

Rapport Final

CHAPITRE 10 REPRISE DANS 2EME DOC CHAP 10

10.1 RÉSULTATS DES ESSAIS PHYSIQUES

10.1.1 PÉNÉTRATION

Pénétration à 25°C [¹ / ₁₀ mm]							
Planches d'essai	N° IMP	Livraison	DIN	PAV	0 ans	4 ans	8 ans
Nr. 1	A96-0113	80	47	26.3	43	34	16
Nr. 2	A96-0114	52	33	19.4	30	23	13
Nr. 3	A96-0115	77	51	26.0	50	39	22
Nr. 4	A96-0116	56	39	17.0	35	24	16
Nr. 5	A96-0117	71	50	28.0	45	33	20
Nr. 6	A96-0118	62	48	26.0	45	28	19
Nr. 7	A96-0119	51	37	18.2	36	24	15
Nr. 8	A96-0120	61	38	25.7	37	26	22
Nr. 9	A96-0121	62	41	18.0	31	24	20
Nr. 11	A96-0124	75	52	29.0	56	40	26
Nr. 14	A96-0127	61	42	21.0	43	33	18
Nr. 15	A96-0128	77	46	22.0	48	38	23
Nr. 16	A96-0129	58	37	18.5	39	28	16

Tableau 30: Vue d'ensemble des résultats de l'essai de pénétration

La détermination de la pénétration à 25°C a été effectuée selon la norme suisse en vigueur lors du projet SN 671 740a.

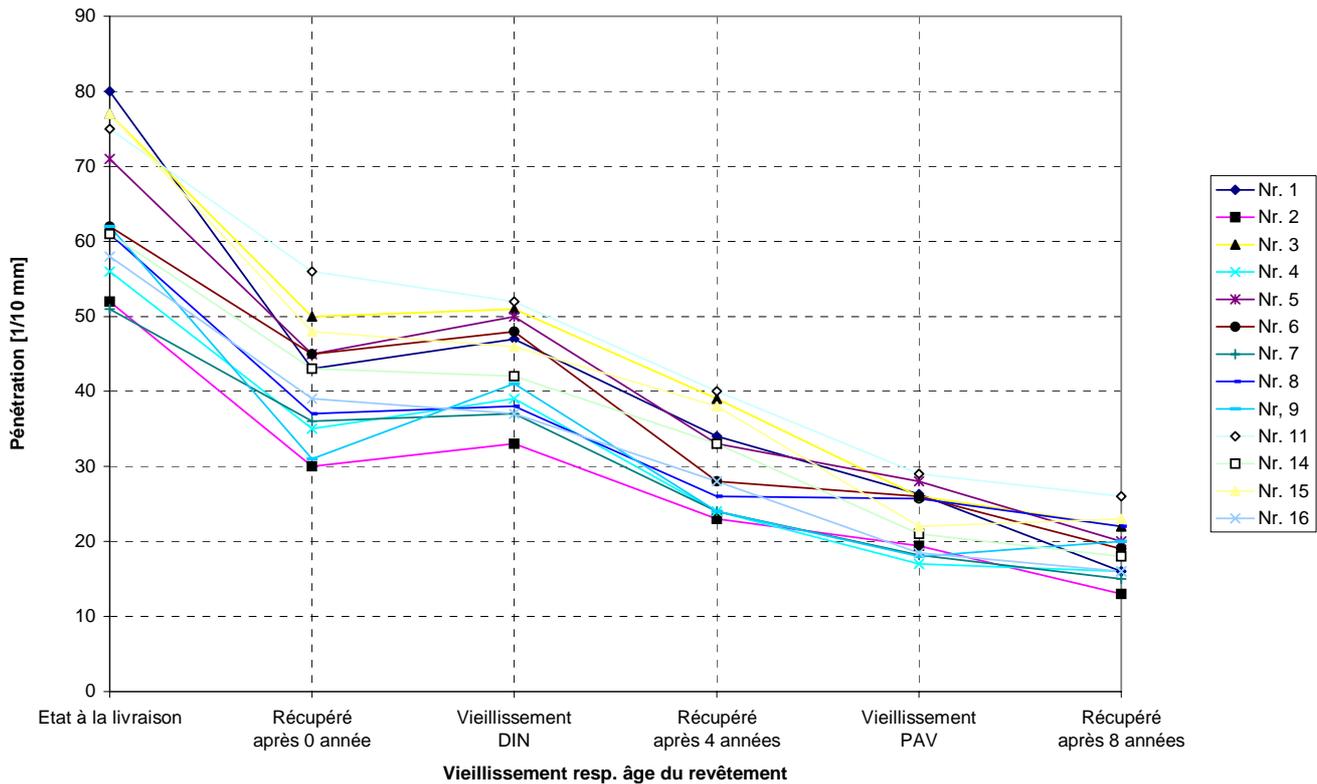


Figure 18: Evolution de la pénétration en fonction de la méthode de vieillissement en laboratoire, respectivement de l'âge du revêtement

La figure 18 montre l'évolution de la pénétration en fonction du temps. Le vieillissement en laboratoire DIN et PAV sont insérés dans l'axe du temps à côté des valeurs y correspondantes. Le vieillissement selon la méthode DIN correspond à un vieillissement à court terme et a été ainsi inséré près des valeurs "récupéré après 0 année" ; le vieillissement selon la méthode PAV correspond selon les données du programme SHRP à un vieillissement à long terme compris entre 4 et 8 années.

L'évolution de la pénétration pour l'ensemble des liants analysés se trouve dans une bande relativement étroite. Malgré d'importantes dispersions pour quelques résultats isolés, une tendance peut être mise en évidence.

De plus, il est à remarquer, que le vieillissement selon la méthode DIN corrèle très bien avec les valeurs obtenues directement après la pose. Le vieillissement à long terme simulé en laboratoire (PAV) se trouve entre les valeurs obtenues après 4 et 8 ans, mais avec une tendance plus proche des valeurs après 8 ans.

10.1.2 ANNEAU ET BILLE

Anneau et Bille [°C]							
Planches d'essai	N° IMP	Livraison	DIN	PAV	0 ans	4 ans	8 ans
Nr. 1	A96-0113	47.1	54.6	63.0	54.0	58.5	68.9
Nr. 2	A96-0114	52.2	59.5	71.4	59.7	67.8	77.2
Nr. 3	A96-0115	53.1	60.1	68.8	58.6	63.9	68.1
Nr. 4	A96-0116	55.1	62.1	77.4	60.7	68.0	77.5
Nr. 5	A96-0117	80.6	76.0	70.3	77.6	71.8	74.3
Nr. 6	A96-0118	81.0	74.4	73.5	77.6	74.7	77.6
Nr. 7	A96-0119	59.3	64.1	76.4	63.4	69.9	78.2
Nr. 8	A96-0120	59.5	72.1	88.5	68.7	78.4	81.6
Nr. 9	A96-0121	54.8	63.7	78.5	67.9	76.9	80.9
Nr. 11	A96-0124	53.0	57.9	68.2	56.9	62.5	64.8
Nr. 14	A96-0127	55.1	61.5	74.4	60.1	66.7	75.1
Nr. 15	A96-0128	47.4	54.6	65.3	53.0	57.9	63.2
Nr. 16	A96-0129	49.4	55.9	67.4	55.4	62.3	67.4

Tableau 31: Vue d'ensemble des résultats de l'essai du point de ramollissement Anneau et Bille

La détermination du point de ramollissement Anneau et Bille a été effectuée selon la norme suisse en vigueur lors du projet SN 671 743a.

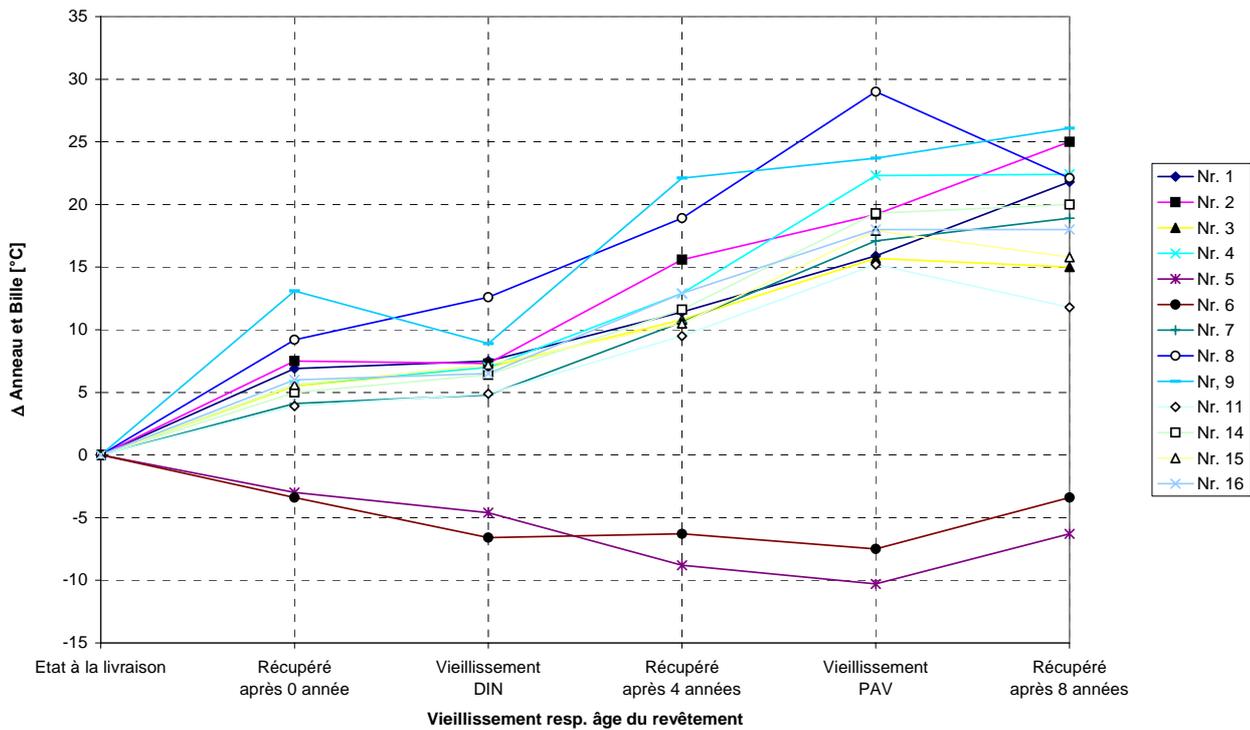


Figure 19: Evolution du point de ramollissement Anneau et Bille en fonction de la méthode de vieillissement en laboratoire, respectivement de l'âge du revêtement

La figure 19 montre l'évolution du point de ramollissement Anneau et Bille en fonction du temps. En ce qui concerne l'emplacement des vieillissements en laboratoire, les remarques pour la figure 19 sont ici aussi valables.

Dans ce graphique, ce ne sont pas les valeurs propres pour le point de ramollissement Anneau et Bille qui sont montrées, mais leur variation par rapport aux valeurs obtenues à l'état de livraison.

Les liants des planches N° 5 et 6 se comportent complètement différemment de l'ensemble des autres liants. Le processus de récupération des liants induit une modification de la micro-morphologie de la structure polymère (phénomène de restructuration).

Les autres liants montrent un comportement semblable dans une bande de dispersion relativement importante. De façon analogue aux observations de la pénétration, le vieillissement simulé en laboratoire correspond particulièrement bien avec les observations pratiques.

10.1.3 POINT DE RUPTURE FRAASS

Point de rupture Fraass [°C]							
Planches d'essai	N° IMP	Livraison	DIN	PAV	0 ans	4 ans	8 ans
Nr. 1	A96-0113	-18	-16	-11.3	-15	-16	-3
Nr. 2	A96-0114	-15	-10	-6.3	-12	-8	0
Nr. 3	A96-0115	-27	-18	-10.8	-21	-19	-7
Nr. 4	A96-0116	-19	-17	-9.2	-16	-14	-2
Nr. 5	A96-0117	-19	-17	-11.0	-17	-17	-5
Nr. 6	A96-0118	-25	-18	-11.5	-17	-20	-6
Nr. 7	A96-0119	-19	-22	-9.0	-22	-18	-5
Nr. 8	A96-0120	-24	-21	-5.7	-22	-21	-6
Nr. 9	A96-0121	-23	-19	-7.2	-15	-21	-9
Nr. 11	A96-0124	-20	-21	-9.3	-18	-24	-8
Nr. 14	A96-0127	-25	-19	-12.5	-19	-24	-6
Nr. 15	A96-0128	-20	-20	-10.0	-15	-18	-8
Nr. 16	A96-0129	-17	-15	-6.2	-15	-15	-1

Tableau 32: Vue d'ensemble des résultats de l'essai du point de rupture Fraass

La détermination du point de rupture selon Fraass a été effectuée selon la norme suisse en vigueur lors du projet SN 671 755a.

