Planches comparatives avec bitumes modifiés et ajouts

rapport n°1: chaussée et liants

Vergleichsstrecken mit polymermodifizierten Bindemitteln und Zusätzen

Bericht Nr. 1: Belagszustand und Bindemitteleigenschaften

Coproduit: **Office Fédéral des Routes**
Service des Routes nationales du canton du Valais
Laboratoire des Voies de Circulation (LAVOC) de l'EPFL
Sous-commission VSS 271/15

Juillet 1994

Planches comparatives avec bitumes modifiés et ajouts

rapport n°1: chaussée et liants

Vergleichsstrecken mit polymermodifizierten Bindemitteln und Zusätzen

Bericht Nr. 1: Belagszustand und Bindemitteleigenschaften

Laboratoire des Voies de Circulation (LAVOC)
de L'Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne
A.-G. Dumont, professeur
M. Huet, adj. scientifique
E. Simond, ing. dipl. EPFL

Service des Routes Nationales du canton du Valais
B. Schwery, ing. dipl. EPFL
S. Aebersold, ing. dipl. EPFL

Sous-commission VSS 271/15
Ch. Angst, Dr. Ing. EPFZ

Juillet 1994

TABLE DES MATIERES
INHALTSVERZEICHNIS

RESUME IV
ZUSAMMENFASSUNG

1. PRESENTATION DU PROJET
BESCHRIEB DES PROJEKTES 1

1.1 Introduction
Einführung 1
1.2 Les planches comparatives
Die Vergleichsstrecken 2
1.3 Buts des planches de comparaison
Zielsetzung der Vergleichsstrecken 2
1.4 Publications faites à ce jour concernant les planches d'essais
Bishierige Veröffentlichungen zu den Vergleichsstrecken 3
1.5 Normalisation
Normierung 3
1.6 Description de la structure
Beschrieb des Oberbaus 4
1.7 Choix de la formule de l'enrobé
Wahl der Mischgutrezeptur 5
1.8 Choix des liants modifiés et des ajouts
Wahl der Bindelmittel und der Zusätze 7

2. L'ETUDE - OBJECTIFS - PROGRAMME D'ESSAIS
ZIELSETZUNG - UNTERSUCHUNGSPROGRAMM 8

2.1 Programme d'essais
Untersuchungsprogramm 8

3. LA CHAUSSEE
FAHRBAHN 12

3.1 Contrôle de conformité des enrobés à la fabrication
Qualitätsprüfung der Mischgut-Aufbereitung 12
3.2 Contrôle de conformité du revêtement après mise en place
Qualitätsprüfungs des Einbaus der Beläge 13
3.3 Relevé permanent des sollicitations
Permanente Messung der Beanspruchungen 14
3.4 Relevé visuel à 4 ans
Visuelle Zustandserfassung nach 4 Jahren 21
3.5 Evolution des mesures d'état de 0 à 4 ans
Zustandindex nach 0 und 4 Jahren 26
3.6 Analyse des coûts (référence: 1989)
Kosten-/Nutzenanalyse (Preistand 1989) 29
3.7 Synthèse des résultats sur chaussée
Zusammenfassung der Ergebnisse 32

4. LES LIANTS
BINDEMITTEL 33

4.1 Comparaison des résultats après vieillissement artificiel et au temps 0 après mise en oeuvre
Vergleich der Ergebnisse nach künstlicher Alterung und zum Zeitpunkt Null nach dem Belagseinbau 33
4.2 Essais de pénétration et de température anneau et bille
Penetration und Geweichungspunkt Ring und Kugel 37
4.3 Viscosité dynamique à 130 °C
Dynamische Viskosität bei 130 °C 40
4.4 Teneur en asphaltènes
Asphalte Gehalt 41
4.5 Traction directe à +20 °C
Zugversuch bei 20 °C 42
4.6 Traction directe à -10 °C
Zugversuch bei -10 °C 45
4.7 Retour élastique à 25 °C
Elastische Rückstellung bei 25 °C 48
4.8 Ductilité à 7 °C
Duktilität bei 7 °C 49

5. COMPARAISON DES RESULTATS DE LABORATOIRE AVEC LES CONSTATATIONS IN SITU A 4 ANS
ZUSAMMENFASSUNG: VERGLEICH DER LABORUNTERSUCHUNGEN MIT DER VISUELLEN ZUSTANDSERFASSUNG NACH 4 JAHREN 50

5.1 Comparaison des taux d'évolution des caractéristiques mesurées en laboratoire avec les dégradations in situ
Zusammenfassung: Vergleich der Veränderung der Bindemitteleigenschaften mit dem Zuständindex 50
5.2 Synthèse de la comparaison des résultats de laboratoire avec les constatations in situ à 4 ans
Folgerungen aus dem Vergleich des Laboruntersuchungen mit den Beobachtungen in situ 55

6. CONCLUSIONS
FOLGERUNGEN 57

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 58

ANNEXES 61

ANNEXE A 63
Caractéristiques des enrobés
ANNEXE B 67
Conformité du revêtement
ANNEXE C 71
Relevés au cadre de l'état de fissuration et photographies des types de dégradations rencontrés
ANNEXE D 78
Données permettant le calcul de l'indice de dégradation apparente de la chaussée
ANNEXE E 80
Tableaux des résultats sur les liants
ANNEXE F 87
Graphiques reprenant l'évolution des caractéristiques des liants au cours du temps
ANNEXE G 108
Droites de régression entre vieillissement artificiel RTFOT et DIN et vieillissement après passage en centrale et mise en oeuvre
ANNEXE H 114
Diagrammes d'Heukelom
ANNEXE I 123
Droites de régression entre le taux d'évolution global des caractéristiques des liants extraits et l'indice de dégradation apparente de la chaussée
ANNEXE J 127
Principe de l'essai de teneur en asphaltènes

RESUME

Seize planches comparatives ont été réalisées sur l'autoroute N9 près de Sion (Suisse). Il s'agissait de comparer l'effet du type de liant sur le comportement à court (2 et 4 ans) et moyen terme (8 ans) d'un revêtement hydrocarboné. D'autre part, cet essai a fourni des données indispensables à l'élaboration de la norme relative aux "Bitumes modifiés avec des polymères (Bmp) pour revêtements".

Toutes les conditions étant identiques (formulation, pose, structure, trafic, climat), la comparaison a été menée sur:

- quatre liants classiques de pénétration 60/70 et 80/100, de distillation directe ou semi-soufflé,
- neuf liants modifiés par des polymères à la raffinerie,
- deux ajouts pulvérulents introduits lors du malaxage et
- un ajout d'asphalte naturel.

Le présent rapport décrit l'état des planches après 2 et 4 ans et présente les résultats de l'ensemble des essais sur les liants réalisés en laboratoire. Il donne également une approche économique de l'utilisation des liants modifiés et ajouts.

ZUSAMMENFASSUNG

Auf der Autobahn N9 vor Sion/Sitten (Schweiz) wurden sechzehn Vergleichsfelder erstellt mit dem Ziel, den Einfluss des Bindemitteltyps auf das kurz- (2 und 4 jahre) und mittelfristige (8 Jahre) Verhalten eines Asphaltbetonbelages zu vergleichen. Andererseits hat diese Realisierung unerlässliche Daten für die Ausarbeitung der Norm "Polymermodifizierte Bitumen (PmB) für Beläge" geliefert.

Unter identischen Rahmenbedingungen (Rezeptierung, Einbau, Aufbau, Verkehr und Klima) wurden folgende Bindemittel verglichen:

- vier klassische Bitumen mit Penetration 60/70 und 80/100, direkt destilliert respektive angeblasen,
- neun mit Polymer und in der Raffinerie modifizierte Bindemittel,
- zwei in den Mischer eingegebene pulverförmige Zusätzer und
- ein Naturasphaltzusatz.

Im vorliegenden Bericht wird der Zustand der Felder nach 2 und 4 Jahren beschrieben und die Resultate aller im Labor durchgeführten Versuche am Bindemittel vorgestellt. Weiter wird auch eine wirtschaftliche Betrachtungsweise der Verwendung von modifizierten Bindemitteln und Zusätzen gegeben.

.4 **Publicati**
Bishierig

es publications

Congrès Eurc

"Planches coı
Ch. Angst) [R

Route et trafi

"Des liants m

Route et trafi

"Des liants mc
Rapport No 1

Congrès Euro

"Vieillissemen
le canton du \

"Comporteme
Suisse, dans l
S. Aebersold)

Journée Tech

e rapport sur l'ét
une publication
urnisseurs de li

5 **Normalisa**
Normieru

e projet des pl
énorme concer
71/15 de la VSS
ent compte nota
près vieillisseme

1. PRESENTATION DU PROJET
BESCHRIEB DES PROJEKTES

1.1 Introduction
Einführung

La Sous-commission 271/15 de la VSS travaille depuis le début 1986 à l'élaborat recommandations concernant les bitumes modifiés aux polymères (Bmp). Elle disposait au comme base de travail, des données ayant servi à l'article technique de Routes et Trafic d 1985 publié par la commission 271 de la VSS, ainsi que des données de la littérature matière. La présente recherche a permis d'établir la prénorme SN 671 400 [réf. 1] concerr bitumes polymères .

Cependant peu d'informations tirées de l'expérience étaient à la disposition de la sous-co sion, malgré l'utilisation de ces produits depuis de nombreuses années dans des appli particulières, telles que des tronçons fortement sollicités ou pour des réparations.

En même temps, le Service des Routes Nationales du Canton du Valais (SRN) réali 1987/88 la superstructure et le revêtement de la RN9 de Riddes à Sion sur une dista 15 km environ et cela en 3 lots différents. Conscient qu'il pouvait réaliser sur un de ces l planches de comparaison de grande envergure, il proposait en 1987 au chef du departem travaux publics du canton, M. le Dr Bernard Bornet, et au chef de l'Office Fédéral des R M. Kurt Suter, de mettre le lot 342 entre Ardon et Vétroz à la disposition de la sous-comı de la VSS pour tester en place plusieurs bitumes modifiés aux polymères et ajouts.

C'est ainsi qu'avec l'accord des personnes précitées et du chef du SRN, M. Jimmy Delalo planches de comparaison devinrent une réalité. M. Bernard Schwery, ingénieur adjoint a membre de la sous-commission 271/15 et responsable de la direction des travaux du lot 3 en charge la responsabilité de l'exécution des différentes planches. M. André-Gilles D professeur du LAVOC à l'EPFL assura la responsabilité technique des essais. L'entrep adjudicataire du lot 342, dont les premiers travaux avaient débuté en 1987, et son sous en matière de fourniture d'enrobés donnèrent leur accord pour collaborer à l'exécutio couche d'usure du lot 342 sous forme de planches de comparaison en y apportant t savoir-faire en la matière.

La préparation et le déroulement de l'exécution des planches de comparaison ont été sup par un conseil scientifique composé de M. Fejer de L'OFR, de M. Dumont, de M. le Dı président de la sous-commission 271/15, ainsi que de MM. Delaloye et Schwery du SR membres de la sous-commission 271/15 ont agi en tant qu'organe de conseil pour le ch produits, des essais in situ et en laboratoire et ont mis toute leur expérience ainsi que tout connaissances à disposition pour assurer la réussite de l'essai.

.es planches c
Die Vergleichs

ces conditions r
uivants:

structure et con
plai 1.5 m, napp
rstructure identi
n l'ancienne no
tion comparable
et de l'ensoleill
futur et sollicita

bre de planches
ts. Avec une livr
és, soit de couv
lanches pour le

ux planches 1 et
s bitumes classi

les planches de
l'une planche en

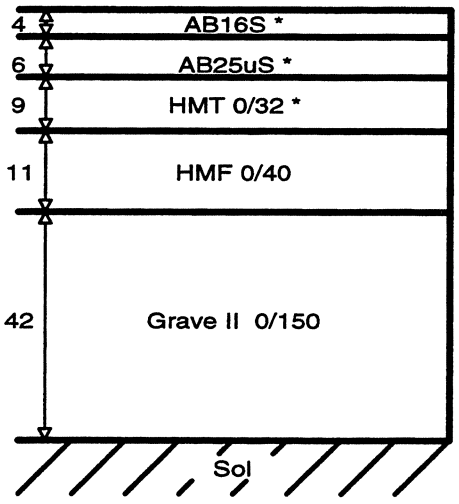
e produits ayan
s servant de rés
e planches ayar
s 15 et 16 de le
t 80/100.

Buts des planch
Zielsetzung der

s définis au dépa
oyen et à long te
ain de qualité es
polymères ?
essais traditionne
aussée ?

1.6 Description de la structure
Beschrieb des Oberbaus

La chaussée est dimensionnée pour une durée de vie de 20 ans et pour une augmentation d trafic annuel de 5%. Le trafic pondéral déterminant TF_{det} a été calculé selon la norme SN 640 32 [Réf. 9], et a la valeur de 1600. Le schéma de la superstructure est porté sur la figure 1.1.



* ancienne norme - ouverture des passoires selon la normeSN 640 431 (1976)

Figure 1.1: *Schéma de la superstructure de la chaussée*
Schematische Darstellung des Oberbaus

Le tableau 1.1 reprend les caractéristiques principales des différents matériaux entrant dans l chaussée.

Matériaux	Epaisseur [cm]	Type de liant	Teneur en liant sur granulats [%]
Grave II non triée	42	-	-
Enrobé HMF 0/40	11	80/100	3.5
Enrobé HMT B 32	9	60/70	4
Béton bitumineux AB 25uS	6	80/100 + 3% de poudre Trinidad 50/50	4.8
Béton bitumineux AB 16S	4		5.6

Tableau 1.1 Caractéristiques principales des différents matériaux entrant dans la chaussée
Beschrieb der verwendeten Baustoffe

La portance de la couche de fondation en grave II non triée est: ME moy = 1.010 Pa
ME min = 0.833 Pa

La portance a été mesurée sur la couche AB 25uS pour chacune des planches au moyen d déflectographe Lacroix. La déflexion moyenne plus deux fois l'écart-type de chaque planche e de 35 1/100 mm, l'écart-type entre planches est de 2.

1.7 Choix de la formule de l'enrobé
Wahl der Mischgutrezeptur

La couche d'usure a été réalisée avec une formule de béton bitumineux AB 16S selon l'ancienne norme SN 640 431 de 1976 [Réf. 10], à partir de composants: granulats et bitumes préalablement identifiés.

Les caractéristiques principales des granulats et du bitume sont reportées dans les tableaux 1.2 et 1.3.

Coupure granulométrique * [mm]	Origine	Los Angeles [%]	CPA	% de non cubiques [%]
10/16	Collonges	14	56	35.6
6/10	Collonges	16		41.5
3/6	Collonges	18		33.5
0/3	Collonges			32.5

* Ancienne norme SN 670 710 b de 1972 [Réf. 11]

Tableau 1.2: Caractéristiques des granulats utilisés dans les 16 planches comparatives
Eigenschaften der verwendeten Mineralstoffe

Bitumes de référence	Pénétration à 25 °C [10^{-1} mm]	Température d'Anneau et Bille [°C]	Indice de pénétration Pfeiffer [-]
80/100	94	47	-0.35
60/70	60	51	-0.4

Tableau 1.3: Caractéristiques des bitumes
Eigenschaften der nichtmodifizierten Bitumen

La totalité du filler est issu de récupération, il remplit les exigences fixées par l'ancienne norme SN 670 760 de 1976 [Réf. 12].

La courbe granulométrique retenue est portée sur la figure 1.2, elle se situe en milieu de fuseau.

