tractions horizontales de 6 mm/h et un cisaillement dynamique vertical de $\pm 0,127\text{ mm}$. La température a été abaissée de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $-36,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ à raison de $1,5\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ pendant l'essai. Ces conditions ont été choisies sur la base de travaux antérieurs qui avaient montré que des conditions d'essai comparables pouvaient permettre de distinguer les bouche-fissures de bonne qualité et ceux de mauvaise qualité. L'essai a été effectué jusqu'à ce qu'il y ait rupture sur toute la longueur du joint ou pendant une durée maximale de cinq heures, selon le premier à survenir. Lors de l'essai, l'aire de décollement du bouche-fissures était mesurée toutes les 30 minutes. L'aire de décollement signalée est la moyenne calculée à partir des valeurs obtenues pour cinq éprouvettes.

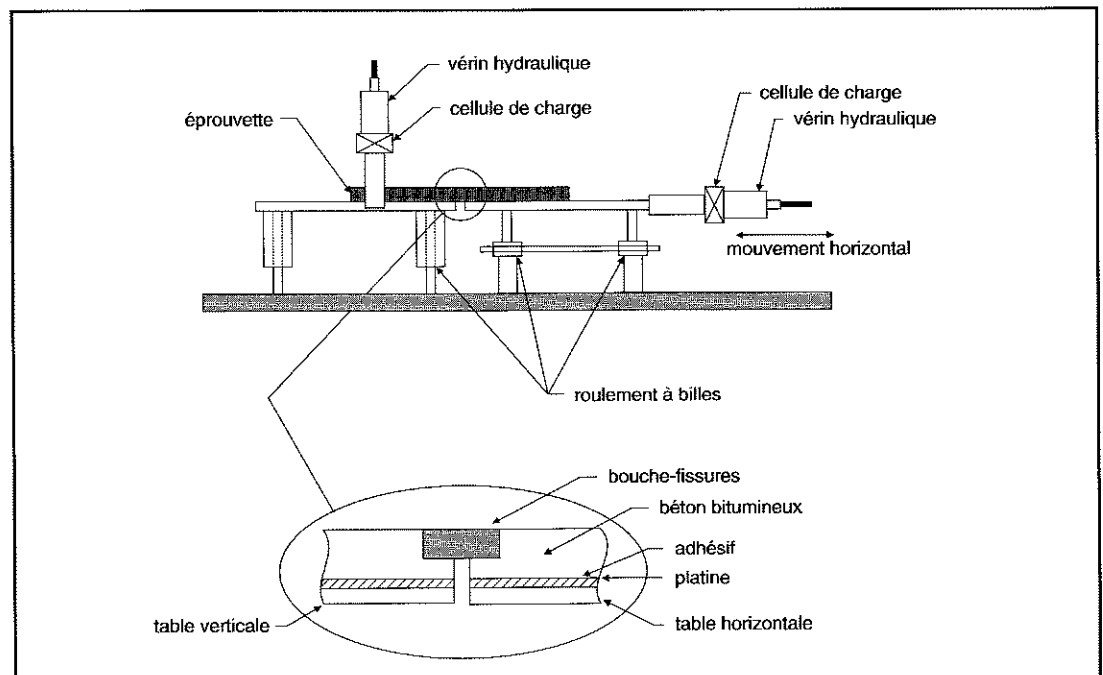


Figure B2. Diagramme illustrant le montage d'essai de traction à échelle réelle