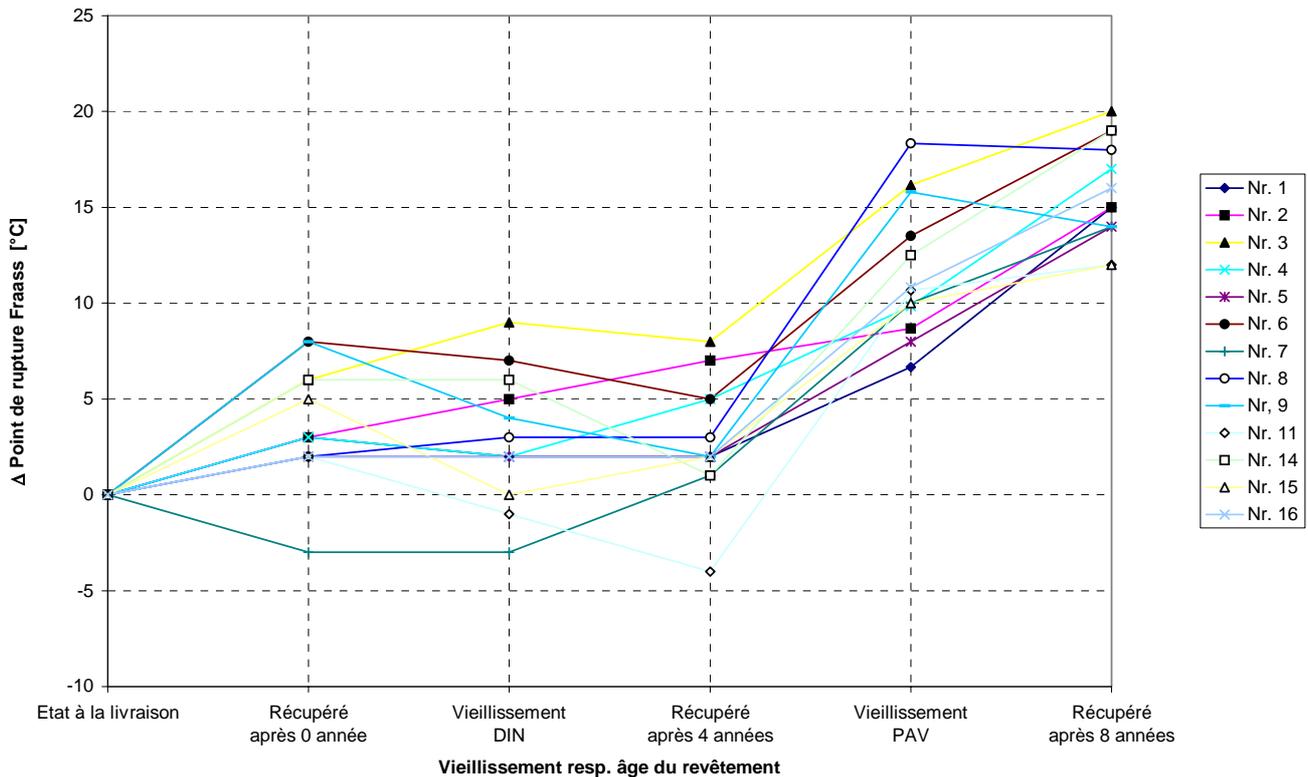


Figure 20: Evolution du point de rupture selon Fraass en fonction de la méthode de vieillissement en laboratoire, respectivement de l'âge du revêtement

La figure 20 ne montre pas les valeurs individuelles du point de rupture selon Fraass, mais uniquement leur variation par rapport aux valeurs obtenues à l'état de livraison.

La détermination du point de rupture selon Fraass peut être contrariée par sa mauvaise reproductibilité (comparaison entre différents laboratoires). Comme la répétabilité de l'essai (différents essais au sein du même laboratoire) est sensiblement meilleure que la reproductibilité, les essais ont été effectués par un seul laboratoire sur toute la durée de ce projet.

Des évolutions très différentes sont à remarquer partiellement pour les Pmb ; cependant une certaine tendance peut être mise en évidence.

Il est également à remarquer que pour le point de rupture selon Fraass, le vieillissement à court terme (DIN) et à long terme (PAV) exécutés en laboratoire correspondent particulièrement bien avec les observations pratiques.

10.1.4 RECOUVRANCE ÉLASTIQUE

Recouvrance élastique à 25°C [%]							
Planches d'essai	N° IMP	Livraison	DIN	PAV	0 ans	4 ans	8 ans
Nr. 1	A96-0113	14.0	15.0	22.5	12.5	13.8	24
Nr. 2	A96-0114	14.0	15.0	éch. fissuré	15.5	éch. fiss.	éch. fiss.
Nr. 3	A96-0115	78.0	77.0	éch. fissuré	78.0	75.3	69.7
Nr. 4	A96-0116	78.0	70.0	éch. fissuré	58.5	67.3	67
Nr. 5	A96-0117	100.0	91.0	71.8	84.5	81.3	76.7
Nr. 6	A96-0118	97.0	92.0	78.8	89.8	82.5	77.3
Nr. 7	A96-0119	64.0	58.0	éch. fissuré	61.5	59.8	57.7
Nr. 8	A96-0120	30.0	40.0	éch. fissuré	éch. fiss.	éch. fiss.	éch. fiss.
Nr. 9	A96-0121	60.0	58.0	éch. fissuré	éch. fiss.	éch. fiss.	éch. fiss.
Nr. 11	A96-0124	82.0	78.0	56.5	77.3	73.0	68.0
Nr. 14	A96-0127	58.0	61.0	éch. fissuré	61.3	éch. fiss.	éch. fiss.
Nr. 15	A96-0128	15.0	16.0	éch. fissuré	11.5	15.3	13.3
Nr. 16	A96-0129	10.0	12.0	éch. fissuré	12.5	15.0	éch. fiss.

Tableau 33: Vue d'ensemble des résultats de l'essai de recouvrance élastique

La détermination de la recouvrance élastique a été effectuée selon la norme suisse en vigueur SN 671 747.

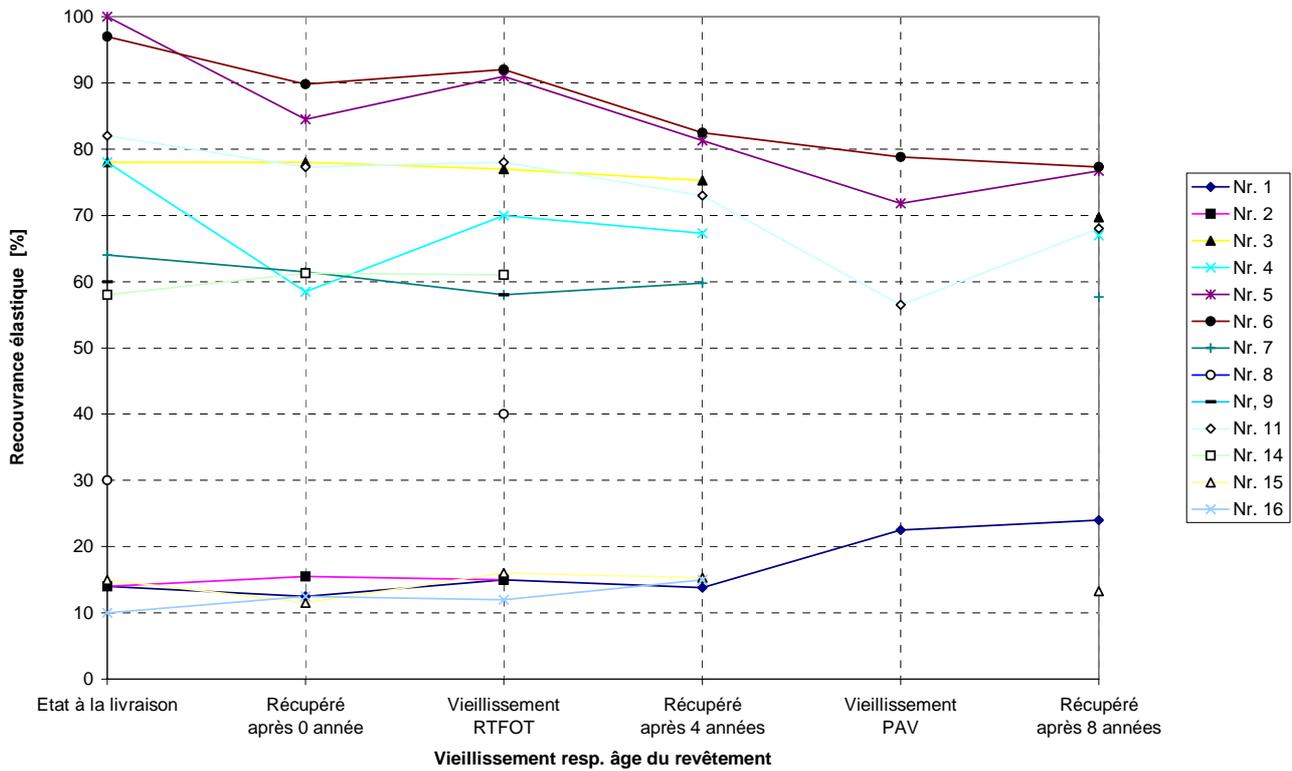


Figure 21: Evolution de la recouvrance élastique en fonction de la méthode de vieillissement en laboratoire, respectivement de l'âge du revêtement

Lors de la détermination de la recouvrance élastique, certaines valeurs n'ont pas pu être déterminées, car relativement beaucoup d'échantillons se sont fissurés lors de l'essai.

La méthode d'essai de la recouvrance élastique est avant tout appropriée pour la mise en évidence de la modification avec des élastomères. Au contraire, cette méthode n'est pas utile pour observer le comportement au vieillissement.

10.1.5 BENDING BEAM RHEOMETER

Bending Beam Rheometer Rigidité à -15°C et 60 secondes [kPa]							
Planches d'essai	N° IMP	Livraison	DIN	PAV	0 ans	4 ans	8 ans
Nr. 1	A96-0113	101'717	111'433	161'900	132'100	205'167	176'000
Nr. 2	A96-0114	156'800	160'767	219'333	168'900	255'167	287'800
Nr. 3	A96-0115	86'495	-	153'233	110'500	163'067	159'266
Nr. 4	A96-0116	121'100	-	198'833	172'100	232'033	239'700
Nr. 5	A96-0117	90'747	-	153'650	149'300	212'200	225'033
Nr. 6	A96-0118	93'903	-	151'733	136'800	198'867	208'666
Nr. 7	A96-0119	90'667	-	162'100	140'200	211'733	264'133
Nr. 8	A96-0120	89'277	100'223	140'800	123'000	171'067	156'100
Nr. 9	A96-0121	63'350	-	157'733	493'600	271'076	253'333
Nr. 11	A96-0124	125'433	157'700	220'867	120'600	195'200	167'100
Nr. 14	A96-0127	78'707	-	153'733	118'700	186'933	220'033
Nr. 15	A96-0128	128'800	-	196'600	149'100	205'800	234'100
Nr. 16	A96-0129	150'700	-	223'133	195'900	248'033	296'300

Tableau 34: Vue d'ensemble des résultats de la rigidité au Bending Beam Rheometer

Les essais au Bending Beam Rheometer ont été effectués selon la méthode SHRP.