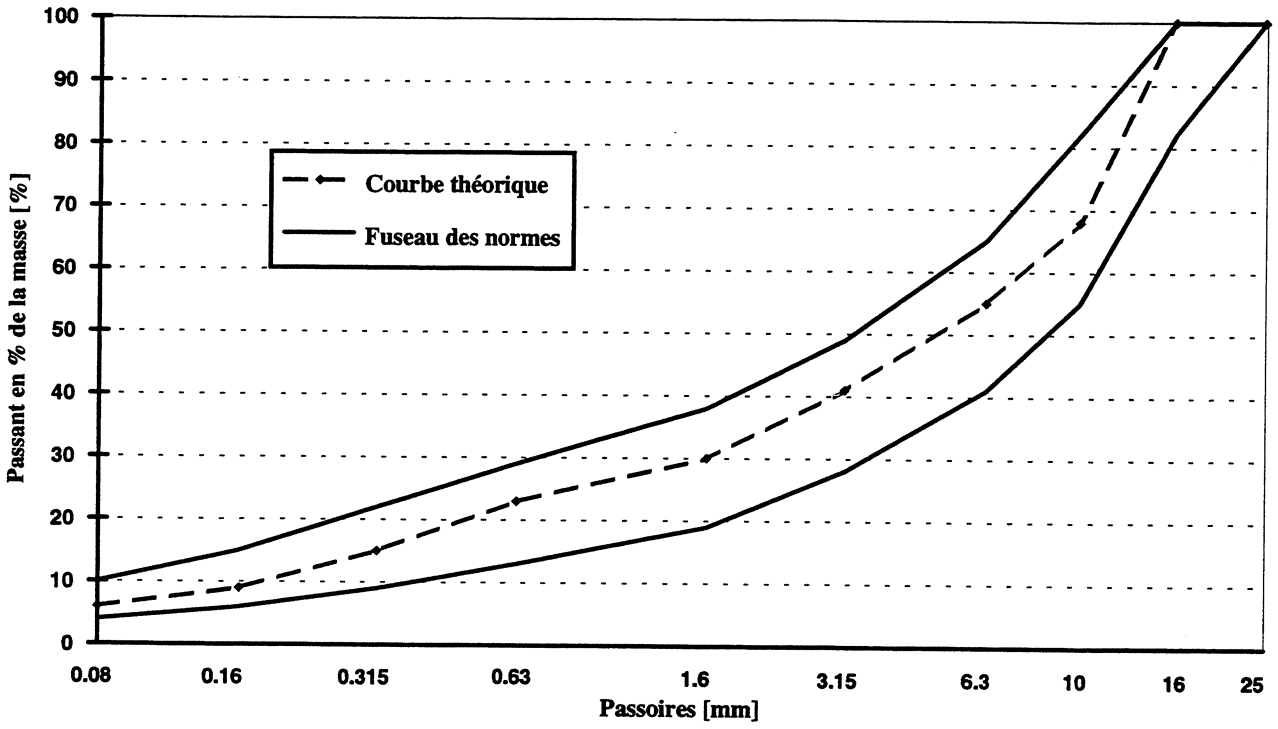


Figure 1.2: *Courbe granulométrique théorique comparativement au fuseau de la norme*
Sollwerte der Korngrössenverteilung im Vergleich zum normierten Bereich

L'étude préliminaire sur l'enrobé a permis, au moyen de la l'essai Marshall, de choisir les caractéristiques suivantes:

- teneur en liant sur granulats: 5.6 %
- teneur en liant sur enrobé: 5.3 %
- vides résiduels attendus: 4.0 %

1.8 Choix des liants modifiés et des ajouts
Wahl der Bindelmittel und der Zusätze

Douze planches (3 à 14) ont été réalisées avec des enrobés modifiés soit par utilisation d'un bitume modifié aux polymères prêt à l'emploi pour neuf d'entre elles, soit par l'introduction d'un polymère sous forme pulvérulente au niveau du malaxeur (planches 10 et 12) ou encore par introduction d'asphalte naturel sous forme de poudre avec adjonction de 50% de filler conduisant à une teneur en asphalte épuré de 0.9% (planche 13). Le tableau 1.4 indique pour chacune des planches le liant de base, le type et le dosage en polymère. Un classement par famille est introduit et sera repris pour l'analyse des résultats.

PLANCHE NO	LIANT DE BASE	TYPE DE POLYMERE		CLASSEMENT PAR NATURE DE POLYMERE
		LIANT PRET A L'EMPLOI	AJOUT PULVERULENT	
1	B80/100 semi-soufflé + dope			classique
2	B60/70 semi-soufflé + dope			classique
3	B80/100 distillation directe	S.B.S 3%		S.B.S
4	B40/50 distillation directe	S.B.S 3%		S.B.S
5	B80/100 distillation directe	S.B.S 5%		S.B.S
6	B40/50 distillation directe	S.B.S 5%		S.B.S
7	B80/100 distillation directe	polyoléfine 6%		polyoléfine
8	B60/70 distillation directe	(polyisobutylène +E.V.A) 11,5%		mixte avec E.V.A
9	B60/70 +agent oxydant	E.P.D.M 4%		E.P.D.M
10	B80/100 semi-soufflé		polyoléfine 7%	polyoléfine
11	B80/100 distillation directe	S.B.S 3%		S.B.S
12	B80/100 semi-soufflé		(S.B.S+EVA + agents) 4%	mixte avec E.V.A
13	B80/100 semi-soufflé		(Asphalte naturel+ filler) 3,6%	classique
14	B80/100 semi-soufflé en 2 étapes + B200	E.P.D.M 5%		E.P.D.M
15	B80/100 distillation directe			classique
16	B60/70 distillation directe			classique

Tableau 1.4: Liants utilisés sur les 16 planches d'essai
Bindemittel welche auf den 16 Vergleichsstrecken verwendet wurden

2. L'ETUDE - OBJECTIFS - PROGRAMME D'ESSAIS ZIELSETZUNG - UNTERSUCHUNGSPROGRAMM

Conformément aux buts définis au chapitre 1.2 l'étude porte sur le suivi à court, moyen et long terme de l'évolution in situ en relation avec les essais de laboratoire. Le présent rapport analyse notamment le comportement de la chaussée en liaison avec l'évolution des liants issus des 16 planches, caractérisés en laboratoire depuis la livraison jusqu'à quatre ans de mise en service. Un second rapport traitera de l'analyse comparée du comportement des enrobés en laboratoire et in situ pour la même période.

2.1 Programme d'essais Untersuchungsprogramm

Le programme de recherche global a été effectué avec le concours de dix laboratoires nationaux, de l'Université Technique de Münich et du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Paris; les tableaux 2.1, 2.2, 2.3 et 2.4 présentent l'intégralité de ce programme respectivement pour le relevé et les mesures d'état, le relevé permanent des sollicitations sur chaussée, les liants et les enrobés en indiquant pour chaque essai le laboratoire concerné et le stade d'évolution auquel il correspond à savoir:

- livraison ainsi que vieillissement artificiel pour les liants uniquement
- après mise en oeuvre: 0 an
- 2 ans après mise en service
- 4 ans après mise en service

Il faut noter que tous les essais de caractérisation de liants et d'enrobés réalisables dans les laboratoires nationaux ont été retenus.

Essais	Laboratoire	0 an	4 ans
Masse volumique au nucléodensimètre Rohdichte Isotopensonde	SRN	X	X
Déflectographe à masse tombante Fallgewichtsdeflektometer	Auscultation Routière SA	X	
Mesure de la microtexture SRT/Griffigkeit SRT	SRN	X	X
Mesure de la macrotexture au drainomètre Griffigkeit Ausflussmesser	SRN	X	X
Mesure de la hauteur au sable Sandfleck	LAVOC	X	X
Mesure de la macrotexture au skiddomètre Griffigkeit Skiddometer	IVT	X	X
Relevé visuel des dégradations/Visuelle Beurteilung	SRN		X
Index de confort de roulement (PSR) Befahrbarkeitsindex (PSR)	Auscultation Routière SA	X	
Pentes transversale et longitudinale (ARAN) Längs- und Quergefälle	Viaconsult AG	X	X
Profondeurs d'ornière et d'eau (ARAN) Spurrinnen- und Wassertiefe	Viaconsult AG	X	X
Index de confort de roulement (RCI)(ARAN) Befahrbarkeitsindex (RCI)	Viaconsult AG	X	X
Film vidéo de la surface de la chaussée et de l'espace environnant (ARAN) Videofilm	Viaconsult AG	X	X

Tableau 2.1: Relevé et mesures d'état
Messungen in situ

Essais	Laboratoire
Trafic sur chaque voie avec classement des véhicules selon leur longueur Verkehrszählung pro Spur inkl. Klassierung der Fahrzeuge nach Fahrzeuglänge	Etrelec
Température de la chaussée à la surface et dans les couches d'enrobés Temperatur des Belages	Etrelec/ LMS
Hygrométrie et température de l'air Lufttemperatur und Feuchtigkeit	Etrelec/ LMS
Ensoleillement par pyranomètre Sonnenscheindauer	Etrelec/ LMS
Mesure du rayonnement infrarouge par pyrgéomètre Messung der Infrarotstrahlung	Etrelec/ LMS

Tableau 2.2: Relevé permanent des sollicitations sur chaussée
Ständige Messungen der Beanspruchungen

Essai	Laboratoire	Livrai-son *	Viellissement artificiel*		Récupération sur carottes prélevées in situ		
			RTFOT	DIN	0 an	2 ans	4 ans
Densité/Dichte	LAVOC	X			X		X
Pénétration/Penetration 5, 15, 35°C	LAVOC	X			X		X
Pénétration /Penetration 25°C	LAVOC	X	X	X	X	X	X
Point de ramolissement A&B Erweichungspunkt R&K	LAVOC	X	X	X	X	X	X
Point de rupture Fraass (manuel) Brechpunkt nach Fraass (manuell)	LAVOC	X	X	X	X	X	X
Ductilité/Duktilität 4, 25°C	IMP/EMPA	X					
Ductilité/Duktilität 7°C	IMP/EMPA	X	X		X		X
Retour élastique 7°C Elastische Rückstellung	IMP	X	X				
Retour élastique 25°C Elastische Rückstellung	IMP	X	X		X	X	X
Viscosité dynamique sur rhéomètre Dyn. Viskosität 60, 90, 130, 150, 170°C	LAVOC	X	X		X	X 130°C	X
Recouvrance élastique 15 °C Elastische Rückformung	STIA	X					
Module de glissement Schubmodul	STIA	X					
Désenrobage/Haftfestigkeit Gravillon standard (Stamm) Standardsplitt	EMPA	X					
Désenrobage/Haftfestigkeit Gravillon utilisé (Collonges) Verwendeter Splitt	EMPA	X					
Stabilité au stockage Heisslagerstabilität	STIA	X					
Essais de traction directe Zugversuche -10, 20°C	LAVOC LCPC	X	X	X	X		X
Flexion - cisaillement-axial Bindemittel-Biege-Schub-Axial	EMPA				X		X
Chromatographie sur gel perméable GEL-permeations-chromatographie	STIA EMPA	X					X
Microscopie fluorescente UV UV-Fluorescenz-Mikroskopie	STIA EMPA	X					X
Spectrographie IR IR-Spektrographie	SHELL	X					
Teneur en cendres Aschegehalt	IMP						X
Teneur en asphaltènes Asphalten-Gehalt	LAVOC	X	X		X		X

* uniquement pour les liants prêts à l'emploi
nur für die in gebrauchsfertigem Zustand angelieferten PmB

Tableau 2.3: Programme d'essais sur liants
Untersuchungsprogramm Bindemittel

Essai	Laboratoire	0 an	2 ans	4 ans
Analyse granulométrique Korngrössenverteilung	STUAG	X	X	X
Teneur en liant soluble lösl. Bindemittelgehalt	STUAG	X	X	X
Densité de l'enrobé Dichte des Mischgutes	STUAG	X		X
Essai marshall Marshall-Versuch	STUAG	X		
Presse à cisaillement giratoire Gyrator	LAVOC	X		
Compression diamétrale Spaltzugversuch bei/à -10, 25, 45°C sur éprouvettes de laboratoire Bohrkerne aus Laborverdichtung	LAVOC	X		
Compression diamétrale Spaltzugversuch bei/à -10, 25, 45°C sur carottes Bohrkerne aus Baustelle	LAVOC	X	X	X
Module complexe/Komplexer Modul	LAVOC	X		X
Essai de fatigue à 10°C Ermüdungsversuch bei 10°C	LAVOC	X		X
Flexion-cisaillement-axial Biege-Schub-Axial	EMPA	X		X
Simulateur de trafic Verkehrssimulator	LAVOC	X		
Fluage statique/Statischer Kriechversuch	ERTEC	X		X
Fluage dynamique Dynamischer Kriechversuch	ERTEC	X		X
Pulsateur/Pulsator Compression dynamique Druck-Schwellversuch	WALO	X		X
Pulsateur/Pulsator Flexion dynamique Biegezug-Schwellversuch	WALO	X		X
Pulsateur/Pulsator Flexion dynamique Biegezug-Schwellversuch	CTW			X
Relaxation à froid 0, -10, -20, -30 °C Kälte-Relaxationsversuche	TU München	X		
Traction par contraction thermique empêchée Kälte-Kontraktionsversuche	TU München	X		

Tableau 2.4: Programme d'essais sur enrobés
Untersuchungsprogramm Mischgut und Bohrkerne

3. LA CHAUSSEE
FAHRBAHN

3.1 Contrôle de conformité des enrobés à la fabrication
Qualitätsprüfung der Mischgut-Aufbereitung

Dans ce sous-chapitre, on examinera la conformité des enrobés à la fabrication par rapport aux tolérances définies dans l'ancienne norme SN 640 431 de 1976 [Réf. 9] en ce qui concerne la composition et les caractéristiques Marshall. Pour ce qui est de la composition, on dispose en plus de résultats obtenus sur carottes (annexes A et B)

3.1.1 Granulométrie et teneur en liant

Toutes les valeurs individuelles figurent dans l'annexe A. Leur examen conduit aux commentaires suivants.

La granulométrie moyenne des enrobés prélevés en centrale reportée sur la figure 3.1 est dans la fraction sable, légèrement plus grenue que le mélange théorique de l'ordre de 5%; les écarts admissibles des valeurs moyennes par rapport aux valeurs nominales sont dépassés de 0,5 à 3%. Cependant, les écarts admissibles entre les valeurs isolées et les valeurs nominales sont pour la plupart dans les tolérances.

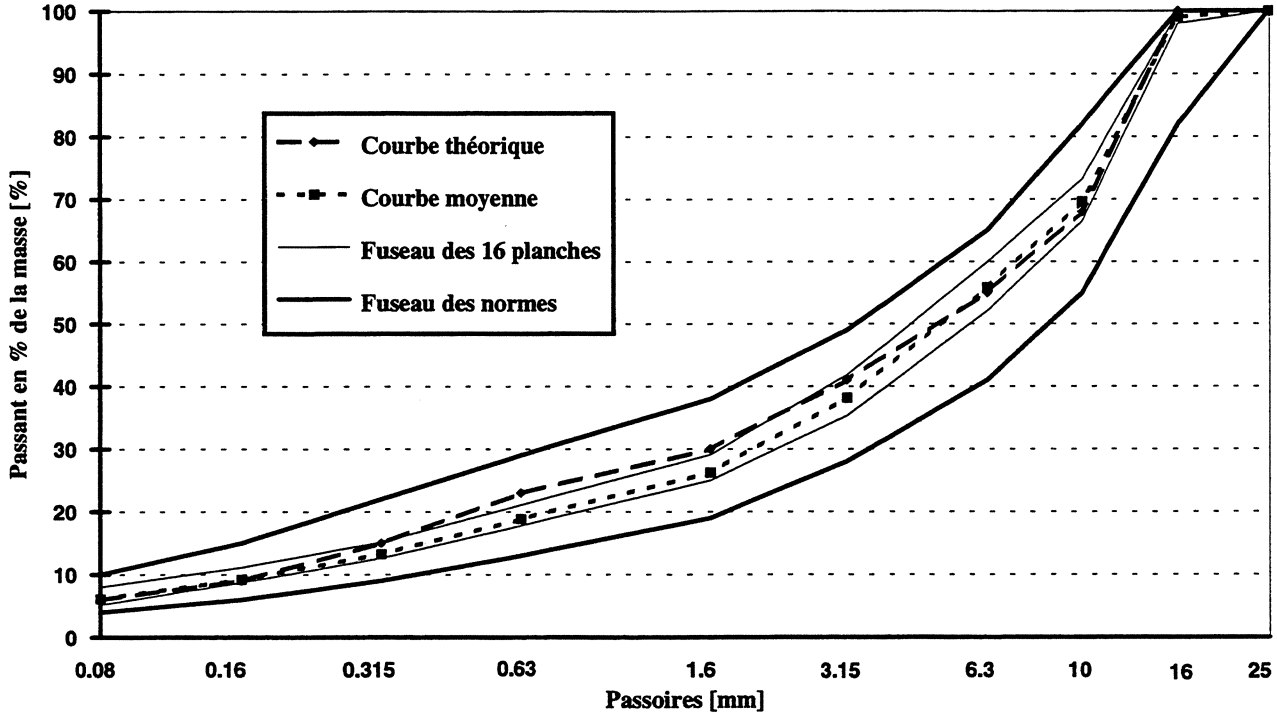


Figure 3.1: *Courbe granulométrique moyenne des 16 planches et du fuseau des 16 planches, comparativement à la courbe théorique et au fuseau des normes*
Mittelwert der Korngrössenverteilungen der 16 Vergleichsstrecken; Gegenüberstellung zu den Sollwerten

La moyenne ainsi que la plupart des valeurs isolées de la teneur en liant sont en conformité avec les écarts admissibles. Notons néanmoins que l'enrobé de la planche 12 contient un excès de liant. Sa teneur se situe entre 0,4 et 0,5 % en dessus de la moyenne de 5.35% sur enrobé; cela est confirmé par les résultats des extractions sur carottes reportés dans l'annexe A.