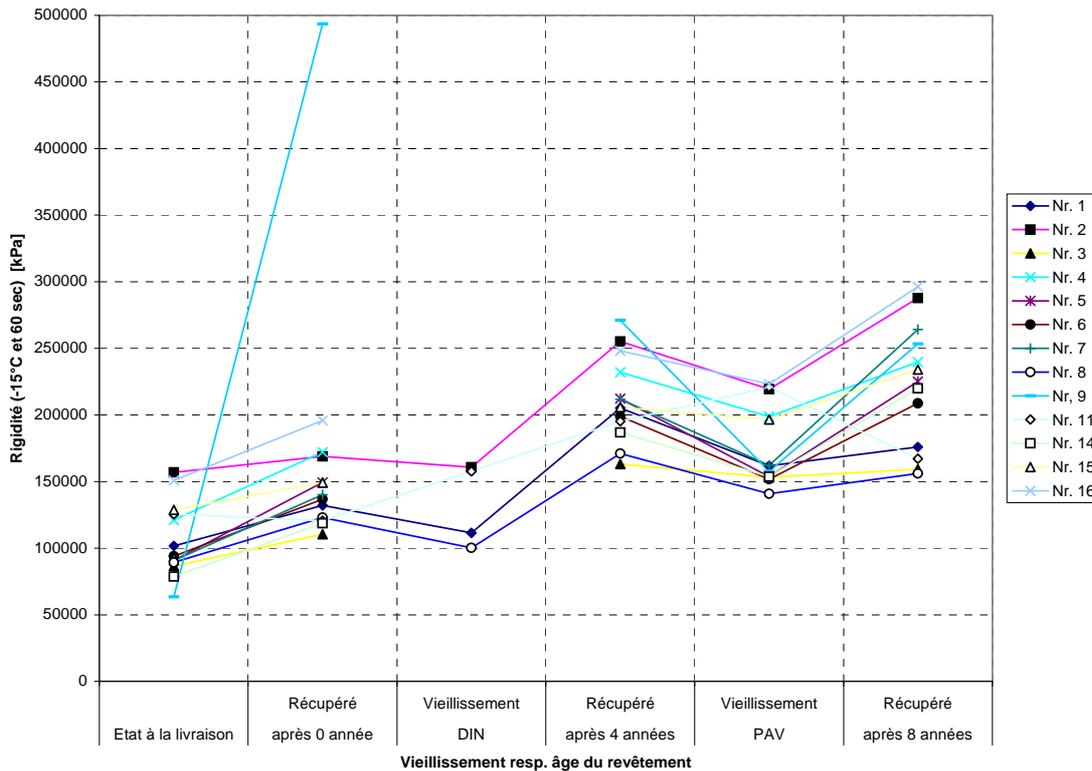


Figure 22: Evolution de la rigidité au Bending Beam Rheometer en fonction de la méthode de vieillissement en laboratoire, respectivement de l'âge du revêtement

Les tableaux 34 à 37 et les figures 22 à 25 représentent les résultats obtenus avec le Bending Beam Rheometer. Il s'agit de la rigidité à -15°C et 60 secondes, de la valeur m à ces conditions d'essai et les températures pour lesquelles la valeur $m = 0.3$ est atteinte ainsi que la température pour laquelle la rigidité est de 300 MPa.

La température $T_{m=0,3}$ corrèle particulièrement bien avec la température de rupture suite aux sollicitations thermiques. La température $T_{S=300\text{ MPa}}$ corrèle particulièrement bien avec la température pour laquelle un liant obtient la plus grande résistance à la traction.

Les liants des planches N° 8 et 9 se comportent particulièrement différemment des autres Bmp. Il est connu que pour le liant de la planche N° 9, qu'en plus de la modification avec des polymères, des antioxydants ont été également employés. Cette planche de mesure se différencie également totalement des autres planches en ce qui concerne son comportement à long terme (formation de fissures).

Les 4 graphiques montrent une tendance semblable quant à l'influence du vieillissement sur les caractéristiques constatées par le Bending Beam Rheometer.

Bending Beam Rheometer Valeur m à -15°C et 60 secondes						
Planches d'essai	Livraison	DIN	PAV	0 ans	4 ans	8 ans
Nr. 1	0.425	0.389	0.324	0.368	0.321	0.310
Nr. 2	0.383	0.347	0.293	0.324	0.292	0.281
Nr. 3	0.387	-	0.329	0.356	0.321	0.346
Nr. 4	0.388	-	0.295	0.332	0.293	0.294
Nr. 5	0.407	-	0.320	0.363	0.312	0.301
Nr. 6	0.414	-	0.329	0.346	0.322	0.319
Nr. 7	0.409	-	0.314	0.359	0.312	0.297
Nr. 8	0.335	0.294	0.234	0.279	0.246	0.254
Nr. 9	0.402	-	0.296	0.195	0.253	0.267
Nr. 11	0.453	0.413	0.369	0.439	0.363	0.339
Nr. 14	0.422	-	0.320	0.379	0.311	0.299
Nr. 15	0.426	-	0.323	0.377	0.330	0.313
Nr. 16	0.378	-	0.297	0.350	0.307	0.303

Tableau 35: Vue d'ensemble des résultats de la valeur m au Bending Beam Rheometer

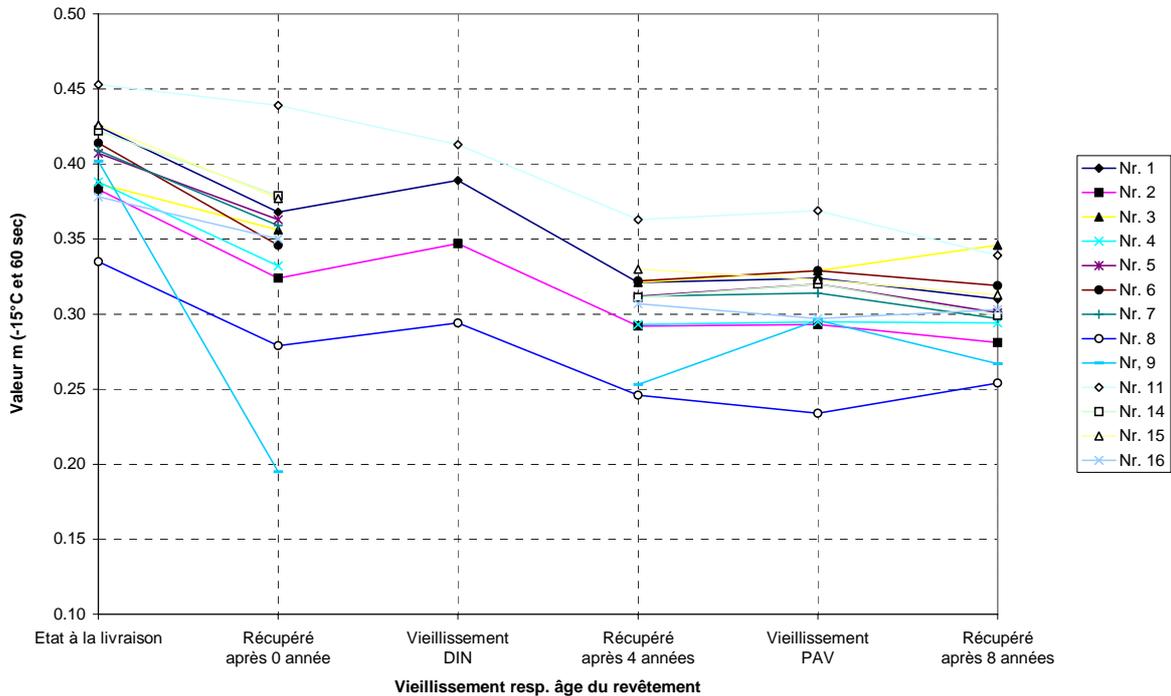


Figure 23: Evolution de la valeur m au Bending Beam Rheometer en fonction de la méthode de vieillissement en laboratoire, respectivement de l'âge du revêtement

<p align="center">Bending Beam Rheometer Température pour laquelle la valeur $m = 0.3$</p>						
Planches d'essai	Livraison	DIN	PAV	0 ans	4 ans	8 ans
Nr. 1	-23.2	-	-17.5	-	-17.1	-17.7
Nr. 2	-21.4	-	-14	-	-14.1	-12.3
Nr. 3	-22.5	-	-17.9	-	-17.4	-19.5
Nr. 4	-22.1	-	-14.4	-	-14.2	-14.3
Nr. 5	-21.9	-	-17.1	-	-16.1	-14.0
Nr. 6	-23.6	-	-18.3	-	-17.2	-16.7
Nr. 7	-22.8	-	-17.0	-	-16.4	-14.9
Nr. 8	-19.2	-	0.7	-	-3.4	-5.7
Nr. 9	-26.3	-	-14.4	-	-7.9	-10.5
Nr. 11	-22.9	-	-20.1	-	-19.9	-19.9
Nr. 14	-24.4	-	-17.7	-	-16.1	-14.8
Nr. 15	-22.9	-	-17.6	-	-17.0	-16.1
Nr. 16	-19.1	-	-14.7	-	-15.6	-15.3

Tableau 36: Vue d'ensemble des résultats de $T_{m=0.3}$ au Bending Beam Rheometer

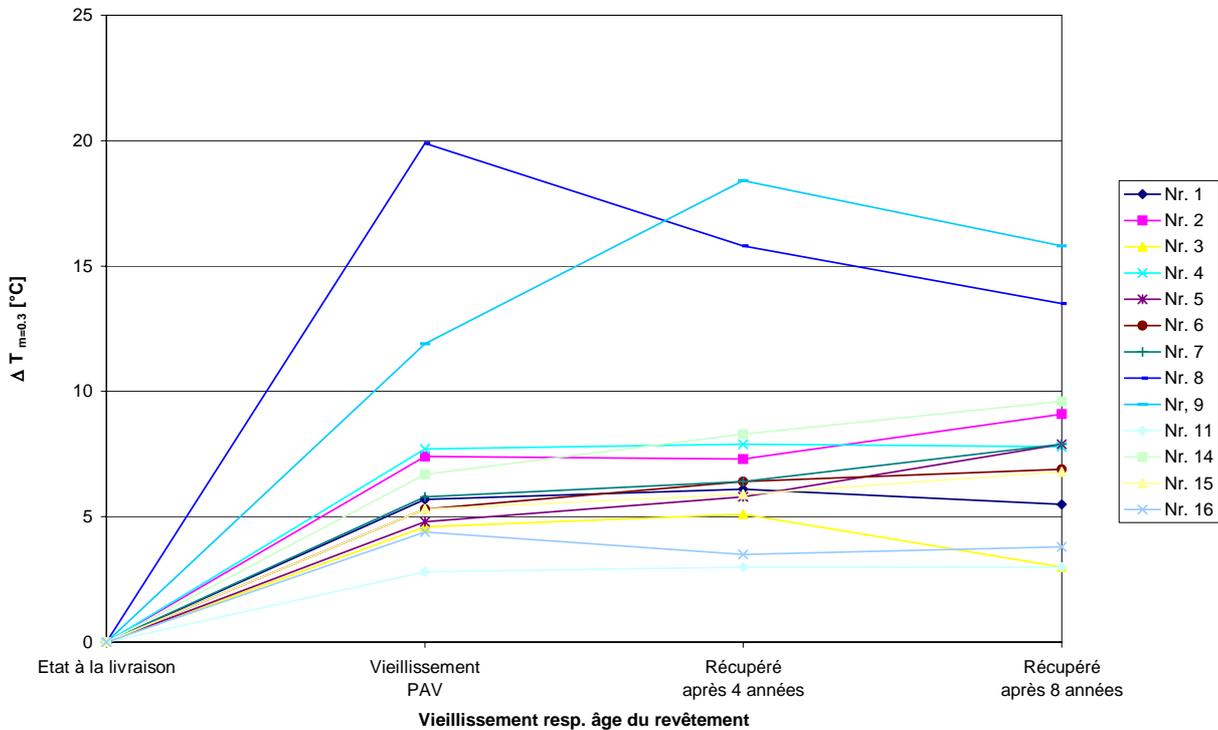


Figure 24: Evolution de la valeur $T_{m=0.3}$ au Bending Beam Rheometer en fonction de la méthode de vieillissement en laboratoire, respectivement de l'âge du revêtement