3.1.2 Masse volumique de l'enrobé et essai Marshall

La masse volumique de l'enrobé a été déterminée conformément à la norme SN 671 965a [Réf. 13]. Les valeurs isolées se situent entre 2.49 et 2.51 g/cm^3; valeur moyenne 2.50 g/cm^3, écart-type 0.006 g/cm^3.

L'essai Marshall a été exécuté selon la norme SN 671 969b [Réf. 14]. Les résultats sont reportés dans l'annexe A et se résument comme suit:

- La teneur en vides des planches 1 et 9 dépasse la limite supérieure de la fourchette fixée dans la norme SN 640 431 [Réf. 9].
- Toutes les valeurs de stabilité se situent au-dessus du minimum exigé de 10 kN pour les revêtements types S.
- Les valeurs de fluage sont assez proches les unes des autres, mais elles dépassent pour trois quarts des planches la limite supérieure de 3.5 mm; la moyenne de l'ensemble des planches se situe à 4.2 mm.

3.2 Contrôle de conformité du revêtement après mise en place Qualitätsprüfungs des Einbaus der Beläge

La conformité, au sens de la norme SN 640 431a [Réf. 15] du revêtement des planches, a été vérifiée par les contrôles suivants:

- épaisseur de la couche,
- teneur en vides et degré de compactage par nucléodensimétrie et par pesée hydrostatique sur carottes,
- planéité; relevé géométrique par le système ARAN selon la norme SN 640 521a [Réf. 16]
  - * pentes transversale et longitudinale,
  - * planéité transversale exprimée en une profondeur d'ornière et hauteur d'eau théorique,
  - * planéité longitudinale exprimée par les index de confort de roulement RCI et PSR,
- qualité antidérapante selon la norme SN 640 511b [Réf. 17],
  - * pendule SRT et drainomètre,
  - * skiddomètre à roue bloquée de l'IVT, ETHZ.

Ces évaluations ont été complétées par des mesures de:

- modules élastiques de la superstructure au moyen d'un déflectomètre à masse tombante F.W.D.

L'examen des résultats, consignés dans l'annexe B, suscite les commentaires suivants:

3.2.1 Epaisseur de la couche

La plus grande partie des valeurs isolées se situe à l'intérieur des ± 20% d'écart admissible. L'épaisseur moyenne est respectée pour les planches 1 à 8, 10, 12 et 13, mais pour les planches 9, 11 et 14 à 16, l'épaisseur moyenne n'est que 35 mm.

3.2.2 Teneur en vides et degré de compactage

La teneur en vides est conforme, sauf pour quelques carottes des planches 1, 2, 4, 5, 9, 14 et 15, pour lesquelles le maximum est dépassé de 1 à 2%. Pour certaines de ces planches, la moyenne dépasse légèrement la limite supérieure de 6%. Avec des valeurs moyennes de teneur en vides de respectivement 7.05, 6.40, 6.33 et 6.40% pour les planches 2, 5, 14 et 15.

La compacité moyenne de 98% de la compacité Marshall est atteinte sur toutes les planches.

3.2.3 Planéité

Les irrégularités transversales mesurées en continu par sections de 250 m sont inférieures ou égales en moyenne à 4 mm.

La planéité longitudinale est bonne pour l'ensemble des planches, mais n'atteint nulle part le maximum.

3.2.4 Qualité antidérapante

Les exigences de la norme sont largement remplies pour les trois types de mesures. Pour le skiddomètre, les valeurs se situent dans le domaine qualifié comme "bon; note 5" selon l'échelle provisoire de l'institut de planification des techniques des transports et construction de routes et de chemin de fer (IVT) de l'ETHZ.

3.2.5 Modules élastiques

Les valeurs de modules élastiques au F.W.D. présentent un niveau correct: elles sont comprises entre 2760 et 3872 MPa. La durée de vie estimée est supérieure à 20 ans.

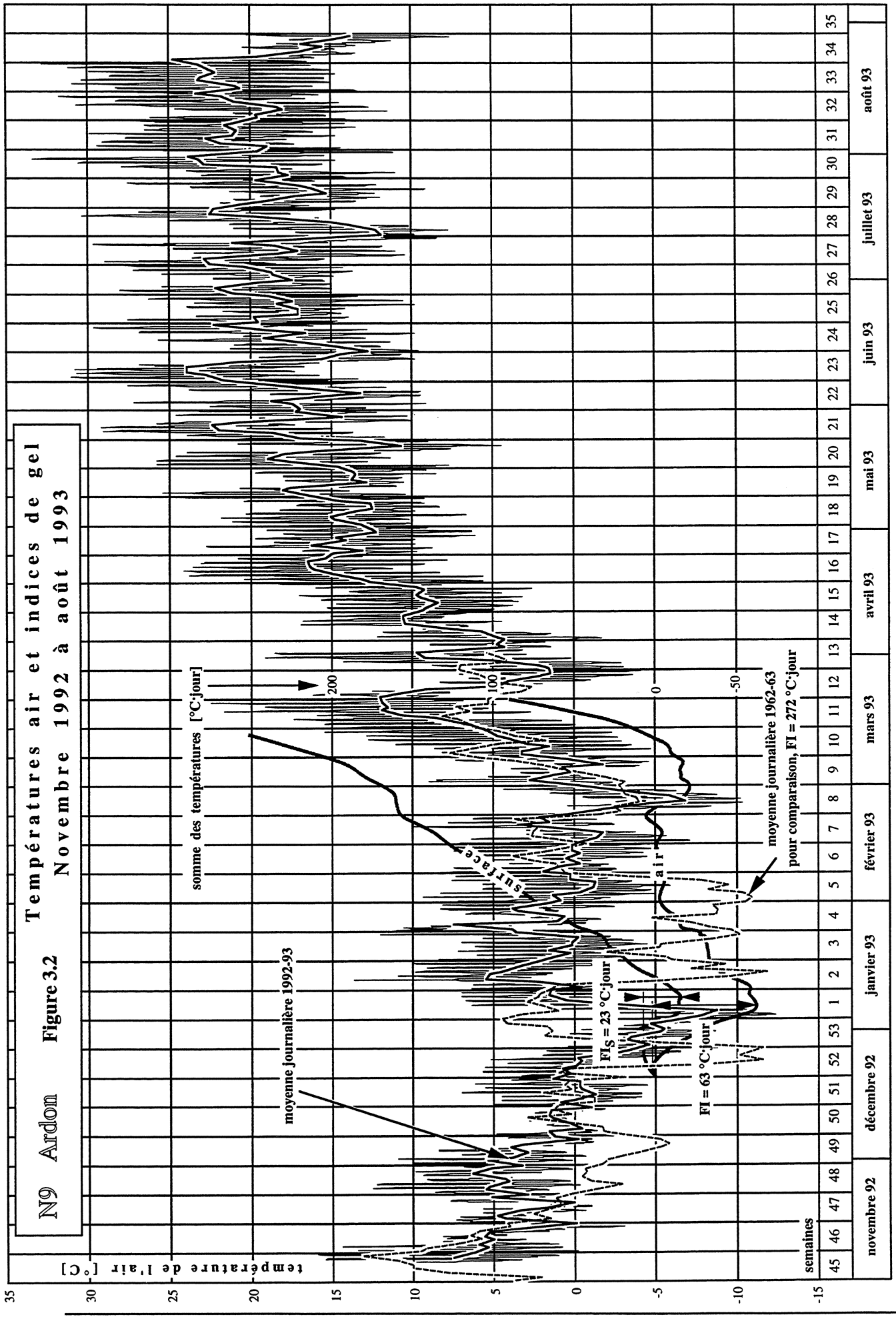
3.3 Relevé permanent des sollicitations
Permanente Messung der Beanspruchungen

3.3.1 Conditions météorologiques

Les mesures faites sur place et les analyses menées par M. Dysli du LMS de l'EPFL [Réf. 18] permettent de mettre en évidence les conditions suivantes :

- Indices de gel de l'air

L'indice de gel de l'air, selon la norme SNV 670 140 a [Réf. 19] est la plus grande différence en °C jour entre le maximum et le minimum de la courbe cumulative des températures moyennes journalières de l'air pendant la période de gel. Les indices de gel des 4 hivers qui ont suivi l'exécution des planches sont successivement de 52, 73, 109 et 127 °C jour. L'indice le plus élevé des 30 dernières années dans le secteur est de 272 °C jour, cela pour l'hiver 1962/1963. L'indice moyen des 3 hivers les plus froids des 30 dernières années est de 207°C jour (cf. figure 3.2). On peut donc conclure que durant ces quatre premiers hivers les enrobés n'ont pas été soumis à des conditions climatiques difficiles.



Laboratoire de Mécanique des Sols de l'EPFL, mai 1993

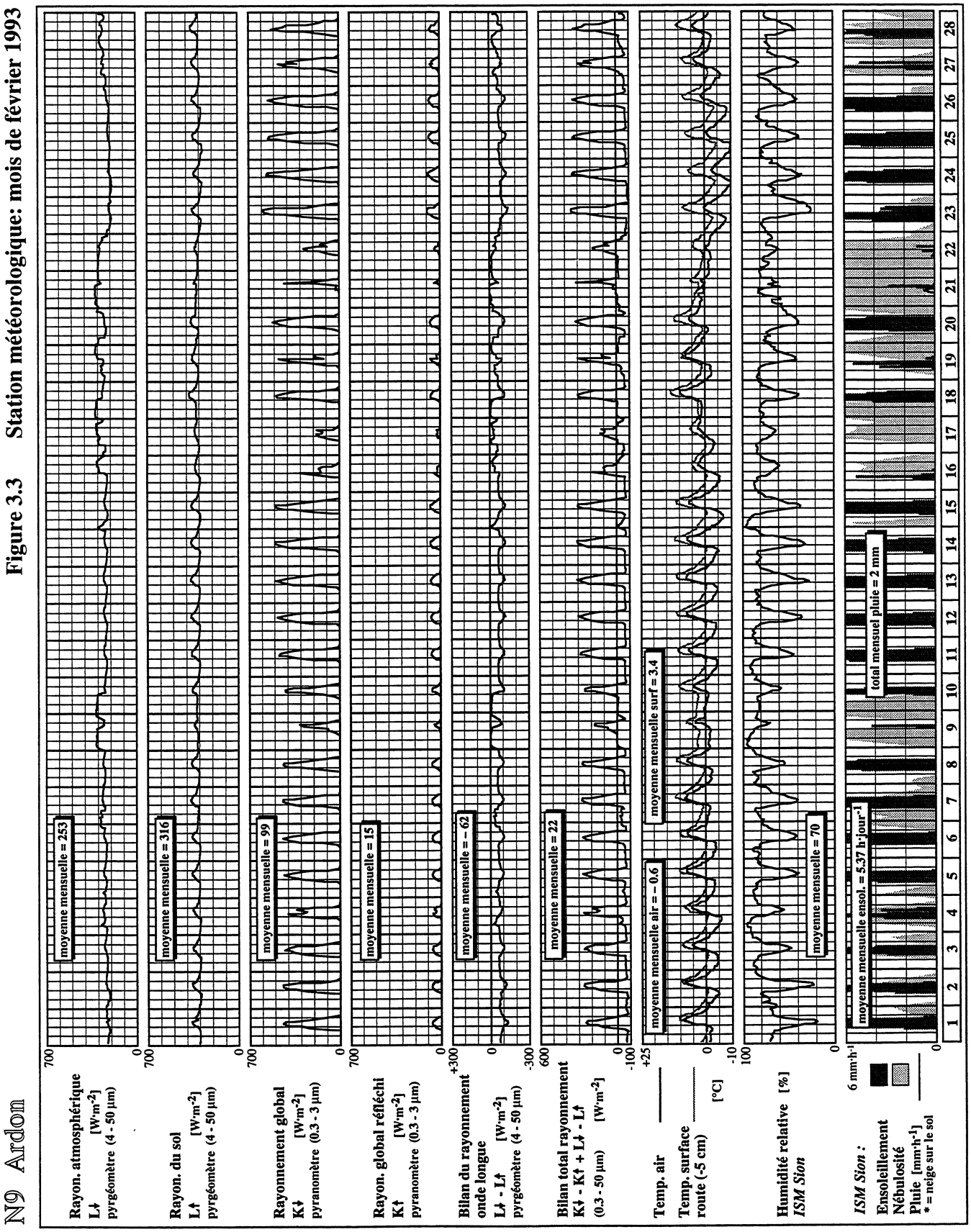


Figure 3.3 Station météorologique: mois de février 1993

Laboratoire de Mécanique des Sols de l'EPFL, mai 1993

- Mesures des radiations

Dès l'hiver 1992, un pyranomètre et deux pyrgéomètres ont été installés au droit de la station de mesure afin de mesurer l'indice de gel de la route F_{ξ}. Les résultats de ces mesures figurent au graphique 3.2. Elles mettent en évidence que l'indice de gel de la route est de 23°C jour, alors que celui de l'air est de 63°C jour. Ces valeurs sont également reportées sur la figure 3.3. Les mesures détaillées sont données à titre d'exemple pour le mois de février 1993 (figure 3.3). On relèvera que le bilan global des radiations est positif pour la chaussée et que la température à la surface de la chaussée (- 5 cm) est quasiment toujours supérieure à la température de l'air.

- Mesures des températures dans la chaussée

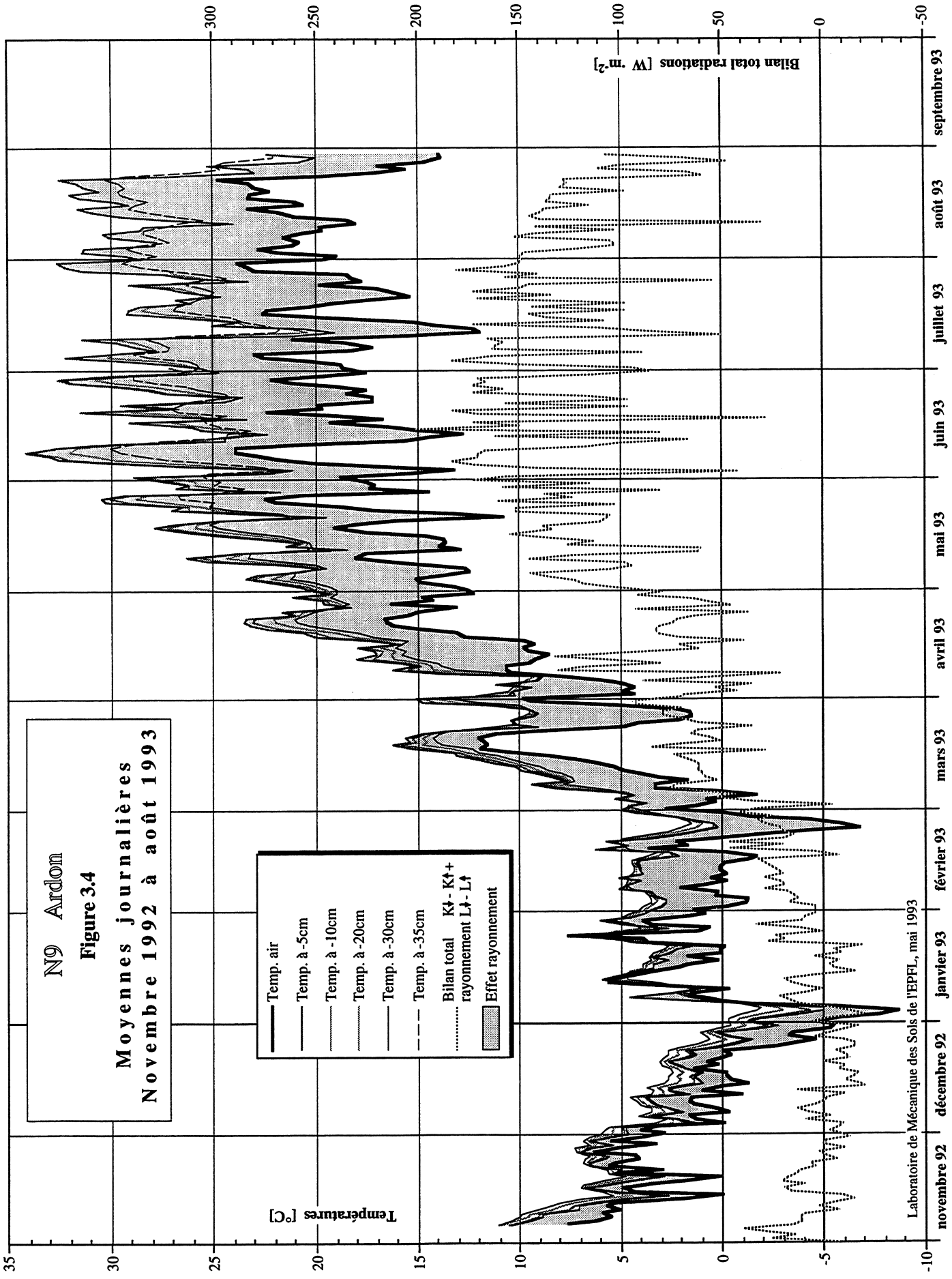
Les résultats de ces mesures pour novembre 1992 à août 1993 sont illustrés par la figure 3.4 Les figures 3.5 et 3.6 mettent en évidence les gradients thermiques de la chaussée pour quatre cas de figure de l'hiver 1992/1993 et quatre cas pour l'été 1993.

On constate que les gradients thermiques près de la surface peuvent être importants selon l'heure de la journée, plus de 1°C par cm d'épaisseur d'enrobé, et que les différences de température entre le jour et la nuit peuvent s'élever à plus de 30°C à la surface de la chaussée.

Pour l'instant, il n'a pas été fait de recherches en direction des sollicitations de la chaussée dues aux gradients thermiques, mais elles sont au programme de la suite des essais.

3.3.2 Volume du trafic

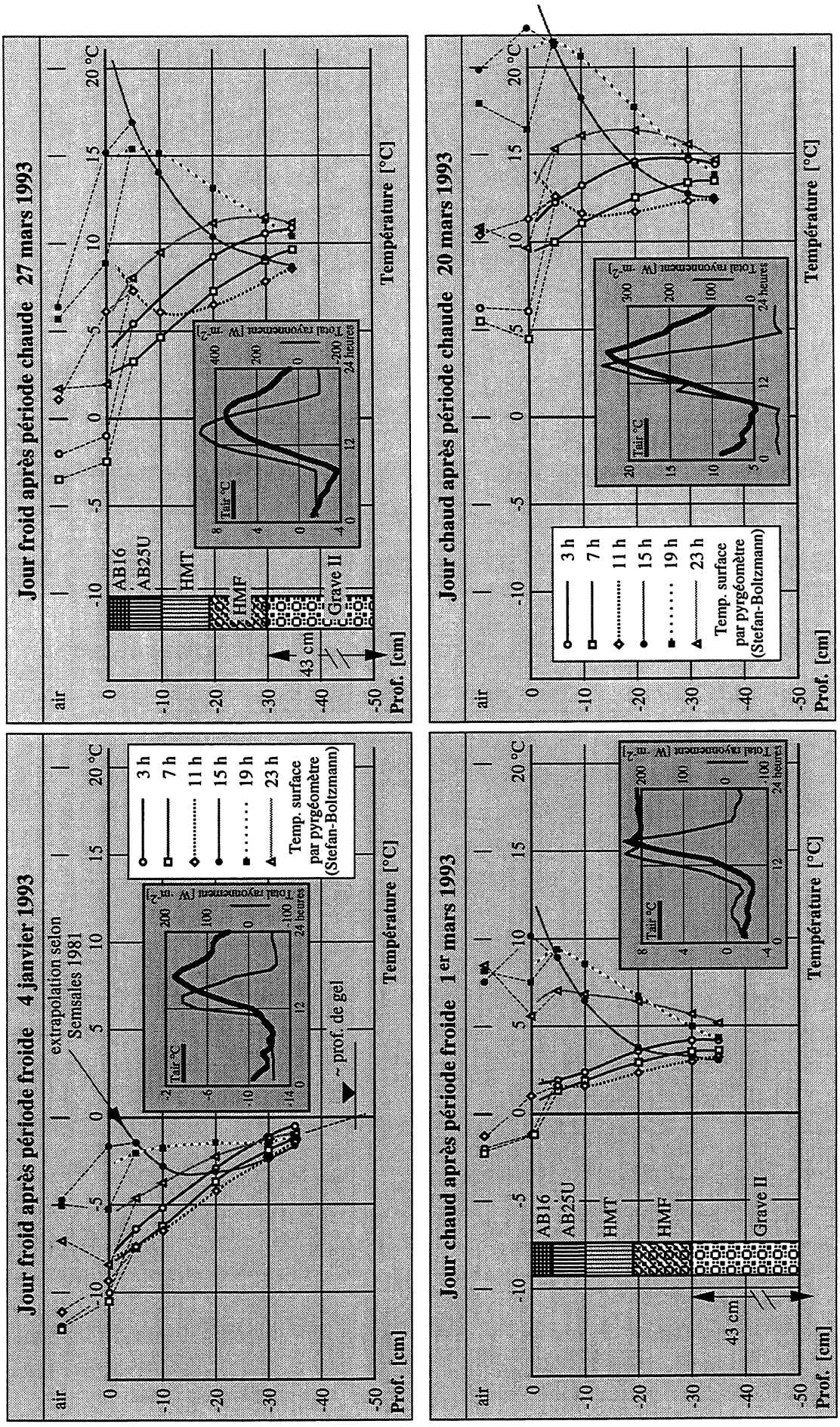
Les comptages du trafic donnent pour l'année 1992 un volume total de 7 mios de véhicules répartis à raison de 25% sur les voies de dépassement et 75% sur les voies normales. La mesure de la longueur des véhicules met en évidence que 20% de ceux-ci ont une longueur plus grande que 7 m. Le calcul, en l'absence pour l'instant de comptage précis des poids lourds et de mesure du poids des essieux, permet d'estimer que le trafic pondéral équivalent TF (essieu standard de 81.6 kN) est de 1500 pour chaque voie normale. Quant au trafic de dimensionnement de la chaussée TF, il est de 1600 en moyenne pour une durée de 20 ans et une augmentation annuelle du trafic de 5% par an.


N9 Ardon
Figure 3.4
Moyennes journalières
Novembre 1992 à août 1993
Temp. air
Temp. à -5cm
Temp. à -10cm
Temp. à -20cm
Temp. à -30cm
Temp. à -35cm
Bilan total K↓ - K↑ + rayonnement L↓ - L↑
Effet rayonnement
Bilan total radiations [W .m-2]
Températures [°C]
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
-10
300
250
200
150
100
50
0
-50
novembre 92
décembre 92
janvier 93
février 93
mars 93
avril 93
mai 93
juin 93
juillet 93
août 93
septembre 93
Laboratoire de Mécanique des Sols de l'EPFL, mai 1993

N9 Ardon

Figure 3.5

Températures en fonction de la profondeur pour quatre jours typiques de l'hiver 1993

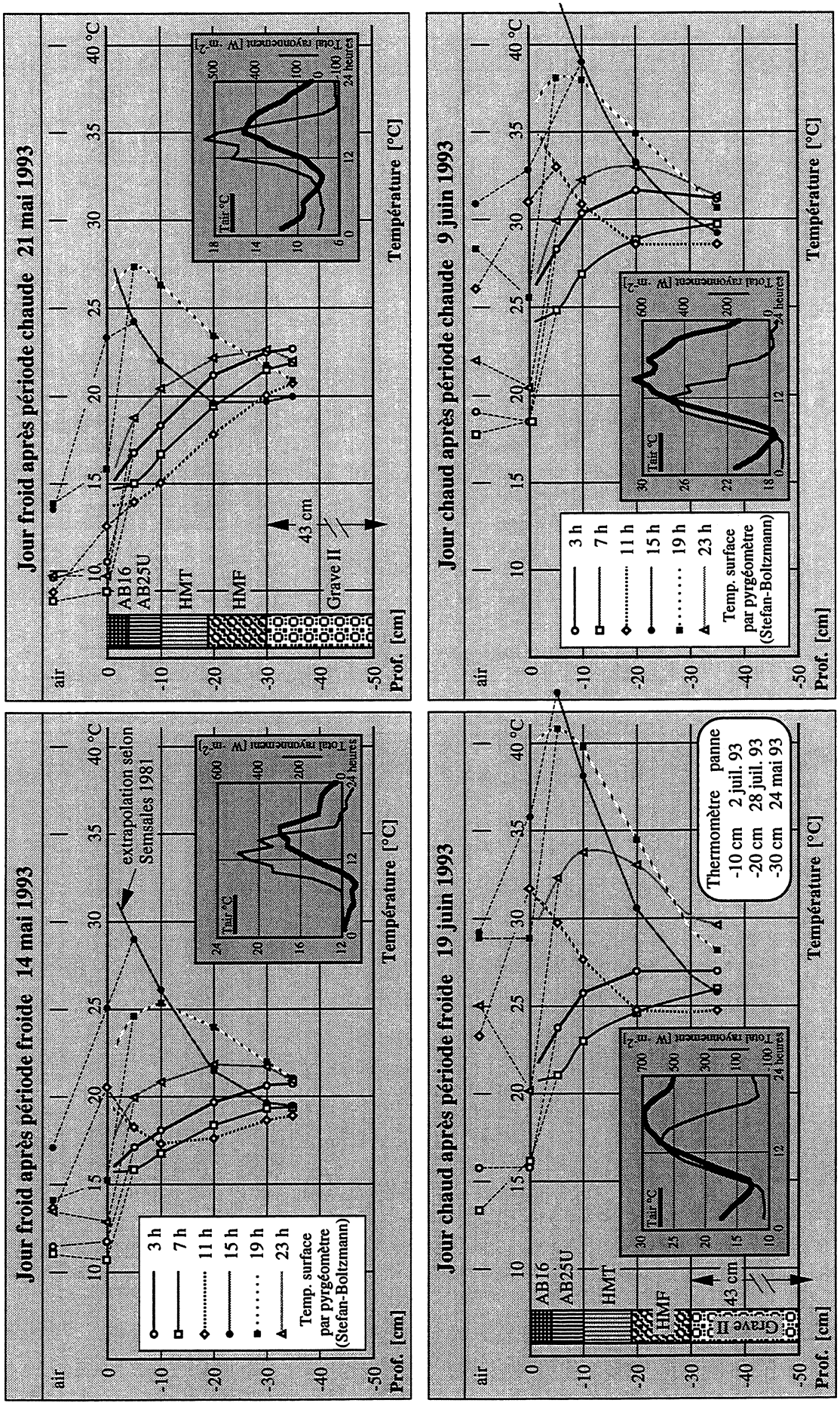


Laboratoire de Mécanique des Sols de l'EPFL, mai 1993

N9 Ardon

Figure 3.6

Températures en fonction de la profondeur pour quatre jours typiques de l'été 1993



Laboratoire de Mécanique des Sols de l'EPFL, mai 1993

3.4 Relevé visuel à 4 ans
Visuelle Zustandserfassung nach 4 Jahren

Un premier relevé visuel détaillé a été fait en mai 1992 après 4 ans de service. L'ensemble des planches a été parcouru à pied par deux personnes. A chaque point hectométrique une surface d'environ 100 m^2 a été examinée avec le plus grand soin.

Le relevé a été fait sur la base de la norme SN 640 925 [Réf. 20] comprenant le formulaire pour le relevé détaillé et le catalogue des dégradations. En plus, la fissuration a été relevée schématiquement sur quelques planches caractéristiques à l'aide d'un cadre de 1.9 m x 1.9 m avec des fils formant un quadrillage de 10 cm de côté, et les types de dégradation rencontrés ont été photographiés. Les relevés au cadre ainsi que les photos figurent dans l'annexe C.

Sur les vingt-deux types de dégradation retenus par le catalogue des dégradations, on en a détecté essentiellement trois types, à savoir:

- polissage
- perte de matériaux
- fissuration (longitudinale, transversale et diverse)

A l'aide de ce catalogue, une note d'étendue et une note de gravité, chacune allant de zéro à trois, a été attribuée à ces trois types de dégradation de surface. Les échelles de la note d'étendue et de gravité sont reportées dans les tableaux 3.1 et 3.2

Note d'étendue	Etendue des dégradations	% du tronçon dégradé
1	très localisées	< 10%
2	localisées à étendues	10...50%
3	très étendues	> 50%

Tableau 3.1: Echelle de la note d'étendue des dégradations
Beurteilung des Schaden-Ausmasses

Note de gravité	Gravité des dégradations
1	légères
2	moyennes
3	graves

Tableau 3.2: Echelle de la note de gravité des dégradations
Beurteilung des Schaden-Ausmasses

Ces notes étant des entiers, la précision de caractérisation de la gravité des dégradations s'est avérée insuffisante. C'est pourquoi des fractions de note, entre 0 (pas de dégradation) et 1 (dégradation faible) ont été attribuées. L'étendue par contre a été caractérisée par les notes entières préconisées par la norme. Toutes les valeurs individuelles sont données dans l'annexe D.

3.4.1 Polissage

On constate un léger polissage dans les traces des roues uniforme sur toutes les planches. La note de gravité définie est de 1/3 et celle d'étendue 3 (soit plus de 50% de la surface).

3.4.2 Perte de matériaux

A 4 ans, la perte de matériaux composée principalement de mortier et de petits gravillons reste faible pour l'ensemble des planches.

A chaque point hectométrique, le volume des creux a été caractérisé en lui associant le calibre des grains correspondants à savoir du sable, des petits gravillons (3/6), des gravillons moyens (6/10) et des gros gravillons (10/16). La fréquence a été classifiée entre "très peu", "peu" et "assez de".

Comme il n'était pas possible de caractériser qualitativement la gravité de la perte de matériaux, on a directement procédé à une intégration semi-quantitative des pertes de matériaux. Ainsi la note de gravité intègre une pondération de la taille et de la fréquence des grains arrachés.
Le poids donné à la taille est de:

1/2 pour le sable
1 pour les petits gravillons (3/6)
2 pour les gravillons moyens (6/10)
3 pour les gros gravillons (10/16).

Le poids attribué à la fréquence est de:

1/2 pour "très peu"
1 pour "peu"
2 pour "assez de".

Ces notes semi-quantitatives varient entre 4 et 11, elles ont été divisées par 10 afin de qualifier au mieux l'état des planches avec la note de gravité 1 caractérisant une perte de sable/gravillon isolée.

La note de gravité est ainsi comprise entre 0,4 et 1,1. L'étendue a été fixée à 1 pour l'ensemble des planches (soit moins de 10% de la surface).

3.4.3 Fissures

La fissuration relevée est le plus souvent de type diverse. Elle se présente sous forme soit d'amorces de fissures, soit de petites fissures isolées ou encore d'une fissuration légère ramifiée plus ou moins étendue.