<p align="center">Bending Beam Rheometer Température pour laquelle la rigidité = 300 MPa</p>						
Planches d'essai	Livraison	DIN	PAV	0 ans	4 ans	8 ans
Nr. 1	-21.7	-	-20.1	-	-18.2	-18.9
Nr. 2	-19.8	-	-17.9	-	-16.6	-15.3
Nr. 3	-23.6	-	-20.5	-	-19.6	-19.2
Nr. 4	-21.6	-	-18.8	-	-17.5	-16.8
Nr. 5	-23.1	-	-20.9	-	-18.4	-17.0
Nr. 6	-23.3	-	-20.6	-	-18.6	-17.7
Nr. 7	-22.3	-	-20.5	-	-18.3	-16.0
Nr. 8	-25.0	-	-28.6	-	-21.3	-21.8
Nr. 9	-25.4	-	-20.3	-	-16.2	-16.3
Nr. 11	-20.1	-	-16.4	-	-18.4	-18.0
Nr. 14	-24.3	-	-21.0	-	-19.3	-17.2
Nr. 15	-20.8	-	-18.5	-	-18.0	-16.6
Nr. 16	-19.2	-	-17.4	-	-17.2	-15.1

Tableau 37: Vue d'ensemble des résultats de $T_{S=300MPa}$ au Bending Beam Rheometer

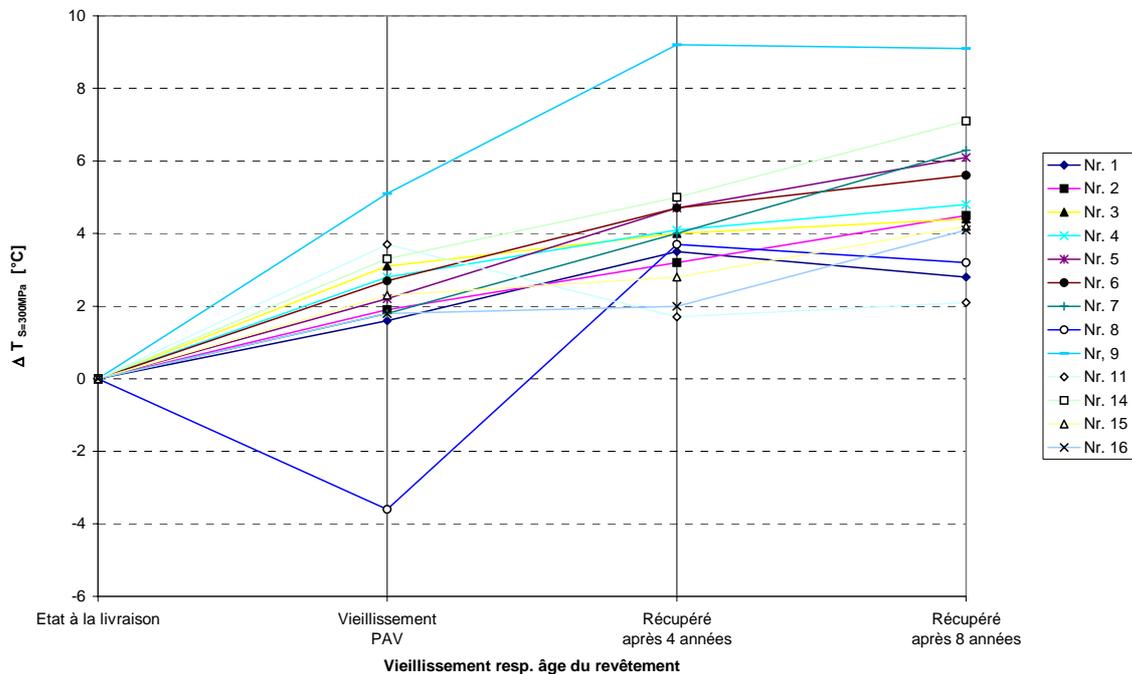


Figure 25: Evolution de la valeur $T_{S=300MPa}$ au Bending Beam Rheometer en fonction de la méthode de vieillissement en laboratoire, respectivement de l'âge du revêtement

10.1.6 FORCE – DUCTILITÉ

Force - Ductilité							
Energie jusqu'à la rupture [J/cm ²]							
Planches d'essai	IMP Nr.	Livraison	DIN	PAV	0 ans	4 ans	8 ans
Nr. 1	A96-0113	4.570	-	4.424	-	0.480	0.650
Nr. 2	A96-0114	4.492	-	4.054	-	0.061	0.110
Nr. 3	A96-0115	8.082	-	11.248	-	10.100	12.400
Nr. 4	A96-0116	13.793	-	éch. fissuré	-	0.170	0.380
Nr. 5	A96-0117	13.348	-	16.121	-	14.000	3.800
Nr. 6	A96-0118	16.384	-	14.071	-	14.700	20.400
Nr. 7	A96-0119	9.125	-	8.031	-	0.530	1.200
Nr. 8	A96-0120	2.863	-	éch. fissuré	-	0.200	0.150
Nr. 9	A96-0121	5.315	-	8.357	-	0.060	0.180
Nr. 11	A96-0124	15.894	-	éch. fissuré	-	9.200	12.300
Nr. 14	A96-0127	5.769	-	7.202	-	1.760	2.700
Nr. 15	A96-0128	4.628	-	éch. fissuré	-	1.110	0.410
Nr. 16	A96-0129	4.720	-	éch. fissuré	-	0.440	0.450

Tableau 38: Vue d'ensemble des résultats de l'essai force - ductilité

L'essai force ductilité a été effectué selon la procédure décrite dans le du mandat de recherche FA 13/99 "Optimisation de l'essai force – ductilité pour les Bmp"

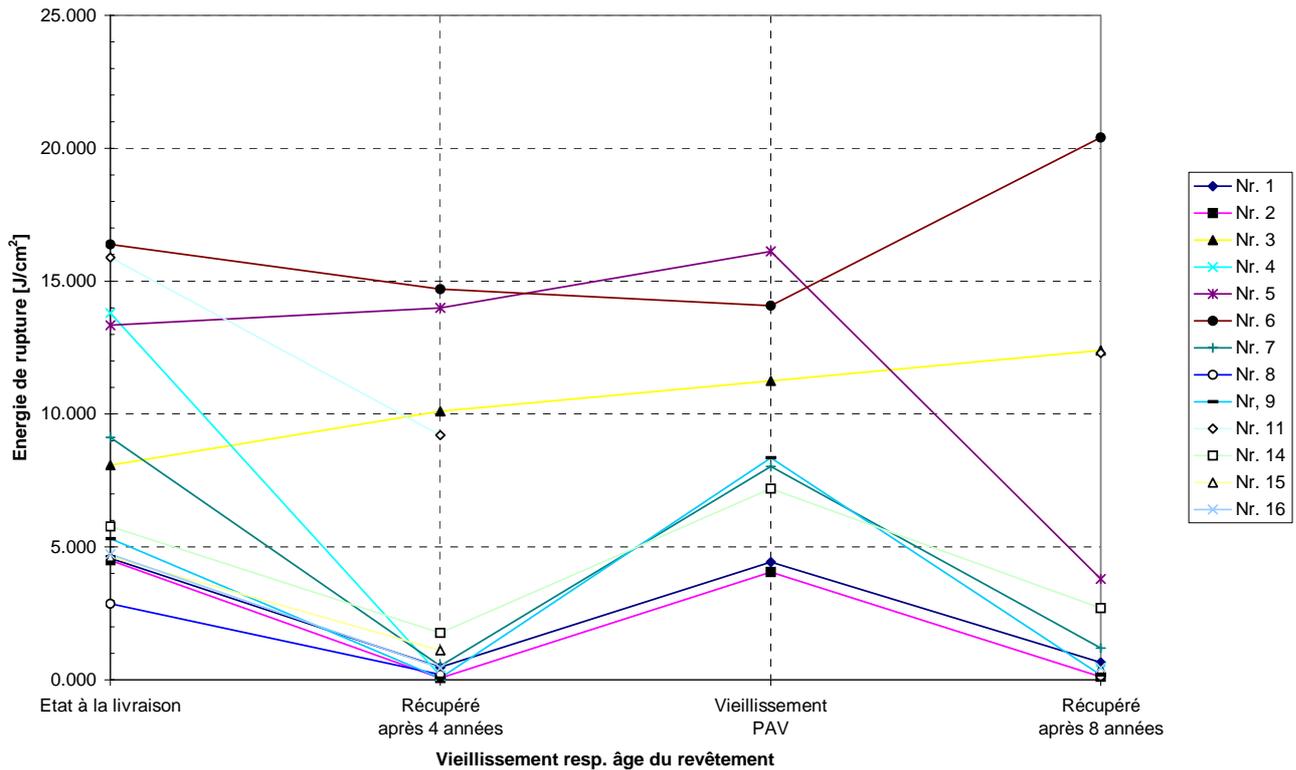


Figure 26: Evolution de l'énergie de rupture à l'essai force – ductilité en fonction de la méthode de vieillissement en laboratoire, respectivement de l'âge du revêtement

L'essai de force – ductilité a été développé comme alternative à la recouvrance élastique, pour pouvoir différencier nettement les Bmp modifiés des non-modifiés. Pour cette raison, cette méthode d'essai a été incluse ultérieurement au programme d'essais. Les valeurs après le vieillissement DIN ainsi que pour le bitume récupéré après 0 année manquent, car les liants n'ont pu être obtenus après coup.

Pour les liants des planches Nr. 3, 5 et 6, il est à constater, que les énergies jusqu'à la rupture pour l'ensemble des états de vieillissement sont d'un ordre de grandeur identique. Pour les liants des planches Nr. 1, 2, 7, 9 et 14, les énergies jusqu'à la rupture des liants récupérés sont sur l'ensemble particulièrement plus basses que celles obtenues sur les liants non récupérés (livraison et PAV). Il est possible que la procédure de récupération ait pu modifier les caractéristiques du liant à un tel point, que la pertinence de l'essai en soit réduite. De plus il faut remarquer que dans le cadre de la présente étude, l'énergie de l'essai force – ductilité est calculée jusqu'à la rupture. Dans le cadre du mandat de recherche FA 13/99 "Optimisation de l'essai force – ductilité pour les Bmp" il a pu être déterminé, que l'énergie jusqu'à la rupture comme valeur de mesure n'est pas suffisamment pertinente. Pour cette raison, dans la nouvelle norme SN 670 548 "Liants bitumineux, Force - ductilité" un autre procédé pour le calcul de l'énergie a été proposé.

10.2 CARACTÉRISATION CHIMIQUE DU VIEILLISSEMENT DES BITUMES ET BITUMES POLYMÈRES PAR IRTF

10.2.1 GÉNÉRALITÉS

L'appréciation des changements chimiques des Bmp à la suite de leur vieillissement, en se basant sur les résultats obtenus au IRTF, a été effectuée par Monsieur C. Grimm, ingénieur-chimiste EPFZ. Dans ce chapitre est présenté le résumé d'un travail accompli par Monsieur Grimm en janvier 2000 mais non publié.

10.2.1.1 Spectres des constituants purs

- Spectre du bitume:

En règle générale, les spectres des bitumes sont remarquablement constants, quels que soit l'origine et les caractéristiques du bitume, à l'exception de quelques différences dans la zone d'absorption comprise entre 720 et 870 cm^{-1} (= finger print du bitume) et celle correspondant à l'absorption des liaisons aromatique à la fréquence de 1600 cm^{-1} .

- Spectre du SBS:

Les spectres des copolymères butadiène-styrène dépendent des quantités relatives de butadiène (BD) et de styrène (St). Les SBS modificateurs du bitume sont pour la plupart constitués de 20 à 30% de styrène et de 70 à 80% de butadiène.

Les bandes d'absorption se trouvent à 700 cm^{-1} pour le styrène et à 966 cm^{-1} pour le butadiène.

- Spectre de l'APP:

Le polypropylène atactique présente un spectre plus proche de celui du bitume, ce qui est dû à leur composition hydrocarbonée aliphatique commune. Les absorptions à 1160 et 965 cm^{-1} sont négligeables dans le bitume. L'absorption à 1380 cm^{-1} (par comparaison avec celle à 1460 cm^{-1}) est plus forte dans l'APP que dans le bitume.

Ces trois éléments liés à la forte concentration en groupe $-\text{CH}_3$ dans l'APP, peuvent donc servir d'indicateur de la présence d'APP dans le bitume (vibrations de déformation en dehors du plan de CH_3 à 1160 cm^{-1}).