Par planche l'appréciation qualitative de la fissuration peut être décrite comme indiqué dans le tableau 3.3

N° de la planche	Voie normale Normalspur	Voie de dépassement Überholspur
1	amorces / Ansätze zur Rissbildung	pas de fissures / keine Risse
2	amorces à petites fissures Ansätze zur Rissbildung	très peu d'amorces sehr wening Ansätze zur Rissbildung
3	pas de fissures / keine Risse	amorces / Ansätze zur Rissbildung
4	quelques petites fissures einige kleine Risse	très peu d'amorces petites fissures sehr wening Ansätze zur Rissbildung, kleine Risse
5	amorces et quelques petites fissures Ansätze zur Rissbildung und einige kleine Risse	pas de fissures keine Risse
6	pas de fissures / keine Risse	pas de fissures / keine Risse
7	amorces / Ansätze zur Rissbildung	pas de fissures / keine Risse
8	assez fissurée / ziemlich gerissen	assez fissurée / ziemlich gerissen
9	fissuration très étendue / sehr stark gerissen	fissuration très étendue / sehr stark gerissen
10	peu de petites fissures wening kleine Risse	très peu d'amorces, petites fissures sehr wening Ansätze zur Rissbildung, kleine Risse
11	pas de fissures / keine Risse	pas de fissures / keine Risse
12	amorces et fissures dans les zones de ségrégation Ansätze zur Rissbildung und Risse in entmischten Bereichen	amorces Ansätze zur Rissbildung
13	petites fissures à l'axe kleine Risse in der Achen	pas de fissures keine Risse
14	amorces / Ansätze zur Rissbildung	amorces / Ansätze zur Rissbildung
15	amorces / Ansätze zur Rissbildung	pas de fissures / keine Risse
16	amorces / Ansätze zur Rissbildung	pas de fissures / keine Risse

Tableau 3.3: Etat qualitatif de la fissuration des 16 planches à 4 ans
Beurteilung der Risse nach 4 Jahren

Seules les planches 6 et 11 ne présentent aucune fissuration perceptible à l'oeil. Par contre la planche 8 est assez fissurée alors que sur la planche 9 on observe une fissuration légère mais dense sur toute sa surface. Sur ces deux dernières planches même la voie d'arrêt est fissurée.

Des relevés au cadre ont été effectués sur les planches 8, 9, 10, 12 et 13. Ces relevés sont reproduits dans l'annexe C et donnent une image précise de la fissuration des planches concernées. On trouvera également dans cette annexe une documentation photographique des dégradations de ces mêmes planches, ainsi que des planches 2 et 4.

Pour la gravité la note 3 est attribuée à une largueur de fissuration supérieure à 10 mm, la note 2 à des largueurs de fissures comprises entre 2 et 10 mm et la note 1 caractérise une fissuration faible de moins de 2 mm de large.

Actuellement la largueur des fissures est toujours inférieure à 2 mm. On a introduit les notes fractionnées suivantes pour les différencier, à savoir:

1/8 pour les amorces de fissures
1/4 pour les petites fissures isolées
3/4 pour une fissuration légère ramifiée
1 pour une densité de fissuration ramifiée plus élevée.

La note d'étendue a été déterminée comme indiqué dans le tableau 3.1.

Les notes caractérisant l'étendue et la gravité de l'état de fissuration pour chacune des planches à 4 ans sont représentées sur la figure 3.7

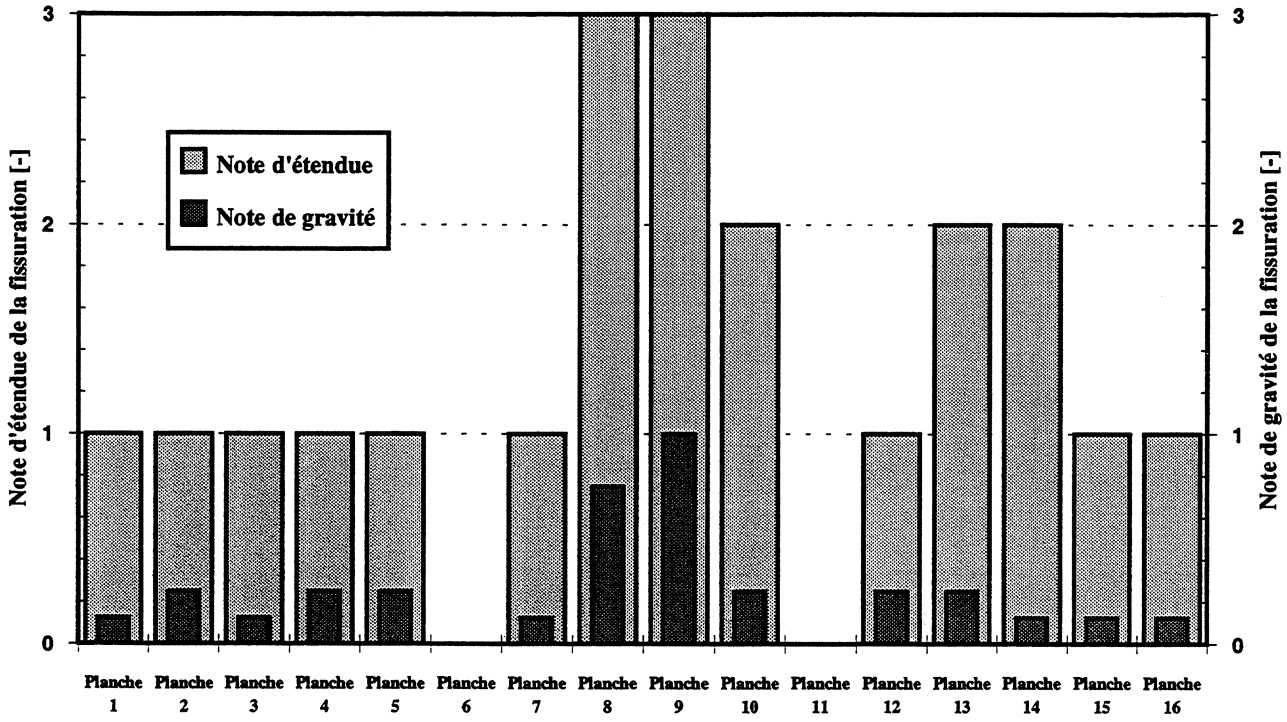


Figure 3.7: *Notes caractérisant l'étendue et la gravité de la fissuration des planches à 4 ans*
Beurteilung der Rissebildung der 16 Vergleichsstrecken nach 4 jahren mittels Zustands-Index

3.4.4 Calcul de l'indice du relevé visuel I_1

L'indice I_1 de dégradation apparente de la chaussée se calcule sur la base de la formule suivante:

$$I_1 = 5 - \frac{1}{10} \Sigma\, g_i\, A_i\, S_i \qquad \text{[ref. 20]}$$

où g_i : poids de la dégradation i (considérant l'effort nécessaire à son élimination)
A_i : note d'étendue de la dégradation i
S_i : note de gravité de la dégradation i

Dans le cas particulier de nos planches la valeur de I1 est donnée par:

$$I_1 = 5 - \frac{1}{10} \sum (2\, A_{polissage}\, S_{polissage} + 2\, A_{perte\ de\ matériaux} S_{perte\ de\ matériaux} + 4\, A_{fissure}\, S_{fissure})$$

Les valeurs pondérées pour ces trois types de dégradations sont représentées dans la figure 3.8.

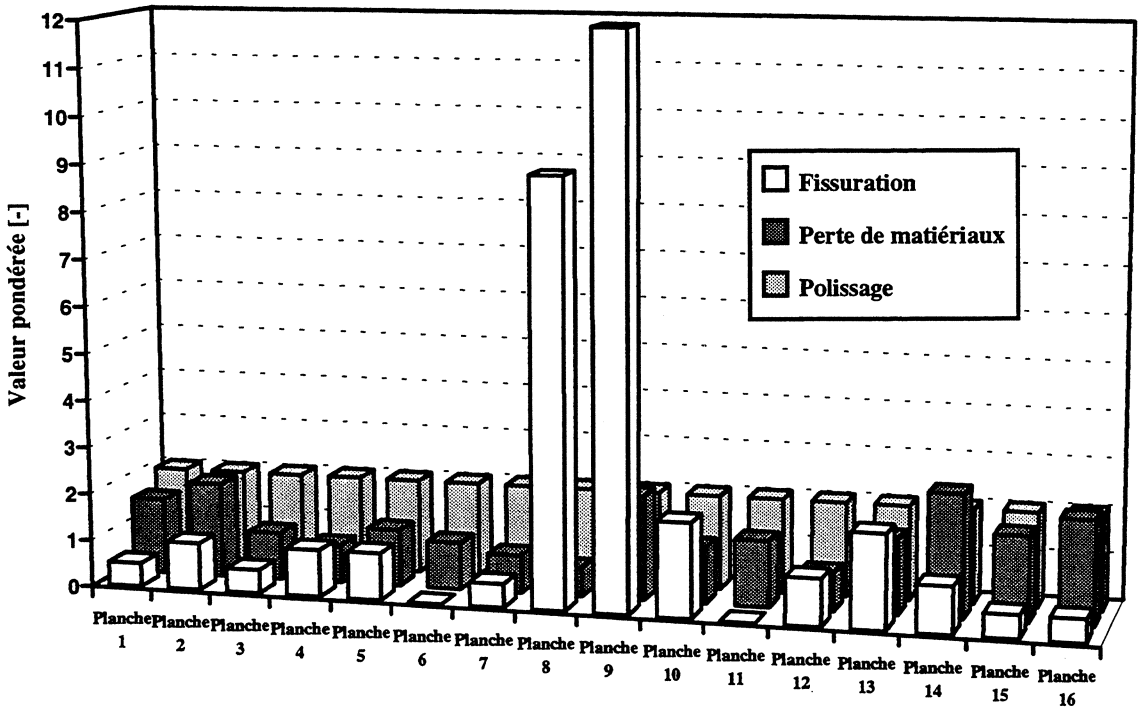


Figure 3.8: *Valeurs pondérées pour chacune des planches*
Visuelle Zustandserfassung

L'indice I_1 de dégradation apparente peut varier de 5 (très bon) à 0 (très mauvais). La figure 3.9 présente cet indice pour l'ensemble des planches.

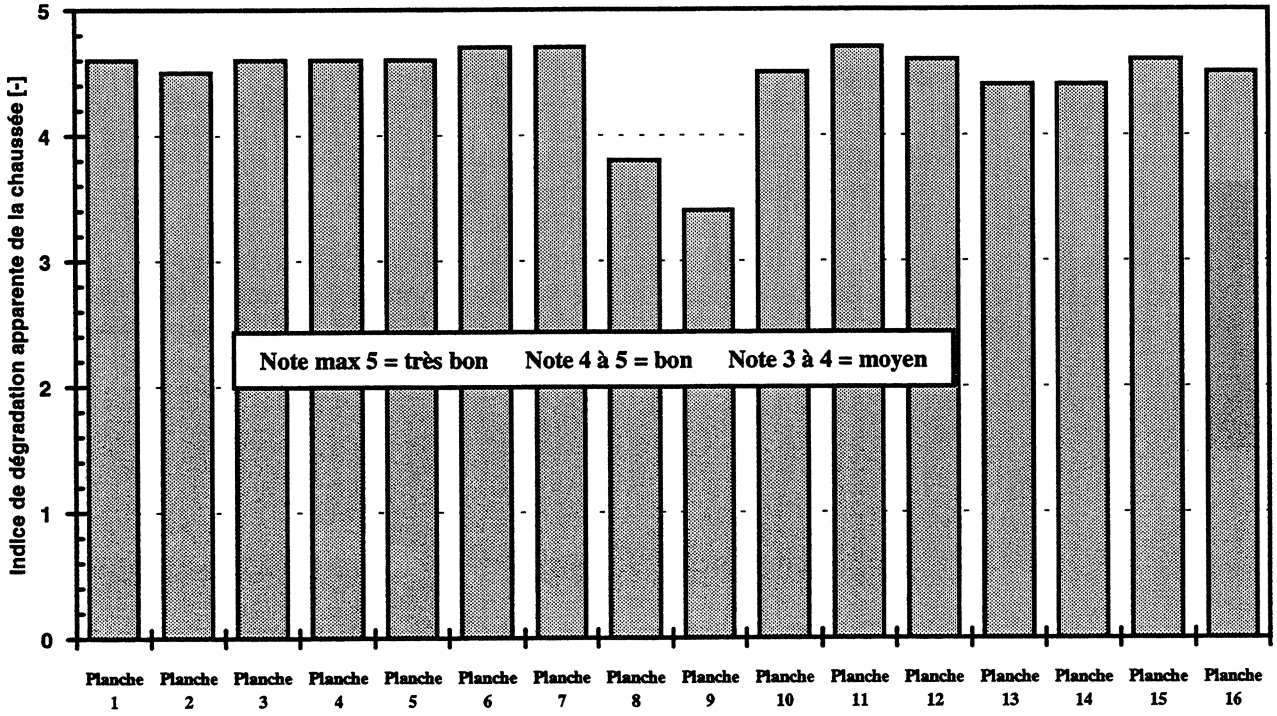


Figure 3.9: *Indice de dégradation apparente pour les 16 planches*
Zustandsindex I_1 (SN 640 925) der 16 Vergleichsstrecken

A 4 ans l'ensemble des planches se situe donc à un niveau qualifié de "bon", seules les planches 8 et 9 présentent un indice "moyen".

3.5 Evolution des mesures d'état de 0 à 4 ans
Zustandindex nach 0 und 4 Jahren

3.5.1 Index de confort de roulement

L'index de confort qui traduit la qualité de l'uni longitudinal a été mesuré à l'aide de l'appareil ARAN. A l'état initial, les notes obtenues sur les planches se situaient entre 3.9 et 4.2 la note maximale de l'échelle étant de 5. Les mesures après 4 ans montrent que l'uni longitudinal de la chaussée n'a pas changé et reste dans la qualification "bon à excellent". Toutes ces valeurs sont consignées dans l'annexe B.

3.5.2 Mesure de la hauteur au sable

Puisque aucune mesure n'a été faite à l'état initial et que le film de liant à la surface du revêtement de la voie d'arrêt est encore intact, il est admis que la hauteur au sable mesurée à 4 ans sur la voie d'arrêt représente l'état initial, bien que l'atelier de compactage de la voie d'arrêt ne soit pas strictement identique à celui des voies de roulement.

Les mesures moyennes de la hauteur au sable après 4 ans de l'ensemble des 16 planches ainsi que l'écart-type sont reportés dans le tableau 3.4 des valeurs individuelles figurant dans l'annexe B.

	Moyenne de la hauteur au sable	Ecart-type
Voie d'arrêt (admis égal à l'état initial)	0.46	0.04
Dans les traces des roues de la voie normale	0.57	0.05
Entre les traces des roues de la voie normale	0.50	0.05

Tableau 3.4: Valeurs de la hauteur au sable à 4 ans
Rauhtiefe (Sandfleck) nach 4 Jahren

L'évolution de la hauteur au sable a été calculée en effectuant la différence entre la valeur moyenne obtenue sur la voie d'arrêt (1 profil) et sur la voie normale (3 profils). Les planches présentant la plus faible évolution sous trafic sont les planches 3 et 11 avec une augmentation respective de 0.01 et 0.03. La planche montrant la plus forte évolution sous trafic est la planche 16 avec une augmentation de 0.16.

On a ensuite comparé, à titre indicatif, l'évolution générale de la hauteur au sable à l'appréciation semi-quantitative de la perte de matériaux appréciée visuellement sur les voies normales et de dépassement. La figure 3.10 montre une assez bonne concordance entre ces deux caractéristiques.

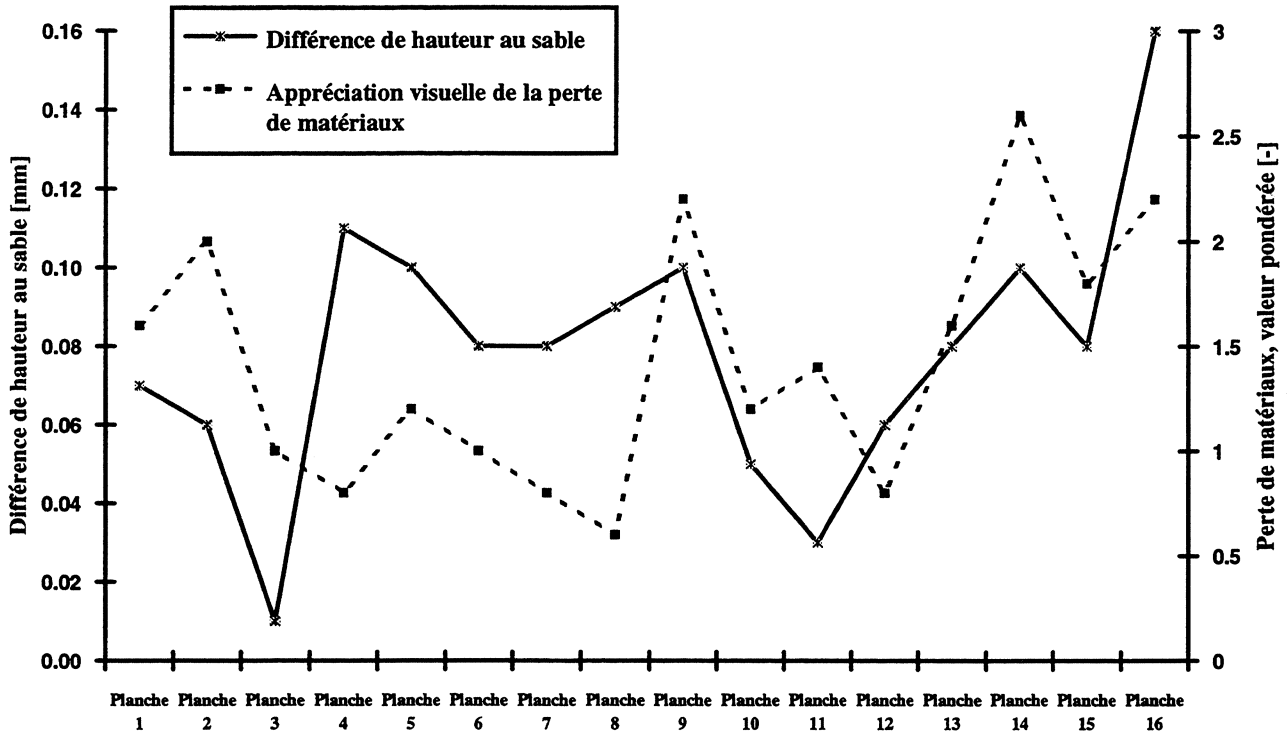


Figure 3.10: *Comparaison entre la hauteur au sable et la perte de matériaux*
Vergleich zwischen der Rauhtiefe (Sandfleck) und dem Materialverlust

En moyennant ces deux méthodes d'appréciation de l'évolution de l'état de surface on constate que les planches 3, 10, 11 et 12 présentent une évolution faible et les planches 9, 14 et 16 une évolution assez forte.

De manière générale les surfaces de toutes les planches et ceci plus particulièrement dans les bandes de roulement ont une tendance à la perte de matériaux.

3.5.3 Qualité antidérapante et mesures de la macro et microtexture

Des mesures de rugosité ont été effectuées au skiddomètre, au pendule SRT et au drainomètre au temps zéro et à 4 ans. Les résultats de ces mesures, reportés dans l'annexe B, n'ont pas mis en évidence de différences significatives entre les planches. Ainsi, on a renoncé à traiter séparément chaque planche; les valeurs données ci-dessous représentent les valeurs moyennes pour l'ensemble des planches.

Les mesures au skiddomètre donnent des valeurs moyennes de 0.53 +/- 0.02 au temps zéro et de 0.57 +/- 0.02 à 4 ans pour la mesure à 80 km/h. Pour toutes les planches (sauf les planches 10 et 12) on relève une amélioration de la qualité antidérapante due à l'élimination du film de bitume entourant les granulats après mise en oeuvre. Cette valeur antidérapante est qualifiée de "bonne" à "très bonne", la valeur indicative donnée par la norme SN 640 511b [Réf. 17] étant de 0.32 pour des vitesses > 100 km/h.

Les mesures effectuées au drainomètre mettent en évidence des temps d'écoulement très bas de l'ordre de 4 à 10 secondes correspondant à une macrotexture importante; il n'y a pas eu d'évolution significative des mesures de drainabilité entre le temps zéro et 4 ans.

Les mesures effectuées au pendule SRT donnaient au temps zéro une valeur moyenne pour toutes les planches de 73 +/- 1.6. A 4 ans ces valeurs chutent à une moyenne de 58 +/- 2.2, cette valeur est en dessous de la valeur minimum indicative de la norme SN 640 511b [Réf. 17] qui est de 65. Cette chute est imputable à la perte de matériaux de la surface mise en évidence par les mesures de hauteur au sable et par le relevé visuel.

3.5.4 Mesure de la profondeur d'ornière

La mesure de la profondeur d'ornière à 4 ans a été réalisée sur des profils distants de 10 m. Elle est illustrée par la figure 3.11.

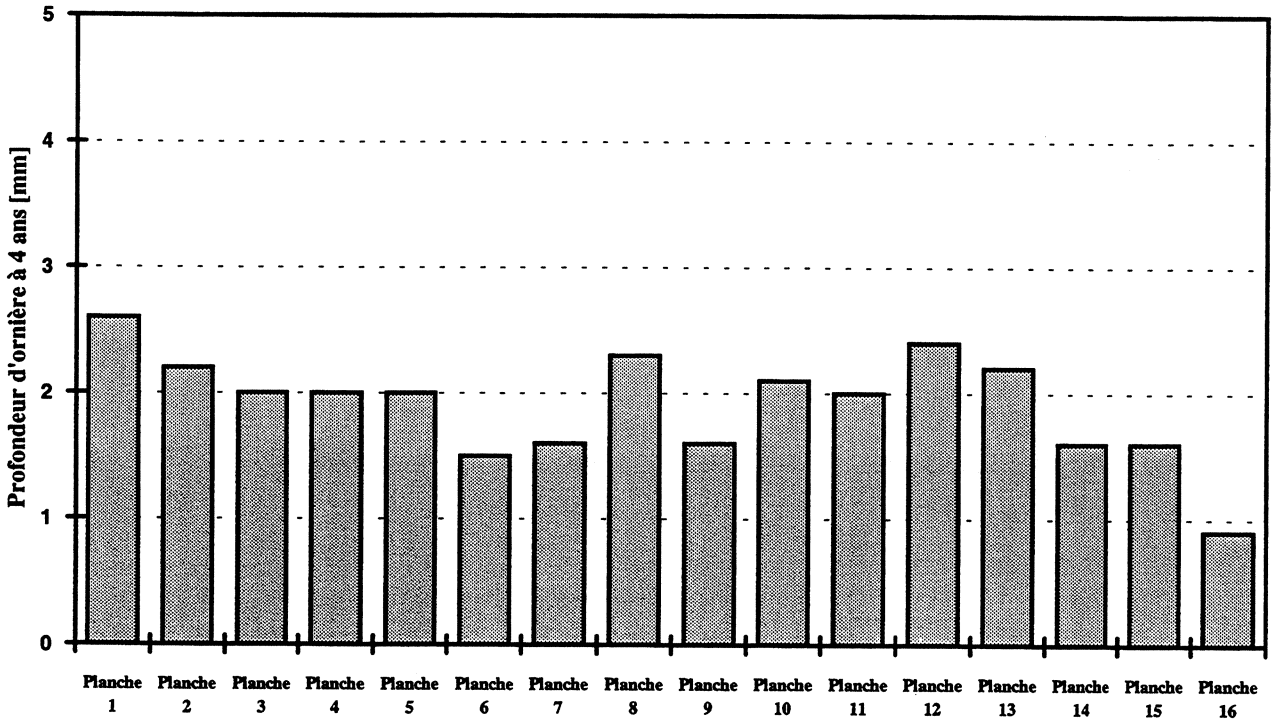


Figure 3.11: *Profondeur d'ornière à 4 ans pour les 16 planches*
Spursinnentiefe nach 5 Jahren

Les profondeurs mesurées correspondant à la valeur moyenne de la plus grande profondeur d'ornière de chaque profil, se situent entre 0.9 mm et 2.6 mm. Ces valeurs sont très basses et ne mettent pas en évidence d'orniérage manifeste pour aucun produit. La forte résistance à l'orniérage de la recette retenue avait d'ailleurs été établie à l'état initial par les essais de laboratoire au simulateur de trafic. On relève cependant que la profondeur d'ornière à 4 ans est plus élevée pour les planches 1 et 15 réalisées avec des bitumes B 80/100 que pour les planches 2 et 16 exécutées avec des bitumes B 60/70.

3.6 Analyse des coûts (référence: 1989)
Kosten-/Nutzenanalyse (Preistand 1989)

L'analyse des coûts réalisée sur l'année 1989 a mis en évidence une plus-value moyenne d'environ Fr. 30.-/t d'enrobé (+25%) pour l'utilisation de bitumes polymères, soit une plus-value de Fr. 3.-/m² pour une couche d'usure de 4 cm d'épaisseur.

Sur la base des expériences faites sur le tronçon N9 St-Maurice - Riddes, la première intervention d'entretien lourd a eu lieu entre 10 et 15 ans pour un enrobé AB 16S exécuté avec un bitume classique 60/70 identique à celui de la planche 2. La dégradation ayant déclenché l'intervention était un taux de thermofissuration important. Le coût de l'intervention soit par la méthode Remix, soit par la solution géotextile + couche d'accrochage épaisse + 3 cm d'enrobé macrorugueux à fort dosage en liant était de Fr. 14.-/m², y compris les coûts annexes de signalisation durant le chantier et le nouveau marquage horizontal.

Cette analyse des coûts n'a pas pour objectif de couvrir toutes les situations pouvant se présenter, mais seulement de prendre en compte la situation de la N9. Elles ont été établies avec deux hypothèses, une première avec intervention à 10 ans et une deuxième avec intervention après 15 ans.

3.6.1 Première approche

L'analyse des coûts sans investissement annuel est représentée dans la figure 3.12.

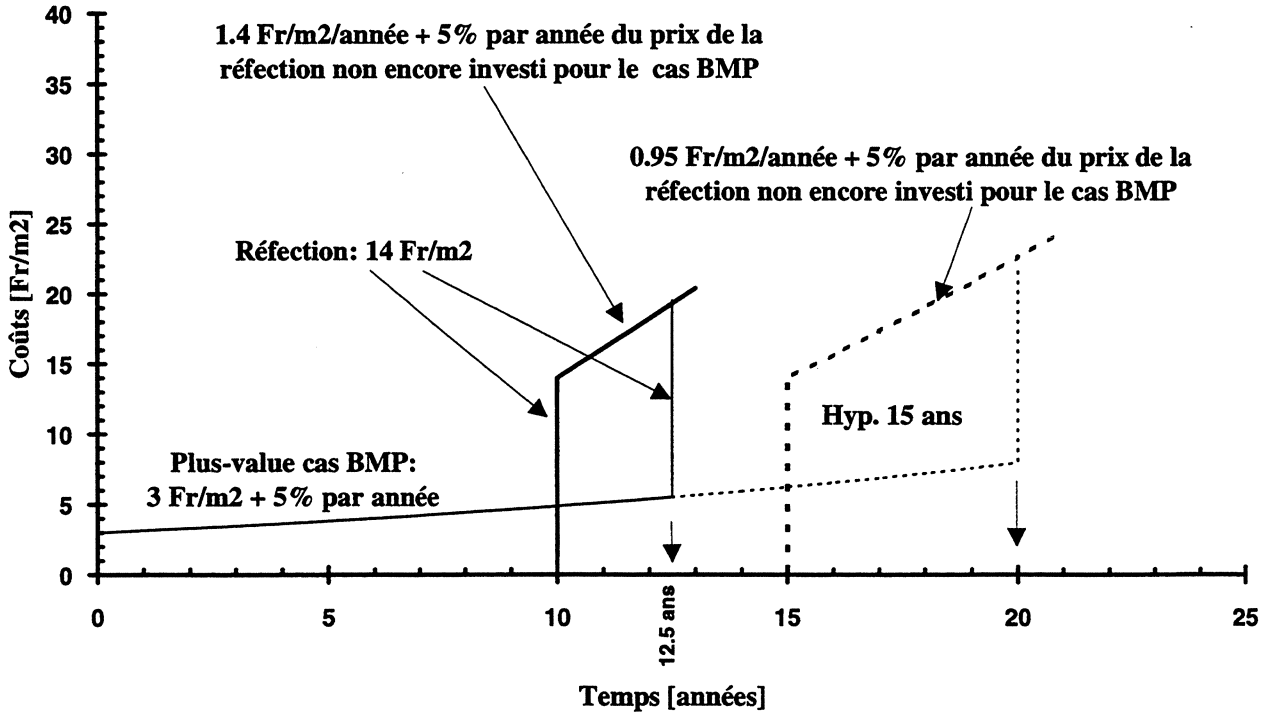


Figure 3.12: *Illustration de l'analyse des coûts pour la première approche*
Graphische Darstellung der Kosten-Nutzenanalyse
(Annahme ohne jährliche Amortisation)

Pour un enrobé classique, le coût de l'entretien lourd est de Fr. 14.-/m². A partir de la réfection, il est admis qu'une provision de Fr. 1.4/m² par an doit être prise en compte pour le cas d'une intervention à 10 ans et de Fr. 0.95/m² par an pour l'intervention à 15 ans. Ces montants sont déterminés de manière à obtenir la somme de Fr. 14.-/m² nécessaire au prochain entretien soit après respectivement 20 et 30 ans.

Pour un enrobé avec bitume polymère, l'investissement supplémentaire de Fr. 3.-/m² est pris en compte avec un intérêt de 5% par an dès le temps zéro. Il est admis que le coût de l'entretien lourd est aussi de Fr. 14.-/m². Le montant investi pour la réfection de l'enrobé classique est pris en compte avec un intérêt de 5% par an dès la réfection.

Ces calculs montrent que pour une intervention à 10 ans sur un enrobé avec bitume classique, l'équilibre des coûts est atteint si l'intervention sur la couche de roulement avec bitume polymère est réalisée à 12.5 ans. Pour une intervention à 15 ans sur un enrobé avec bitume classique, l'équilibre des coûts est réalisé si l'entretien sur la couche de roulement avec bitume polymère est effectué à 20 ans.

3.6.2 Deuxième approche avec investissement annuel

L'analyse du bilan financier pour l'hypothèse d'une réfection sur enrobé classique après 10 ans avec investissement annuel est illustré par la figure 3.13.

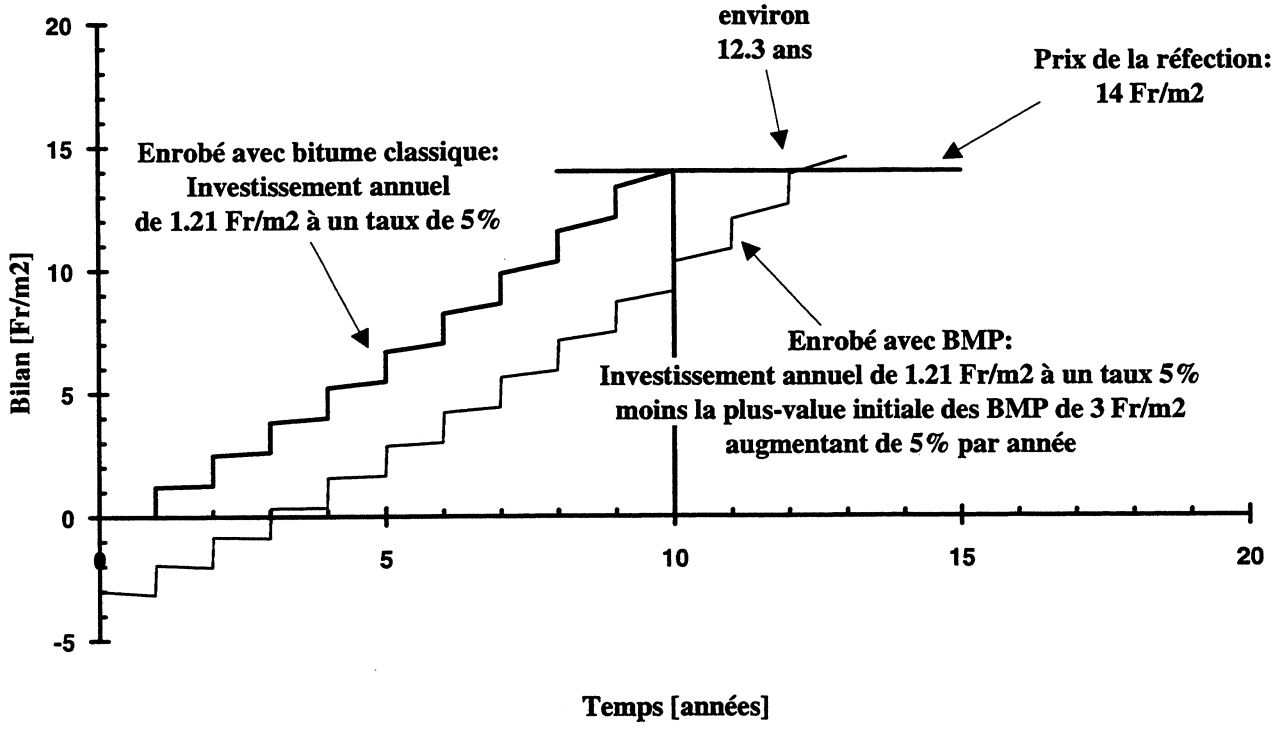


Figure 3.13: *Analyse du bilan financier pour l'approche avec investissement annuel dans l'hypothèse d'une réfection à 10 ans*
Graphische Darstellung der Kosten-Nutzenanalyse mit jährlischer Amortisation und der Annahme eines Belagsersatzes nach 10 Jahren

Dans ce cas, pour obtenir la somme de Fr. 14.-/m² après 10 ans, le calcul des intérêts composé à 5% par an montre qu'il faut investir chaque année Fr. 1.21/m².