- Spectre de l'EVA:

Pour la modification des bitumes routiers, on utilise généralement des copolymères, dont le taux d'acétate de vinyle est de 30 % environ (EVA: Copolymère éthylène acétate de vinyle).

Les bandes d'absorption à 1740, 1245 et 1030 cm^{-1} sont dues au copolymère acétate de vinyle, tandis que celles situées à 1460 et 720 cm^{-1} sont issues du polyéthylène.

- Spectre de l'EPDM:

L'EPDM (Terpolymère éthylène-propylène diène-monomère avec 5-éthylidène-norbornène comme composant diène) est un terpolymère d'éthylène propylène et diène.

Leurs propriétés essentielles résident dans leur bonne résistance au vieillissement vis-à-vis de l'ozone, de par leur structure très saturée, et vis-à-vis de la chaleur.

On peut se servir indirectement des spectres des composants éthylène et propylène, dont la superposition des deux devrait permettre de distinguer la et les bandes, auprès desquelles l'absorption dû au bitume est négligeable. Manifestement, on s'aperçoit que le bande à 1160 cm^{-1} due au polypropylène, peut servir d'indicateur de la présence d'EPDM dans le bitume.

- Spectre des polyoléfines:

Il s'agit également d'une famille de polymères, dont la polymérisation est modulée suivant les proportions respectives de chaque monomère, avec comme résultat différents types de polyoléfines.

Suivant le type de polyoléfine incorporée au bitume (planches nos 7 et 10), la bande d'absorption servant d'indicateur de la présence du polymère peut changer. Selon le cas de figure, on trouve le repère à 1160 cm^{-1} ou à 965 cm^{-1} .

10.2.1.2 Spectres des mélanges bitumes-polymères et ajouts

- Mélanges bitume-SBS:

La comparaison des spectres du bitume avec ceux du SBS permet de tirer les conclusions suivantes:

- Le SBS à 30% de styrène présente un spectre très nettement différent de celui du bitume. Les plus importantes sont situées à env. 966 , 911 et 700 cm^{-1} . Ces bandes, en particulier celle à 966 cm^{-1} , peuvent donc servir de témoins de la présence de SBS dans le bitume.

- Mélanges bitume-APP:

La bande à 966 cm^{-1} peut être choisie comme témoin de la présence d'APP dans le bitume.

- Mélanges bitume-EVA:

Il y a superposition des bandes respectives d'absorption du bitume et de l'EVA pour les domaine de fréquence vers 720 cm^{-1} , 1030 cm^{-1} et 1460 cm^{-1} . Seules les bandes à 1245 cm^{-1} et 1740 cm^{-1} permettent de repérer ce dernier. Pour simplifier, on ne retiendra que celle à 1740 cm^{-1} .

- Mélanges bitume-EPDM:

En comparant les spectres du polyéthylène, du polypropylène et du bitume, on remarque qu'une seule bande à 1160 cm^{-1} peut servir de témoin.

- Mélanges bitume-polyoléfine:

On est en présence de deux cas de figure:

Planche n° 7: c'est la bande à 966 cm^{-1} qui peut servir de témoin de la présence de polymère de type polyoléfine.

Planche n° 11: c'est la bande à 1160 cm^{-1} qui retient l'attention.

10.2.1.3 Les traitements des liants pour simuler :

- le vieillissement à court terme (pendant la construction de la chaussée)
 - le vieillissement à long terme (pendant les cinq années de la durée de vie de la chaussée)
- sont respectivement le RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) et le PAV (Pressure Ageing Vessel). Le vieillissement à court terme est obtenu par RTFOT. Le vieillissement à long terme est obtenu successivement par RTFOT, puis PAV (vieillissement sous pression d'air).

Si l'essai de vieillissement artificiel RTFOT simule correctement le vieillissement du bitume à l'enrobage en centrale, il n'en est pas de même pour la simulation du vieillissement sur route.

Dans le cadre du programme de recherche américain SHRP sur de nouvelles spécifications, un essai de simulation du vieillissement des bitumes a été mis au point: le Pressure Ageing Vessel. Les bitumes, après avoir subi l'essai de RTFOT sont placés dans une enceinte à 100 °C sous une pression de 20 bars pendant 20 heures. Cet essai est censé simuler un vieillissement in situ durant les cinq premières années de service.

10.2.2 ANALYSE DES RÉSULTATS

On propose dans les tableaux 10-11 et 10-12 de l'annexe 8, deux types d'exploitation des différents pics d'identification des polymères et ajouts:

- a) Mesure de l'aire spécifique des bandes respectives d'absorption

Cette mesure est en principe effectuée du point le plus bas d'une vallée au point le plus bas de l'autre vallée de part et d'autre de la bande. Les points bas sont reliés par une ligne de base délimitant ainsi l'objet géométrique dont l'aire est à calculer par un intégrateur.

- b) Cas particulier des bitumes-SBS

Dans le cas particulier des signaux enregistrés à 965 cm^{-1} , il se trouve que le signal voisin dû aux composés sulfoxydes à 1030 cm^{-1} provoque une interférence telle que le signal du SBS devient asymétrique avec formation d'une vallée-plateau entre les deux signaux. Il en résulte un décalage oblique de la ligne de base, de sorte que la mesure de l'aire de la bande à 965 cm^{-1} devient aléatoire.

Il est préférable dans ce cas de procéder à une exploitation par la mesure de la hauteur spécifique de la bande à 965 cm^{-1} , laquelle est donnée par la perpendiculaire passant par le sommet à la ligne de base.

c) Mesure de la hauteur spécifique des bandes respectives d'absorption

Les valeurs de la hauteur de pic mesurées à 965 cm^{-1} permettent, dans le cas des bitumes-SBS, d'obtenir les renseignements suivants sur le vieillissement:

Il s'agit en premier lieu de la concentration résiduelle en SBS après vieillissement. Il est bien évident qu'un SBS chimiquement modifié par saturation des doubles liaisons du groupe transbutadiène, n'est plus pris en compte par la mesure IRTF à 965 cm^{-1} .

En revanche, il n'est pas certain qu'une fraction de polymère de basse masse moléculaire résultant d'une éventuelle dégradation par fragmentation des chaînes, soit réellement pris en compte dans la méthode IRTF, en particulier quand le polymère est susceptible d'évoluer dans sa structure et donc d'avoir une absorbance spécifique à différentes fréquences non constante. (Voir tableau 10-11 à l'annexe 8)

Comme souligné précédemment sous point 10.2.2 b), les valeurs d'absorbance mesurées à 965 cm^{-1} pour les bitumes-SBS sont sujettes à caution. Par rapport au liant de base, elles accusent une décroissance non négligeable en fonction des années de service. Cette tendance est nette chez les bitumes-polymères des planches 3, 4 et 11. En revanche, après sollicitation PAV, l'évolution du signal n'est pas très marquée.

Pour les liants à base d'EPDM, le signal témoin de la présence de polymère à 1160 cm^{-1} n'a pas pu être repéré.

Dans l'ensemble, les signaux enregistrés sur les bitumes-polymères de type polyoléfine sont relativement constants.

S'agissant du bitume-EVA, les valeurs d'absorbance dues au groupe acétate suivent une évolution légèrement décroissante en fonction de l'âge du liant. (Voir tableau 10-12 à l'annexe 8)

Chez les bitumes-SBS, la différenciation due à la teneur en polymère échelonnée à 3 et 5% est assez nette.

Dans l'ensemble, on peut affirmer que la concentration résiduelle en polymère SBS après vieillissement est remarquablement constante.

Il en va de même pour les bitumes-polyoléfine, dont le polymère n'est pas au demeurant susceptible d'évoluer dans sa structure.

Les bitumes-EVA donnent un signal pratiquement constant en fonction de l'âge.

Dans le cas du liant mixte de la planche 12, les signaux servant à l'identification des polymères sont de faible intensité.

10.2.3 ÉTUDE DU VIEILLISSEMENT

Les bitumes et bitume-polymères en tant que liant routier subissent sous l'action de l'air, de la lumière et de la température, une dégradation physico-chimique due à une oxydation partielle de certains de leurs constituants.

Deux types de vieillissement sont plus ou moins connus. Le premier, de nature physique, conduit à l'évaporation de fractions légères et cristallisation des paraffines. Le second, de nature chimique, correspond à la formation de composés polaires contenant de l'oxygène.

La spectrométrie infrarouge est une technique privilégiée pour suivre l'augmentation des fonctions oxydées des bitumes. Il est ainsi possible de quantifier les bandes correspondant à chacune des fonctions étudiées, et de calculer ainsi des indices de vieillissement.

10.2.3.1 Indices de vieillissement

En IRTF, les indices structuraux sont obtenus principalement par des rapports d'aires spécifiques à certains groupements chimiques.

L'évolution au cours du vieillissement routier est fondée d'une part sur l'apparition d'espèces telles que:

- les acides carboxyliques
- les cétones
- les anhydrides
- les composés 2-quinolones
- les sulfoxydes aliphatiques

Il s'agit de porter son attention sur les bandes des groupements assorties au tableau 10-13 à l'annexe 8 et de mesurer les aires de celles-ci de vallée à vallée.

Les indices à déterminer sont les suivants:

1. Indice d'oxydation (IO) = $A_1/\Sigma A_i$
2. Indice sulfoxyde (IS) = $A_6/\Sigma A_i$

La somme des aires est définie comme suit:

$$\Sigma A_i = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_6 + A_8 + A_9 + A_{10} + A_{11} + A_{12} + A_{13} + A_{14}$$

10.2.3.2 Etude du comportement vis-à-vis de l'oxydation

La technique IRTF permet d'appréhender certaines évolutions communes à tous les bitumes au cours d'un essai d'oxydation artificielle (PAV) et in situ au fil des ans.

10-2.3.2.1 Indice d'oxydation et indice sulfoxyde

L'évolution chimique et structurale la plus importante des bitumes se fait durant les quatre premières années: les taux de carbonyles C=O et de sulfoxydes S=O croissent puis se stabilisent, voire décroissent vers une valeur plus faible au bout de huit ans de mise en service.

Au temps $t = 0$, on note de manière générale un taux de carbonyle négligeable chez la plupart des bitumes et bitumes-polymères (voir tableau 10-14 à l'annexe 8). Il y a cependant quelques exceptions de taille chez les liants modifiés des planches 7, 9, 14, et dans une moindre mesure, chez celui de la planche 11, lesquels présentent un taux de carbonyles significativement élevé à l'origine.

Dans le cas des liants à base d'EPDM appartenant aux planches 9 et 14, on peut penser que le mode de fabrication par soufflage (incorporation d'air) du mélange bitume-EPDM est à l'origine de cet état de fait.

Au cours du vieillissement par oxydation, le soufre sous forme de sulfides aliphatiques -S- (qui est connu pour ses propriétés antioxydants) est transformé complètement en sulfoxydes. Le bitume devient alors plus sensible à l'oxydation avec une formation simultanée et/ou subséquente de carbonyles, ce qui se traduit par une évolution de son ratio sulfoxydes/carbonyles vers des valeurs plus faibles.

On peut ainsi différencier les bitumes et les bitumes-polymères quant à leur susceptibilité à l'oxydation par l'évolution de leur ratio sulfoxydes/carbonyles de la manière montrée au tableau 10-15 à l'annexe 8.

- **évolution du ratio vers des valeurs plus faibles**

Il s'agit des bitumes les plus sensibles à l'oxydation avec une formation importante de carbonyles par rapport au taux de sulfoxydes au cours du vieillissement.

L'examen du tableau 10-15 à l'annexe 8 permet d'affirmer que les liants des planches 1, 15 (B 80/100), 2, 16 (B60/70), avec une exaltation du phénomène dans ce dernier cas, ainsi que ceux des planches 3, 4, 5, 6, 7, 8 et 12 appartiennent à cette catégorie.

- **évolution du ratio vers des valeurs plus élevées**

Il s'agit des bitumes les moins sensibles à l'oxydation.

Les bitumes-polymères de la planche 11 avec une exaltation du phénomène pour le bitume-polymère de la planche 11, en est l'illustration.