Pour un enrobé avec bitume polymère, l'investissement initial de Fr. 3.-/m² est pris en compte avec un intérêt de 5% par an dès le temps zéro. En admettant que l'on investisse annuellement le même montant que pour le cas de l'enrobé avec bitume classique et que le coût de l'entretien lourd est également de Fr. 14.-/m². La différence entre l'investissement annuel à un taux de 5% par an et la plus-value initiale des bitumes polymères au même taux montre que l'équilibre des coûts est atteint si l'entretien sur la couche de roulement avec bitume-polymère est réalisé après 12.3 ans.

L'hypothèse d'une réfection sur enrobé classique après 15 ans avec investissement annuel est présentée dans la figure 3.14.

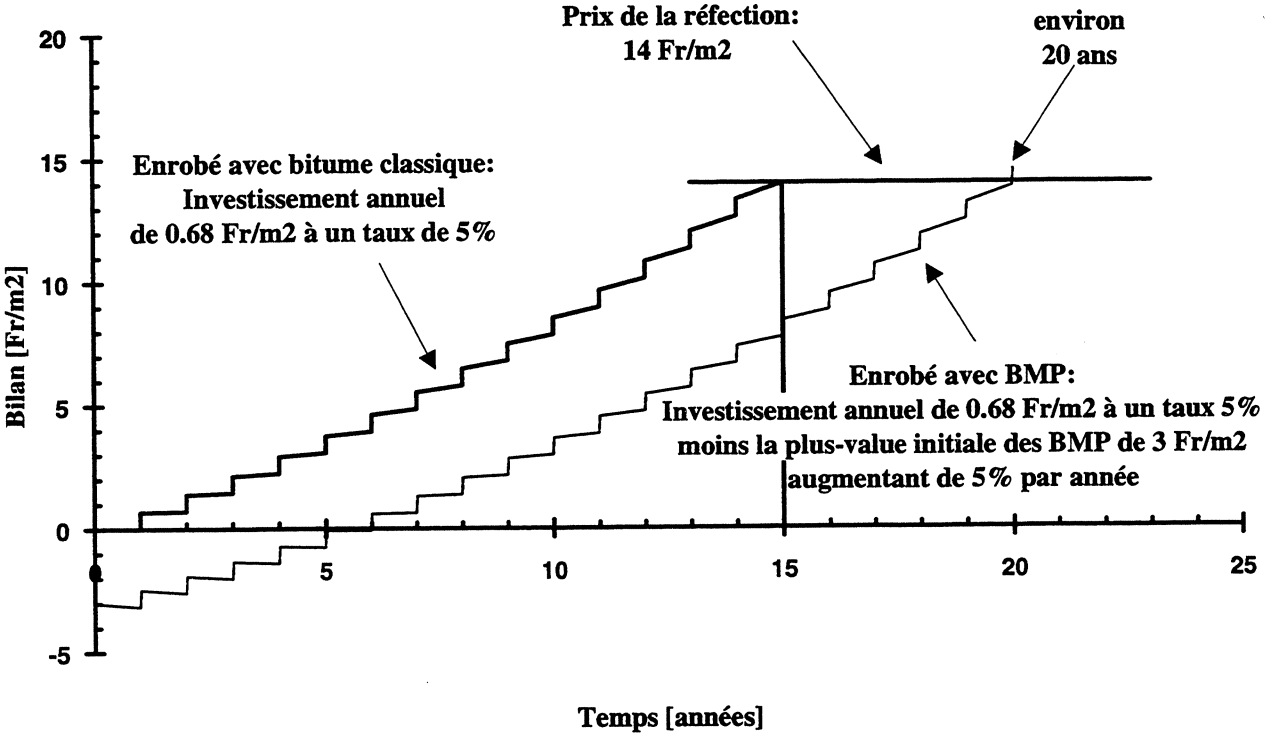


Figure 3.14: *Analyse du bilan financier pour l'approche avec investissement annuel dans l'hypothèse d'une réfection à 15 ans*
Graphische Darstellung der Kosten-Nutzenanalyse mit jährlischer Amortisation und der Annahme eines Belagsersatzes nach 15 Jahren

Pour cette hypothèse, le calcul des intérêts composés sur 15 ans indique que l'investissement annuel doit être de Fr. 0.68/m² à un taux de 5% par an pour que l'on dispose des Fr. 14.-/m² nécessaires à la réfection.

Par le même raisonnement que pour le cas de l'hypothèse à 10 ans, le calcul montre que l'équilibre des coûts est atteint si l'intervention sur couche de roulement exécutée en bitume polymère est réalisée après 20 ans.

En conclusion, il ressort de ces deux approches qu'il y a un gain financier à exécuter la couche de roulement avec des bitumes polymères si la durée de vie de cet enrobé est augmentée d'au moins 2.5 ans dans l'hypothèse d'une réfection sur un enrobé en bitume classique à 10 ans ou d'au moins 5 ans dans l'hypothèse d'une réfection à 15 ans.

3.7 Synthèse des résultats sur chaussée
Zusammenfassung der Ergebnisse

3.7.1 Mesures permanentes in situ

a) Climat: les 5 hivers qui ont suivi l'exécution des planches ont connu des climats peu sévères puisque les indices de gel de l'air se situent entre 60 et 120 °C jour alors que l'indice de gel de dimensionnement est de 200 °C jour.

b) Trafic: le trafic moyen est d'environ 1200 à 1500 véhicules/jour alors que le trafic de dimensionnement est de TF = 1600.

3.7.2 Relevé et mesures d'état à 4 ans

Pour la recette AB 16S choisie pour l'enrobé des planches de comparaison, nous relevons :

1) Orniérage

Il n'y a pas de problème d'orniérage, que ce soit pour les bitumes classiques ou pour les bitumes polymères. De plus, il n'y a pas de différence significative entre l'orniérage mesuré sur les planches exécutées avec des bitumes classiques et sur celles avec des bitumes polymères ou des ajouts.

2) Résistance à la fatigue

Le relevé d'état met en évidence qu'il n'y a pas de problème de fatigue pour aucune des planches.

3) Etat de surface

Il n'y a pas de différence significative sur l'évolution des caractéristiques de surface pour l'ensemble des planches.

4) Fissuration

Des dégradations de fissuration thermique sont apparues dès la deuxième année de mise sous circulation.

Le relevé à 4 ans montre une fissuration:

- équivalente pour les planches réalisées avec des bitumes classiques et pour les planches 3, 4, 5, 7, 12 et 14
- plus marquée pour les planches 10 et 13
- très marquée pour les planches 8 et 9
- on ne constate aucune fissuration sur les planches 6 et 11

De ce point de vue, seuls deux bitumes-polymères ont donc à 4 ans un comportement meilleur que celui des bitumes classiques.

4. LES LIANTS
BINDEMITTEL

Les extractions ont été effectuées sur l'ensemble des carottes prélevées in situ aux fins d'essai de compression diamétrale après le test, selon la norme SN 671 860 [Réf. 21]. Pour l'exécution de ces essais, les liants ont été réchauffés dans des conditions déterminées. Les schémas des figures 4.1 et 4.2 présentent toute l'histoire thermique et le conditionnement des échantillons pour respectivement les liants à la livraison et après vieillissement artificiel et pour les liants récupérés. Les résultats obtenus à partir des extractions sur les enrobés modifiés présentent une bonne logique, à l'exception des liants 5 et 6, dosés à raison de 5% de S.B.S. pour lesquels les résultats de la température anneau et bille restent inexpliqués que ce soit après vieillissement artificiel en laboratoire ou après extraction des enrobés prélevés in situ.

L'intégralité des résultats figure à l'annexe E. Les figures de l'annexe F indiquées ci-après présentent l'évolution des caractéristiques des 16 liants regroupés par famille (tableau 1.4) à savoir:

- bitumes classiques et avec addition d'asphalte naturel: liants 1 - 2 - 13 - 15 - 16 - figures F1 à F8
- avec addition de S.B.S.: 3 - 4 - 5 - 6 - 11 - figures F9 à F16
- avec addition de polyoléfine: - 10 - figures F17 à F24
- avec addition d'E.V.A.: 8 - 12 - figures F25 à F32
- avec addition d'E.P.D.M.: 9 - 14 - figures F33 à F40

Pour chaque famille, les figures présentent l'évolution du résultat de:
- la pénétration à 25 °C
- la température anneau et bille
- la température Fraass
- la viscosité dynamique à 130 °C
- la teneur en asphaltènes
- la contrainte au seuil en traction directe à +20 °C
- la contrainte à la rupture en traction directe à -10 °C
- le retour élastique à 25 °C
- la ductilité à 7 °C

Pour la viscosité, seul le résultat à 130 °C a été retenu compte tenu du caractère plus ou moins non newtonien de l'ensemble des liants.

4.1 Comparaison des résultats après vieillissement artificiel et au temps 0 après mise en oeuvre
Vergleich der Ergebnisse nach künstlicher Alterung und zum Zeitpunkt Null nach dem Belagseinbau

Deux vieillissements artificiels ont été testés dans cette étude, le vieillissement RTFOT selon l'ancienne norme suisse SN 671 752b de 1978 [Réf. 22], soit 85 minutes à 163 °C sur un échantillon de 35 g et le vieillissement selon la norme allemande DIN 52 016 [Réf. 23]: soit 150 minutes à 165 °C, sur un échantillon de 100 g. L'ensemble des essais a été effectué pour le premier mode; après le second, seules la pénétration à 25 °C et la température anneau et bille ont été déterminées (annexe E).

Tous les liants ont été prélevés lors du dépotement à l'aide d'une pièce d'interface munie d'un robinet, positionnée entre le camion et la citerne. Ils ont été conditionnés en bidons de 2 litres fermés

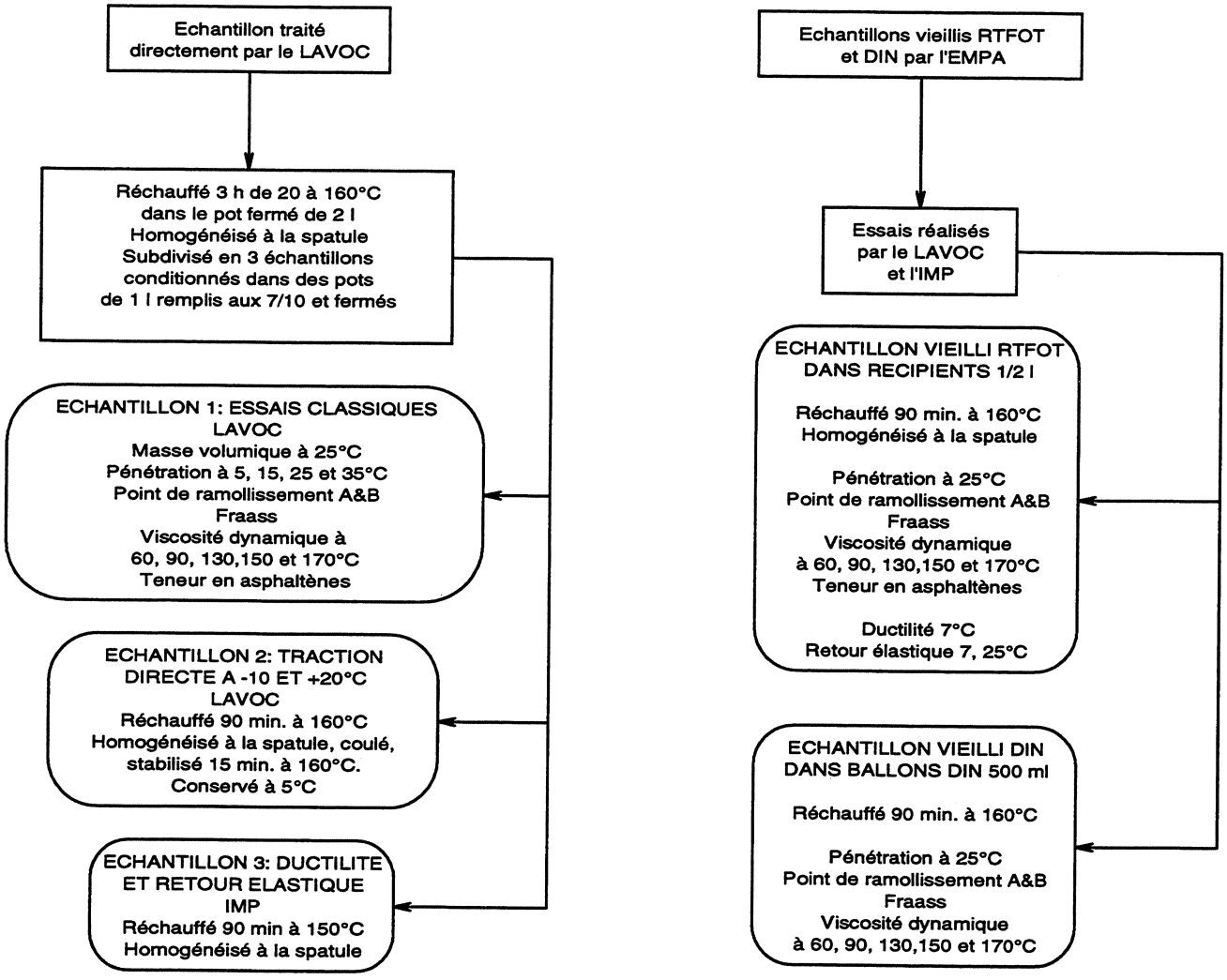


Figure 4.1: *Histoire thermique des liants testés en laboratoire à la livraison et après vieillissement artificiel*
Thermsche Beanspruchung der Bindemittel von der Probenahme bis zur Prüfung