- **pas d'évolution notable du ratio**

Dans ce cas, le taux de sulfoxydes est relativement proportionnel au taux de carbonyles formés.

Les bitumes-polymères des planches 9 et 14 (bitumes-polymères à base d'EPDM) appartiennent à cette catégorie.

10-2.3.2.1 Comparaison des indices IS/IO obtenus après vieillissement artificiel (RTFOT et PAV) et sur site

Dans le tableau 10-16 à l'annexe 8, on a reproduit les indices IS et IO obtenus après vieillissement suivant l'essai PAV et après 4 années de mise en service. Dans la colonne de droite, on a calculé la valeur des écarts en pourcentages inférieurs (signe -) ou supérieurs (signe +) par rapport au vieillissement in situ après 4 ans.

Dans l'ensemble, on constate des écarts importants, de l'ordre de -20 à -40% pour les quatre bitumes purs des planches 1, 2, 15 et 16.

Pour les bitumes modifiés, ces écarts se réduisent quelque peu, mais demeurent significativement importants, soit par défaut (-) (voir planches 3, 4, 7, 14), soit par excès (+) (voir planche 5), soit tous les deux selon l'indice considéré (voir planche 11). (Voir tableau 10-16 à l'annexe 8).

Il est donc une évidence qui s'impose, à savoir que le vieillissement in situ des bitumes et des bitumes-polymères n'est pas essentiellement dû à des réactions d'oxydation. On peut penser que tous les facteurs qui contribuent au vieillissement des bitumes sur route comme le climat, le trafic, les rayons UV et les variations thermiques dues aux différences de température entre le jour et la nuit, ne sont pas reproduits dans l'essai PAV, quand bien même ils ont une importance non négligeable.

10.2.4 CONCLUSIONS

Le présent rapport est divisé en deux parties.

Dans la première partie, on s'est employé à identifier les différents types de polymères utilisés sur treize planches au total. Ce travail d'identification repose sur la connaissance des spectres IRTF des constituants (bitume, polymères, ajouts) d'une part, et sur le choix de bandes d'absorption spécifiques de chaque constituant (bande témoin dans les mélanges bitume-polymères et ajouts).

C'est ainsi que pour chaque famille de polymères, une bande d'absorption spécifique à la famille a pu à tout le moins être choisie comme témoin de la présence de polymère dans le bitume.

Hormis une famille de polymère (EPDM des planches 9 et 14), l'identification a pu être menée à bien par la mesure de l'aire et/ou de la hauteur spécifique des bandes respectives d'absorption. Dans un cas de figure (bitume-SBS), on a montré qu'il était préférable de mesurer la hauteur du pic.

De cette façon, la différenciation des bitumes-SBS à teneur en polymères échelonnée a été mise en évidence.

Dans l'ensemble, pour pratiquement toutes les familles de polymères ayant fait l'objet d'une mesure, l'évolution de la bande-témoin en fonction de l'âge ou de la sollicitation PAV s'est révélée peu importante, voire quasi inexistante, ce qui tendrait à prouver que la concentration résiduelle en polymère après vieillissement artificiel ou sur site est relativement constante.

La seconde partie est consacrée à l'étude du vieillissement de nature chimique du composant bitume uniquement.

Pour mieux apprendre les réactions chimiques mises en jeu, au cours des oxydations artificielles et in situ, des indices de vieillissement ont été déterminés à partir des spectres obtenus sur le liant originel, sur le liant vieilli artificiellement (RTFOT+PAV) ainsi que sur les liants récupérés après 4 et 8 ans de mise en service.

En IRTE, certains indices structuraux sont obtenus principalement par des rapports d'aires spécifiques à certains groupements d'atomes qui apparaissent ou disparaissent au cours du vieillissement, dont les principaux sont respectivement les composés carbonylés et sulfoxydes.

La reconnaissance des bandes à relever étant faite, on a déterminé les indices de vieillissement suivant:

- indice d'oxydation IO
- indice sulfoxyde IS

Ce sont les indices dont on se sert pour mesurer quantitativement l'apparition des composés carbonylés et la transformations des composés sulfides aliphatiques -S- en composés oxydés sulfoxydes.

L'évolution chimique et structurale la plus important commune à tous les bitumes et bitumes-polymères est décrite par la variation du taux de carbonyles, mesuré par l'indice d'oxydation, et du taux de sulfoxydes, mesuré par l'indice sulfoxyde.

Durant les quatre premières années ces taux croissent de manière significative, puis se stabilisent et/ou régressent au bout de huit années.

On a montré à cet égard qu'il est possible de différencier les bitumes et bitumes-polymères quant à leur susceptibilité à l'oxydation par l'évolution de leur ratio taux de sulfoxydes / taux de carbonyles: les bitumes les plus sensibles à l'oxydation sont ceux dont le ratio évolue vers des valeurs plus faibles au cours du vieillissement artificiel (PAV) ou in situ.

Au contraire, les liants , dont le ratio évolue vers des valeurs croissantes sont ceux qui en principe sont le moins sensibles aux phénomènes d'oxydation et donc présentent une bonne tenue au vieillissement.

La comparaison des indices sulfoxydes et indices d'oxydation obtenus après l'essai de vieillissement artificiel (RTFOT+PAV), censé simuler un vieillissement de 5 ans, et sur site après quatre ans, indique une certaine inadéquation entre l'essai et la réalité.

CHAPITRE 11 ETUDE APPRONFONDIE THERMOMECHANIQUE DES ENROBES

11.1 INTRODUCTION

Les éléments qui sont présentés dans ce chapitre proviennent du travail de thèse entrepris au LAVOC par T.Pucci, mené en parallèle à cette étude des planches comparatives, et dont le titre était "Approche prévisionnelle de la fissuration par sollicitation thermique des revêtements bitumineux" (24).

L'étude expérimentale de la fissuration des enrobés bitumineux aux basses températures passe par l'introduction de la température comme paramètre de sollicitation. Dans le cadre du programme américain SHRP, Vinson (30) a recensé les essais de caractérisation du comportement à basse température des enrobés bitumineux. L'essai de retrait thermique empêché sur enrobé a été utilisé comme outils de validation du BBR issu du programme SHRP; l'essai, qui se nomme TSRST, est considéré par Vinson comme l'essai accéléré simulant le mieux les conditions de sollicitations thermiques des couches d'enrobés bitumineux en place dans les chaussées routières.

11.2 PRÉSENTATION DE L'ESSAI DE RETRAIT THERMIQUE EMPÊCHÉ

Monismith et al. (21) est l'initiateur des premières recherches menées en laboratoire dont l'objet était de simuler le couplage thermomécanique à basse température auxquelles sont soumis les enrobés bitumineux dans les chaussées routières. Le principe de l'essai consiste à maintenir une éprouvette d'enrobé bitumineux à une longueur constante et à mesurer la force qu'il faut exercer à cet effet lors d'une diminution de la température. Dans les années huitantes, le professeur Arand en Allemagne a repris le principe de l'essai en y ajoutant des jauges de déplacement qui mesurent et transmettent la déformation longitudinale de l'éprouvette à un moteur pas à pas ; ce moteur rétablit instantanément la longueur initiale de l'éprouvette durant la phase de refroidissement (12).

L'Université d'Etat de l'Oregon aux U.S.A a développé et exploité, sous mandat SHRP, un essai de retrait thermique empêché appliqués sur des éprouvettes d'enrobés bitumineux. Cet essai, qui reprend le principe développé par Arand, se nomme "Thermal Stress Restrained Specimen Test" ou TSRST (Figure). L'éprouvette d'enrobé prismatique de dimension normalisée de 51x51x254mm, est collée entre deux plateaux à l'intérieur d'une enceinte thermique. Le plateau inférieur est relié à une cellule de force et le plateau supérieur est relié à un moteur pas à pas qui maintient l'éprouvette à une longueur constante durant la phase de refroidissement. La régulation du moteur pas à pas se fait sur la valeur moyenne de deux capteurs LVDT placés de part et d'autre du plateau inférieur et sur lesquels viennent se poser deux barres en invar reliées au plateau supérieur. La chambre thermique est refroidie par un système d'azote liquide ou d'air comprimé pulsé à l'intérieur de l'enceinte. L'équipement permet d'effectuer des essais à des vitesses de refroidissement constantes entre $-2^{\circ}\text{C}/\text{heure}$ et $-10^{\circ}\text{C}/\text{heure}$, cela dans une gamme de température de $+20^{\circ}\text{C}$ à -50°C .

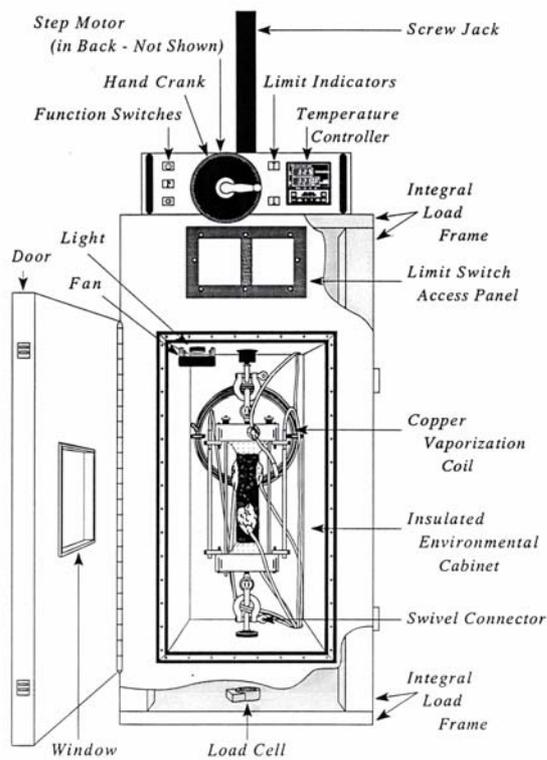
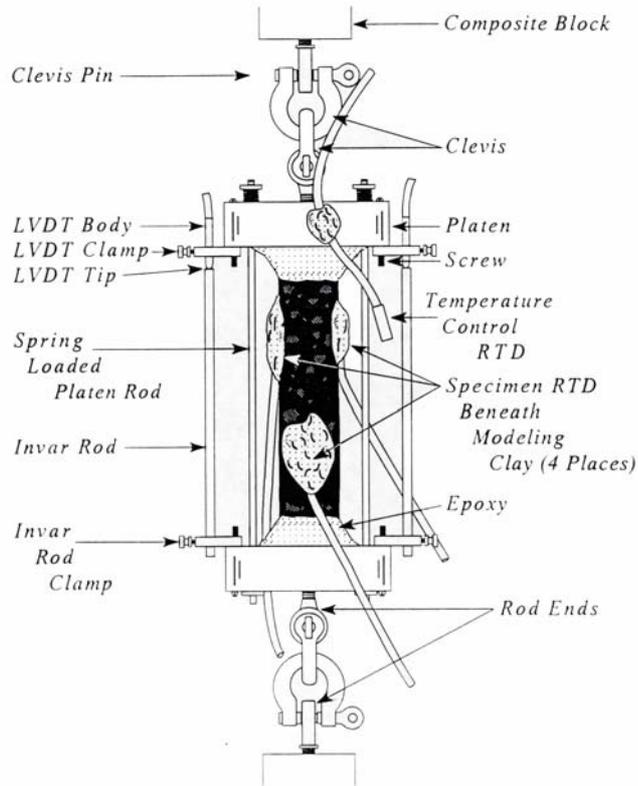


Figure 27: Schéma du TSRST

11.3 RESULTATS TYPE DE L'ESSAI ET RÉFÉRENCES PREVISIONNELLES

La figure 28 présente un résultat type d'un essai de retrait thermique empêché.

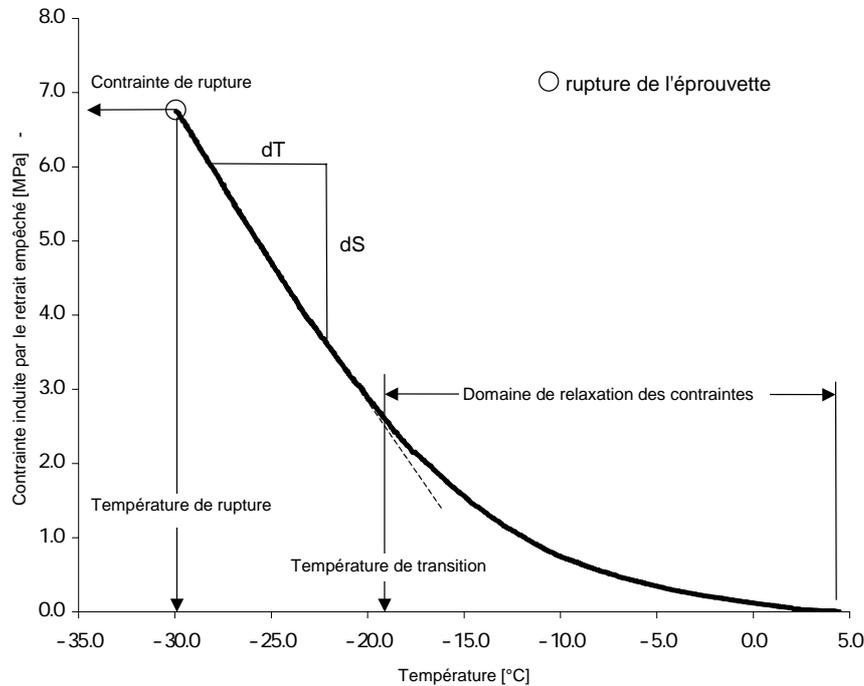


Figure 28: Résultat type de l'essai de retrait thermique empêché à $-10^{\circ}\text{C}/\text{heure}$

L'essai fournit les caractéristiques suivantes:

- la température de rupture de l'éprouvette (θ_{rupture})
- la contrainte de rupture de l'éprouvette (σ_{rupture})
- la pente de l'évolution de la contrainte (ds/dT) en phase "linéaire"
- la température de transition (θ_T) qui définit la limite, dans les conditions de sollicitations de l'essai, à partir de laquelle la courbe d'évolution de la contrainte devient linéaire

L'essai TSRST a été validé in situ par l'analyse de cinq sections routières en Alaska, en Pennsylvanie, et en Finlande (31). Les résultats du TSRST ont été comparés à des indices de fissuration caractérisés par la fréquence des fissures transversales. L'ensemble des sections testées présente des températures en surface de l'ordre de -20°C à -25°C . Il apparaît que les résultats des essais TSRST, réalisés sur des éprouvettes de laboratoire ainsi que sur des éprouvettes carottées in situ, ont une bonne correspondance avec les indices de fissuration. Notons que cette validation, basée sur un faible échantillon de population, ne peut fournir une référence satisfaisante et reproductible aux conditions spécifiques de nos climats tempérés.

L'histoire des planches comparatives offre la possibilité de confronter les caractéristiques mesurées en laboratoire, par l'essai de retrait thermique empêché sur les enrobés prélevés in situ après la mise en œuvre, vis-à-vis de l'évolution et de l'état de fissuration de surface de planches comparatives.

11.4 ANALYSE DES RESULTATS DES PLANCHES COMPARATIVES

Des essais de retrait thermique empêché, réalisés sur des matériaux prélevés in situ après la mise en œuvre en 1988, ont été réalisés par l'université technique de Munich à l'aide d'un équipement de retrait thermique empêché similaire à l'essai de Arand. Dans la mesure du possible, des éprouvettes prismatiques d'enrobés de 130×40×40mm ont été sciées dans la couche de roulement. Les conditions de l'essai sont : une température initiale de 20°C et un gradient de température de -10°C/h.

A la différence de l'essai TSRST, l'essai réalisé à Munich régule la déformation par une mesure directe prise sur l'éprouvette, cela sur une hauteur de 50mm. Les résultats fournis par l'essai sont la température de transition (θ_T) et la température de rupture ($\theta_{rupture}$). Les résultats se trouvent en annexe.

Ces paramètres sont confrontés à l'année de transition des fissures (c.f. chapitre 7.1.1), donnée par $I_{transition} = 5\%$, et à l'état de la fissuration à 10 ans.

10.4.1 ANNÉE DE TRANSITION DE LA FISSURATION VERSUS LA TEMPÉRATURE DE TRANSITION DE L'ESSAI DE RETRAIT THERMIQUE EMPÊCHÉ

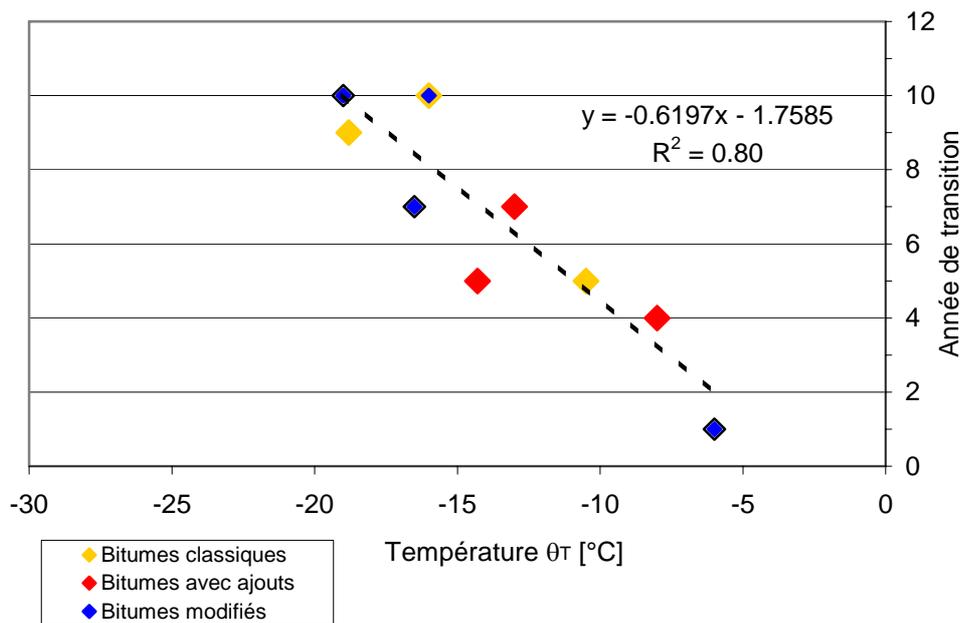


Figure 29: Comparaison de la température θ_T vs l'année de transition

Les planches retenues pour l'année de transition sont celles qui ont atteint ou dépassé la valeur de l'indice $I_{transition} = 5\%$ au plus tard à 10 ans. Les planches 15 et 6 n'ont pas atteint cette valeur mais, à l'aide d'une projection linéaire, leur année de transition respective est estimée à 15 ans. Introduisons ce résultat dans la comparaison présentée par la figure 29 et observons que la projection des planches 15 et 6 est cohérente vis-à-vis de la tendance générale (figure 30).

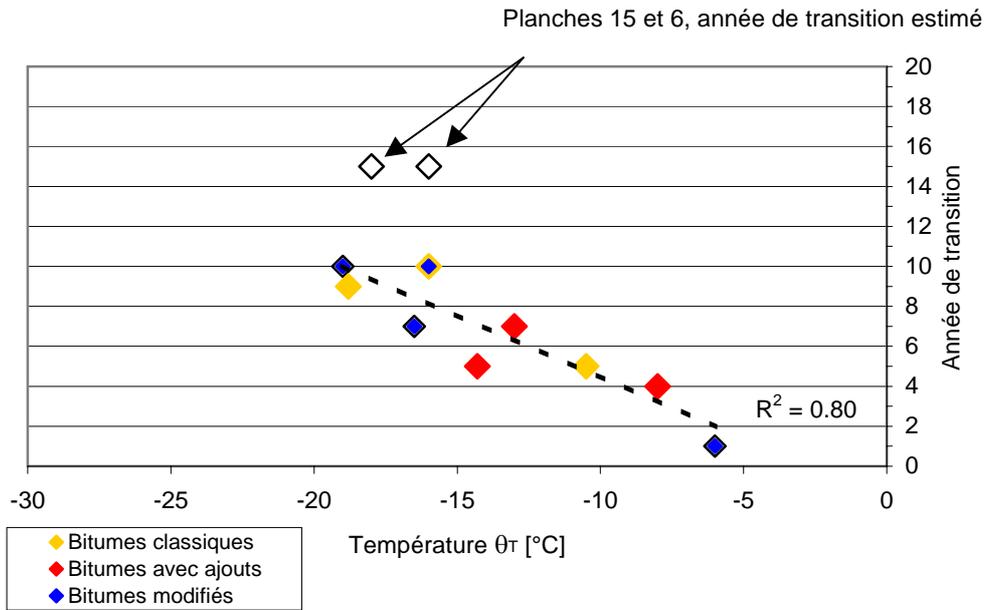


Figure 30: Comparaison de la température θ_τ vs l'année de transition (bis)

10.4.2 INDICE DE FISSURATION À 10 ANS VERSUS LA TEMPÉRATURE DE TRANSITION DE L'ESSAI DE RETRAIT THERMIQUE EMPÊCHÉ

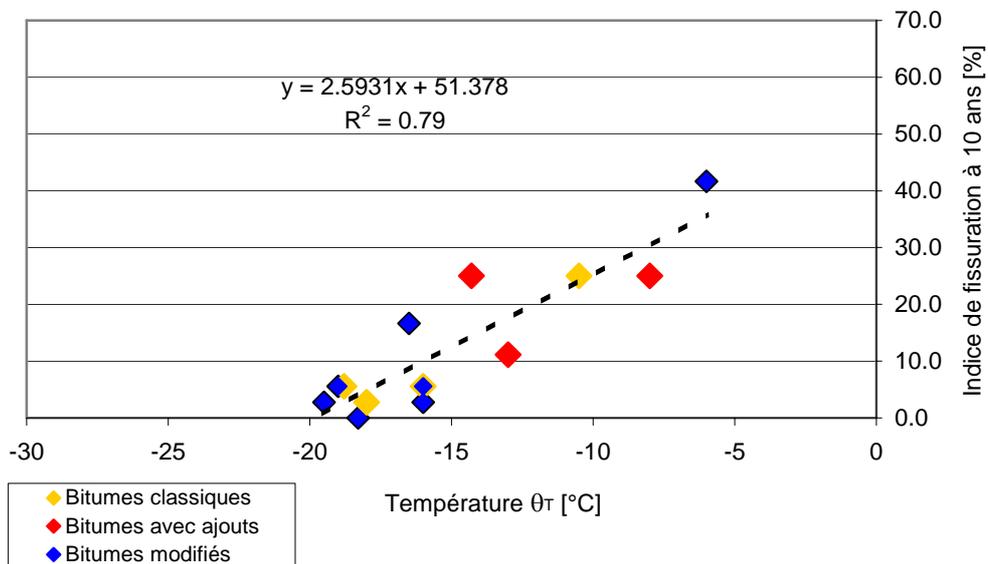


Figure 31: Comparaison de la température θ_τ vs indice de fissuration à 10 ans

11.5 CONSIDÉRATIONS SUR LES ASPECTS THERMOMECHANIQUES

L'analyse des essais de retrait thermique empêché permet les constatations suivantes :

- Après la mise en œuvre des enrobés, la température de transition θ_T est une caractéristique rhéologique pertinente vis-à-vis des phénomènes de fissuration des planches comparatives. Cet indicateur donne, d'une part, un coefficient de corrélation $R^2=0,80$ par rapport à l'année de transition de la fissuration, et, d'autre part, un coefficient de $R^2=0,79$ par rapport à l'état de la fissuration à 10 ans.
- A contrario, la température de rupture des essais après la mise en oeuvre ne donne pas satisfaction, les coefficients sont $R^2=0,37$ vis-à-vis de l'année de transition et $R^2=0,51$ vis-à-vis de l'état de fissuration à 10 ans (résultat non présenté dans ce rapport, c.f. (24)).
- De même, les résultats des essais TSRST réalisés sur les matériaux prélevés à 8 ans ne donnent aucune indications vis-à-vis de la fissuration de surface des planches comparatives.

Les résultats mettent en évidence la bonne correspondance entre la température de transition obtenue, sur les enrobés prélevés après la mise en oeuvre, et la fissuration observée in situ dans les 10 années qui ont suivi. Jung et Vinson (20) mentionnent que la température de transition peut jouer un rôle important dans le comportement des enrobés soumis aux basses températures. A notre connaissance, aucune étude ne relate ce critère vis-à-vis de la fissuration réelle observée in situ.

Ainsi, le suivi des planches comparatives et la réalisation d'essais de retrait thermique empêché sur les enrobés prélevés après la mise en œuvre, montrent que la température de transition, déduite de l'essai de retrait thermique empêché, est une propriété rhéologique pertinente dans l'optique d'une approche prévisionnelle de la fissuration thermique des chaussées routières. Cette constatation a été retenue et développée dans le travail de thèse mentionné dans ce chapitre.

CHAPITRE 12 CONCLUSIONS GENERALES

Conclusions sur le comportement :

En suivant le comportement sur 10 ans nous pouvons faire les constatations suivantes:

- a. Globalement, les planches se sont bien comportées sur le long terme. Elles n'ont nécessité aucunes mesures d'intervention 14 ans après leur mise en service (selon le dernier relevé visuel effectué et dont les résultats seront publiés ultérieurement). De plus, les planches qui ont subi une fissuration prématurée (planche 8 et 9) n'ont pas été réparées et sont restées à un niveau de service acceptable pour les usagers. Notons encore que les planches comparatives, présente un excellent comportement vis-à-vis de l'orniérage, mais rappelons qu'elles sont soumises à un trafic relativement faible.
- b. Un liant modifié au SBS (planche n° 11) présente une remarquable résistance à la fissuration. Alors que tous les autres sont dégradés à divers degrés, ce produit n'a aucune fissure détectable après 10 ans de service.
- c. Quatre autres liants ont un comportement très bon dont 3 à base de bitume polymères (planches 3, 6 et 7), et un quatrième est tout simplement un B80/100 de distillation directe (planche n° 15).
- d. Les liants polymères des planches 3 à 6 sont de la même provenance et sont élaborés par une seule et même entreprise et leur comportement est bon. Ni la dureté du bitume de base (80/100 ou 40/50), ni la teneur en SBS (3 % ou 5 %) ne permettent d'établir clairement un classement. En fait, on constate globalement que les cinq bitumes polymères au SBS et celui au polyoléfine à 6 % présentent une bonne résistance à la fissuration.
- e. Les liants classiques (planches 1, 2, 15 et 16) se comportent plutôt bien et sont dans plusieurs cas aussi performants que des bitumes modifiés. Une très nette différence est constatée entre les bitumes de distillation directe d'origine française (planches 15 et 16) et les bitumes semi-soufflés d'origine suisse (planches 1 et 2). Un même classement évident est en faveur des bitumes 80/100 (planches 1 et 15) par rapport aux bitumes 60/70 (planches 2 et 16).
- f. Globalement dans les 3 cas (planches 10, 12 et 13), où un ajout est introduit pendant le processus de malaxage de l'enrobé, les résultats ne sont pas bons et après 10 ans, le taux de fissuration reste en croissance.
- g. Dans 2 cas, le bitume modifié (planche 8 à l'EVA et planche 9 à l'EPDM a été additionné d'un autre produit (respectivement polyisobutylène et agent oxydant) qui ont donné un comportement catastrophique avec une propagation de fissures déjà après une année.

Conclusions sur l'aspect économique :

Il apparaît que le surcoût d'un bitume "modifié" n'est pas amorti par un meilleur comportement. La situation sur le marché des liants s'étant considérablement modifiée, l'analyse économique reste à actualiser pour en tirer des tendances générales.

Conclusions sur les aspects prédictifs des essais de laboratoire :

L'analyse des corrélations issues des résultats des essais sur les liants et les enrobés vis-à-vis de l'ampleur de la fissuration à 10 ans permet les conclusions suivantes:

- a. Pour l'ensemble des liants, y compris les 8 et 9, l'ampleur de la fissuration à 10 ans est en adéquation avec l'essai BBR (caractéristique mesurée par la pente m de la courbe de charge à -15 °C et après 60 s) sur les liants récupérés après leur mise en œuvre. Il en est de même de l'évolution de la viscosité mesurée à 150 °C et 130 °C à la livraison et la mise en œuvre.
- b. En soustrayant les planches 8 et 9, ces corrélations ne se retrouvent pas. Ainsi, le mauvais comportement observé par la suite de ces 2 bitumes peut être mis en évidence par l'analyse des liants ayant subi un vieillissement thermique en centrale et à la mise en œuvre par le biais des essais précités.
- c. L'analyse des corrélations sur les liants purs montre des tendances sur les caractéristiques dites de consistances (Pénétration, A et B, Viscosité) au regard de leur comportement à long terme, cela principalement sur les liants récupérés après leur mise en œuvre et après 8 ans de mise en service. Les caractéristiques mesurées par les essais de traction directe à 20 °C , retour élastique à 25 °C , teneur en asphaltène, BBR, réalisés sur les bitumes prélevés après leur mise en œuvre montrent, de même, des tendances sur les liants récupérés après leur mise en oeuvre.
- d. Les corrélations issues des bitumes polymères, excepté les bitumes 8 et 9, ne confirment pas les tendances mise en évidence pour les bitumes purs. Notons que ces bitumes modifiés ne sont que faiblement fissurés, ainsi il n'est pas possible d'en dégager une corrélation absolue.
- e. L'analyse des bitumes avec ajouts ne permet pas d'avancer des conclusions de part leur représentativité limitée, en effet seul 3 bitumes composent cette famille de produit.
- f. Les essais de retrait thermique empêché réalisés sur les enrobés prélevés après la mise en œuvre mettent en évidence la bonne correspondance entre la température de transition de l'essai et la fissuration observée in situ après 10 ans.

bibliographie

- (1) *Ancienne norme suisse SN 640 322, "Dimensionnement", 1971*
- (2) *Ancienne norme suisse SN 670 710b, "Gravillons et graviers concassés: prescription de qualité", 1972*
- (3) *Ancienne norme suisse SN 670 760, "Filler pour enrobés bitumineux: prescription de qualité", 1976*
- (4) *Ancienne norme suisse SN 640 431, "Tapis et couches de support hydrocarbonés à chaud: exécution, exigences", 1976*
- (5) *Norme suisse SN 640 431a, "Revêtements en béton bitumineux: conception, exigences, exécution", 1988*
- (6) *Ancienne Norme Suisse SN 640 925, "Relevé et évaluation de l'état des routes", août 1990*
- (7) *Norme Suisse SN 640 925a, "Relevé et évaluation de l'état des routes", avril 1997*
- (8) *Norme Suisse SN 640 521b, "Planéité, exigences de qualité", mai 1995*
- (9) *Norme Suisse SN 640 730b, "Entretien des chaussées", décembre 1998*
- (10) *Performance analysis of Road Infrastructure (PARIS) , final report, novembre 1998*
- (11) *Recherche OFROU, "Analyse des modèles de comportement des chaussées", en cours*
- (12) *Arand W., "Comportement des asphaltés à basses températures, développement et mise à l'épreuve d'une méthode d'essai", revue Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, n°407, 1984*
- (13) *Dumont A.-G., Huet M., Simond E., "Planches comparatives avec bitumes modifiés et ajouts", rapport OFR n° 113, octobre 1994*
- (14) *Dumont A.-G., Schwery B., Angst Ch., "Planches comparatives avec bitumes modifiés et ajouts", Congrès Eurobitume, Madrid octobre 1989*
- (15) *Dumont A.-G., Huet M., Simond E., "Viellissement de bitumes modifiés issus de planches comparatives réalisées en Suisse, dans le canton du Valais", Congrès Eurobitume, Stockholm juin 1993*
- (16) *Dumont A.-G., Pittet M., Pardon P., Pasquier M., "Etude de l'évolution de la microstructure des liants modifiés par microscopie optique d'épifluorescence UV", Congrès Eurobitume, Strasbourg mai 1996*
- (17) *Dumont A.-G., Schwery B., "Des liants modifiés au banc d'essai sur la N9 entre Riddes et Sion", revue VSS (Union des professionnels suisses de la route) Route et Trafic n°7, 1989*
- (18) *Dumont A.-G., Turtschy J.-C., Scazziga I., Pucci T., Fontana M., "Analyse des modèles de comportement des chaussées", mandat VSS 11/99, juillet 2001*
- (19) *Journée Technique LAVOC, "Nouvelles tendances pour les revêtements routiers", Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne, septembre 2000*
- (20) *Jung D.H., Vinson Ted S., "Low temperature cracking: test selection", Strategic Highway Research Program SHRP-A-400 contract A-033A, Washington DC 1994*
- (21) *Monismith Carl L. & al., "Temperature induced stresses and deformations in asphalt concrete", Proceeding of the Association of Asphalt Paving Technologist (AAPT), vol. 34, 1965*
- (22) *Office Fédéral des Routes, Cantons de Neuchâtel et du Valais, Projet PMS NE-VS, Application VIAPMS®, décembre 1997*
- (23) *PARIS (Performance Analysis of Road Infrastructure), Transport research fourth framework, program road transport, Luxembourg, november 1998*
- (24) *Pucci T., "Approche prévisionnelle de la fissuration par sollicitation thermique des revêtements bitumineux", thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, octobre 2001*
- (25) *République et canton de Neuchâtel/Service des Ponts et Chaussées, Office des Routes cantonales, Développement d'un système de gestion pour le réseau des routes nationales, Rapport N°952404, septembre 1996*
- (26) *Schwery B., "Des liants modifiés au banc d'essai sur la N9 entre Riddes et Sion, rapport n° 1: état initial ", revue VSS Route et Trafic n°12, 1991*

- (27) Schwery B., Angst Ch., Aebersold S., "Comportement dans le temps des enrobés issus des planches comparatives réalisées en Suisse, dans le canton du Valais, avec différents bitumes polymères", Congrès Eurobitume, Stockholm juin 1993
- (28) Viaconsult AG, Vergleich der Zustandserfassung 1988/1991 mit dem ARAN-Gerät, Ergänzende Untersuchungen, Rapport du 1.11.1991 pour le Canton des Grisons
- (29) Viaconsult AG, Vergleich der Zustandserfassung 1988/1991 mit dem ARAN-Gerät, Ergänzende Untersuchungen II, Rapport du 6.1.1992 pour le Canton des Grisons
- (30) Vinson Ted S., Janoo V.C., Haas Ralph C.G., "Low temperature and thermal fatigue cracking", Summary Report SR-OSU-A-003A-89-1, Strategic Highway Research Program contract A-033A, 1989
- (31) Vinson Ted S., Kanerva H.K., Zeng H., "Low temperature cracking: field validation of the Thermal Stress Restrained Specimen Test (TSRST)", Strategic Highway Research Program SHRP-A-401 contract A-033A, Washington DC 1994
- (32) OFR, Service des Routes Nationales du Canton du Valais, Laboratoire des Voies de Circulation (LAVOC) de l'EPFL, Sous-commission VSS 271/15: « Planches comparatives avec bitumes modifiés et ajouts », Rapport no 1 ; chaussée et liants, oct. 1994
- (33) Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Fabienne Farcas: » Etude d'une méthode de simulation du vieillissement des bitumes sur route », sept. 1998 (Chaussée-CR21)
- (34) Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Collectif du sous-groupe Qualité des bitumes: » Susceptibilité au vieillissement des bitumes », avril 1997 (Série chaussée-CR19)
- (35) J. Kister, N. Pieri, L. Germanaud: » Caractérisation chimique du vieillissement de bitumes par fluorescence UV en excitation-émission synchrones et IRTF », 5ème Congrès Eurobitume, juin 1993, Stockholm, contribution 1.05
- (36) N. Pieri, J.P. Planche, D. Martin, L. Germanaud, J. Kister: »A new approach to predict rheological properties of bitumens from their chemical composition determined by FTIR and synchronous U.V. Fluorescence », Congrès Eurasphalt & Eurobitume, Strasbourg, 1996, contribution 5.120
- (37) J.C. Petersen: »Quantitative Functional Group Analysis of Asphalts Using Differential Infrared Spectroscopy and Selective Chemical Reactions – Theory and Application », Transportation Research Record 1096
- (38) J. Wiertz, R. Degeimbre, Université de Liège: »Identification et dosage des Polymères SBS et APP dans les bitumes modifiés », Second International Symposium – Liège 1984: » Plastic and rubber waterproofing in civil engineering »