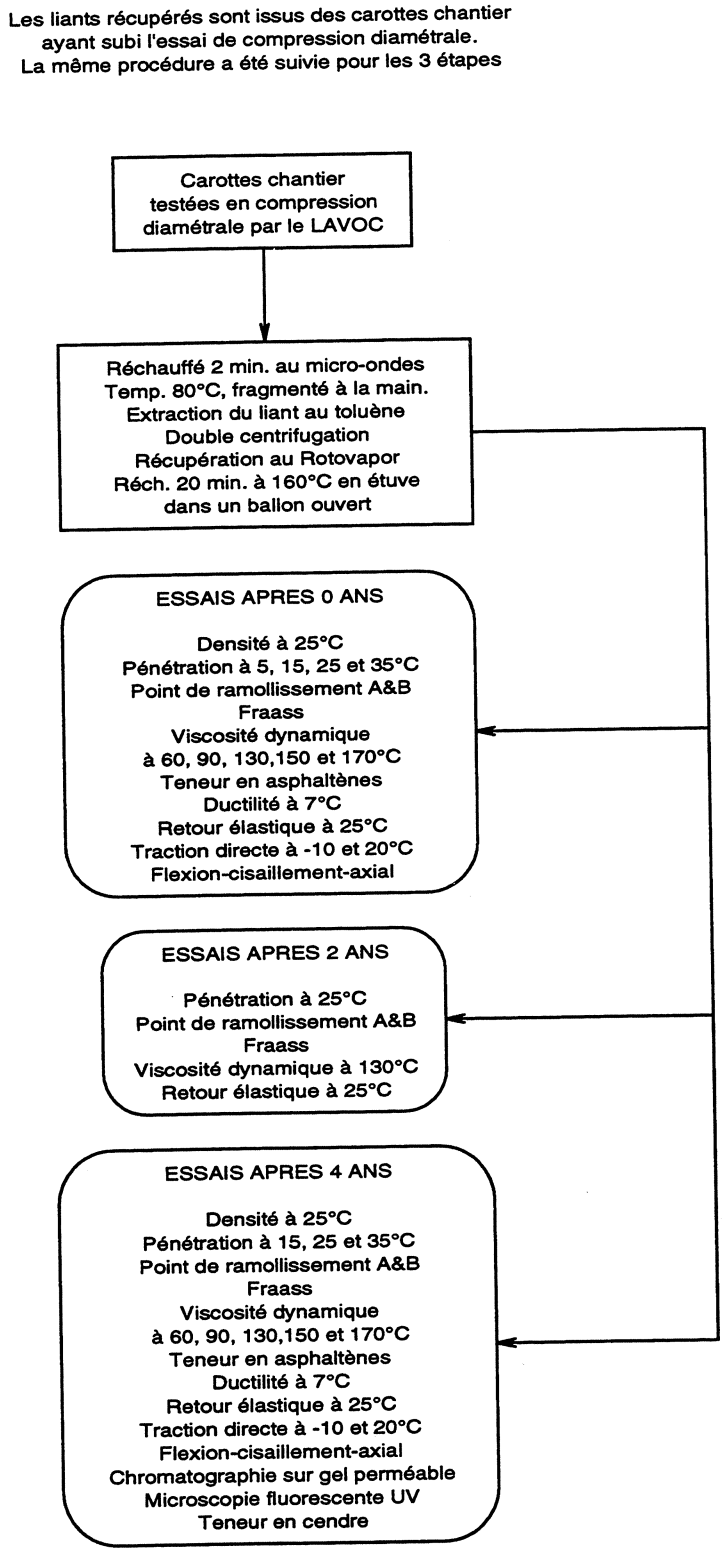


Figure 4.2: *Histoire thermique des liants extraits*
Thermische Banspruchung der rückgewonnenen Bindemittel vom Bohrhem bis zur Prüfung

Les résultats ne mettent pas en évidence de différence très significative entre les deux modes de vieillissement. Les résultats sont du même ordre de grandeur sans variation systématique: les coefficients de corrélation (r) sont donnés dans le tableau 4.1. Les droites de régression figurent dans l'annexe G. Elles mettent en évidence la bonne simulation de ces modes de vieillissement artificiel avec celui enregistré en centrale quel que soit le mode considéré; les coefficients de corrélation (r) sont compris entre 0,82 et 0,99. L'examen des droites de régression met en évidence une bonne concordance des valeurs absolues pour la pénétration à 25 °C, la teneur en asphaltènes, la contrainte au seuil de l'essai de traction à 20 °C, le retour élastique à 25°C et la ductilité à 7 °C entre vieillissement en centrale et vieillissement RTFOT, et pour l'anneau et bille entre vieillissement en centrale et vieillissement DIN.

Coefficient de corrélation	RTFOT temps 0	DIN temps 0	DIN RTFOT
Pénétration à 25 °C	0.90	0.88	0.95
Température Anneau et Bille	0.92	0.97	0.89
Contrainte au seuil en traction directe à 20 °C	0.93	0.89	0.98
Teneur en Asphaltènes	0.92	*	*
Viscosité à 130 °C	0.82	*	*
Retour élastique à 25 °C	0.99	*	*
Ductilité à 7 °C	0.97	*	*

* essais sur le vieillissement DIN non effectués

Tableau 4.1: Coefficients de corrélation (r) entre les méthodes RTFOT et DIN et les caractéristiques après mise en oeuvre: temps 0
Korrelationskoeffizienten (r) der Bindemitteleigenschaften im Vergleich:
Künstliche Alterung RTFOT - nach dem Einbau (rückgewonnen)
Künstliche Alterung DIN - nach Einbau (rückgewonnen)
Künstliche Alterung DIN - künstliche Alterung RTFOT

L'essai Fraass réalisé avec l'appareil automatique n'étant pas entièrement satisfaisant pour les liants modifiés, les résultats de cet essai n'ont pas été exploités. L'essai de traction directe à - 10 °C se révèle difficilement exploitable d'un point de vue numérique, de ce fait il n'a pu être interprété dans cette comparaison.

4.1.2 Comparaison des liants à la livraison et après vieillissement en centrale et in situ

Pour les liants à la livraison et récupérés après passage en centrale, l'examen des diagrammes d'Heukelom (figures H1 à H16 - annexe H) donne un aperçu immédiat de l'allure de la variation de la consistance en fonction de la température. Pour les bitumes classiques 1, 2, 15 et 16, on peut considérer que les deux segments de droite représentant d'une part les variations de pénétrabilité, anneau et bille, et d'autre part les viscosités, sont quasiment alignés. L'effet de vieillissement apparaît plus nettement pour le bitume 1.

Pour ce qui concerne les liants modifiés prêts à l'emploi, on constate un décrochement plus ou moins important au niveau de la température anneau et bille avec, pour la plupart d'entre eux, une légère incurvation de la variation des caractéristiques en fonction de la température, notamment pour les viscosités. Les liants 5 et 6 mettent en évidence un décrochement important lié à une température anneau et bille très élevée. Vis-à-vis du vieillissement, on a des évolutions comparables, à l'exception des liants 8 et 9 qui présentent un effet plus accentué.

L'examen des valeurs individuelles avant enrobage (annexe E) montre :

- une pénétrabilité à 25 °C plus importante pour les liants 3, 5 et 11, à base de 80/100 de distillation directe,
- une température anneau et bille très élevée pour les liants 5 et 6,
- un point de Fraass ≤ - 25 °C pour les liants 3, 6 et 14.

Ces deux dernières constatations ont pour conséquence des valeurs importantes pour l'intervalle de plasticité, notamment pour les liants 5 et 6. Les graphiques F1 à F40 figurant dans l'annexe F mettent en évidence les évolutions respectives des 16 liants en fonction du temps: de la livraison à 4 ans et cela pour chacune des familles de liants présentées précédemment. Leur examen montre que la phase de vieillissement la plus importante se situe au niveau de la centrale (0 an) ensuite l'évolution du vieillissement subit un changement de pente plus ou moins accentué selon les liants et les essais. Les résultats de l'essai Fraass effectué manuellement compte tenu des difficultés rencontrées avec l'appareillage automatique pour les liants modifiés présentent une évolution en fonction du temps inattendue. En effet, on constate soit un maintien de la valeur obtenue à la livraison, soit une évolution très faible voire un abaissement de cette valeur (annexe E) en particulier pour les bitumes polymères. De ce fait, l'essai n'a pas été exploité, ni l'intervalle de plasticité par voie de conséquence. Par ailleurs, les essais effectués à partir des résultats à 2 ans ne sont pas toujours cohérents. Cela est sans doute lié en partie au fait que les prélèvements ont été effectués dans la bande d'arrêt d'urgence (teneur en vides: 4.7%) alors que ceux correspondant à la mise en oeuvre et à 4 ans l'ont été en pleine voie (teneur en vides: 5.5%).

L'exploitation a donc été limitée aux essais de pénétration à 25 °C, de température anneau et bille, de viscosité à 130 °C, de teneur en asphaltènes, de traction directe à +20 °C et -10 °C, de ductilité à 7 °C et du retour élastique à 25 °C.

4.2 Essais de pénétration et de température anneau et bille
Penetration und Geweichungspunkt Ring und Kugel

Les figures 4.3, 4.4 et 4.5 présentent l'évolution de la pénétration à 25 °C, à l'échelle logarithmique en fonction de la température anneau et bille, pour les différentes familles de liants et cela pour les caractéristiques, à la livraison, à 0 après mise en oeuvre, 2 et 4 ans.

Les liants classiques (figure 4.3) qu'ils soient semi-soufflés (1 et 2) ou obtenus par distillation directe (15 et 16) sont très groupés, on observe une faible variation de la pénétration pour une température anneau et bille donnée. L'introduction d'asphalte naturel (13) ne modifie pas ce comportement.

La figure 4.4 présente les familles de liants avec S.B.S. et avec addition d'E.V.A. comparativement au bitume 1 pris comme témoin pour l'ensemble des liants modifiés. A l'exception du liant 12, extrait d'un enrobé avec ajout pulvérulent, les évolutions suivent des pentes peu différentes, mais couvrent un large domaine de températures anneau et bille: à température anneau et bille donnée, correspondent des différences de pénétrations importantes atteignant 30 dixièmes de millimètre. La famille avec ajout d'E.V.A. (liants 8 et 12) correspond aux valeurs de températures anneau et bille les plus élevées. Les liants avec S.B.S., exception faite des liants 5 et 6, sont relativement groupés. Pour tous ces liants modifiés, l'étendue des températures anneau et bille à l'état initial est de 12.5°C et passe après 4 ans à 19.5°C. Ce type de représentation met en évidence le comportement inexpliqué des liants 5 et 6 pour lesquels on observe une augmentation de la température anneau et bille en fonction du temps.

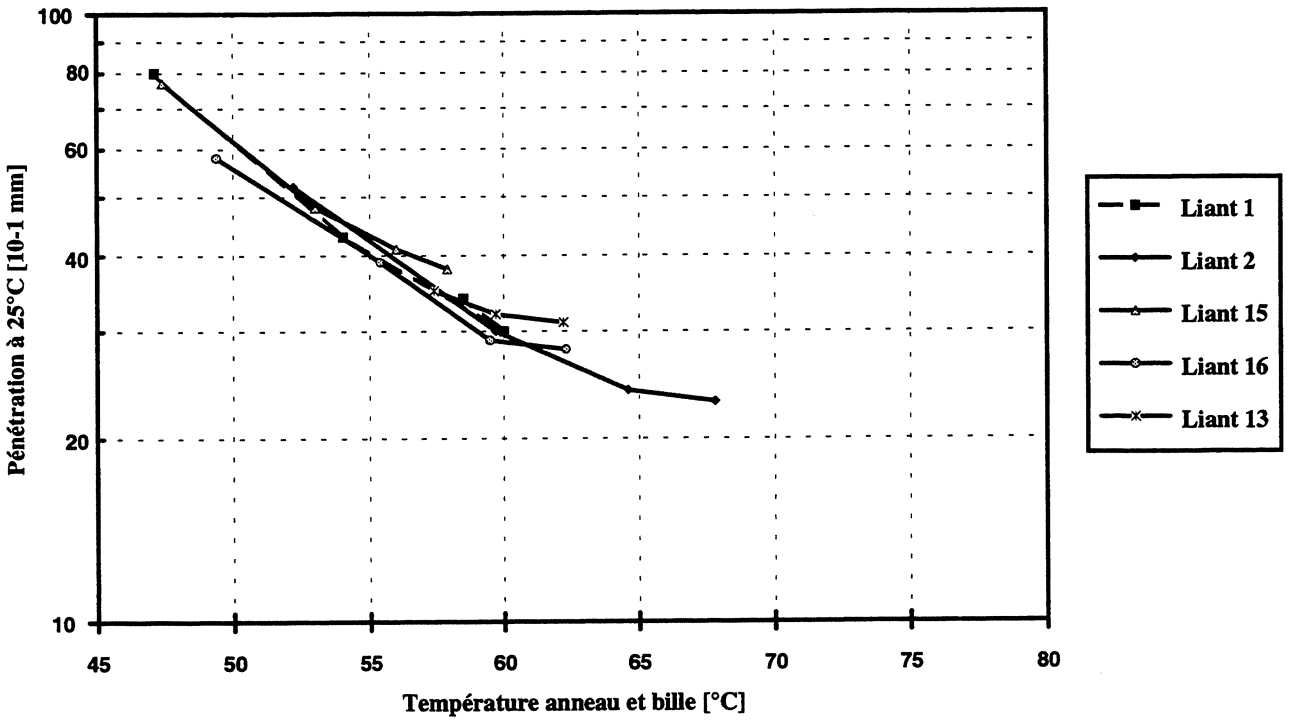


Figure 4.3: *Evolution de la pénétration à 25 °C et de la température anneau et bille en fonction du temps: liants classiques*
Veränderung der Penetration 25 °C und des Erweichungspunktes RuK in Abhängigkeit der Zeit (Anlieferungszustand; nach 0/2/4 Jahren)

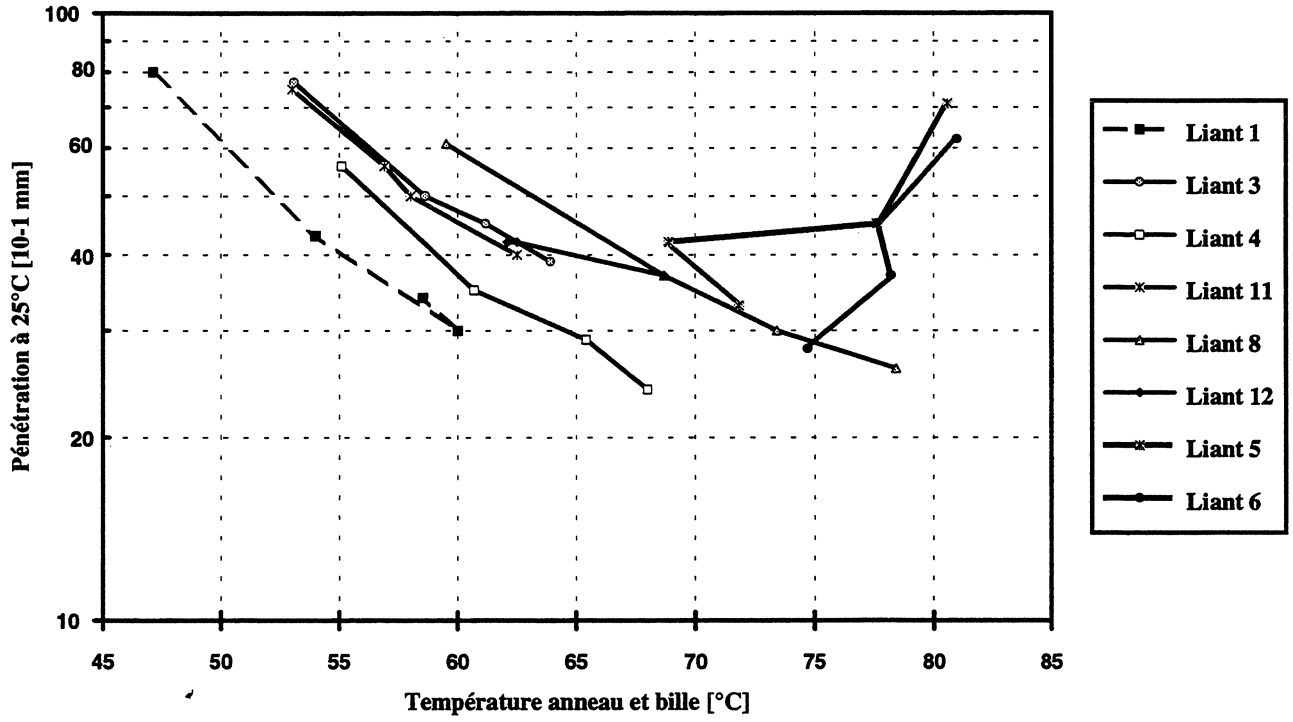


Figure 4.4: *Evolution de la pénétration à 25 °C et de la température anneau et bille en fonction du temps: liants modifiés avec SBS et EVA*
Veränderung der Penetration 25 °C und des Erweichungspunktes RuK in Abhängigkeit der Zeit (Anlieferungszustand; nach 0/2/4 Jahren)

La figure 4.5 offre la même présentation pour les familles de liant avec ajout de polyoléfines (7 et 10) et E.P.D.M. (9 et 14). Ces deux familles sont très voisines et présentent des évolutions assez comparables jusqu'à 2 ans. A 4 ans, le liant 7 et plus particulièrement le liant 9 présentent une évolution brutale de la température anneau et bille. L'étendue des valeurs de la température anneau et bille passe de 4.5 °C pour l'état initial à 10.5 °C à 4 ans. Par rapport au bitume témoin, les pentes d'évolution sont comparables avec des valeurs d'anneau et bille beaucoup plus élevées.

La susceptibilité thermique des liants modifiés apparaît donc très réduite par rapport à celle des bitumes classiques, tant à la livraison qu'après récupération après 4 ans de service.

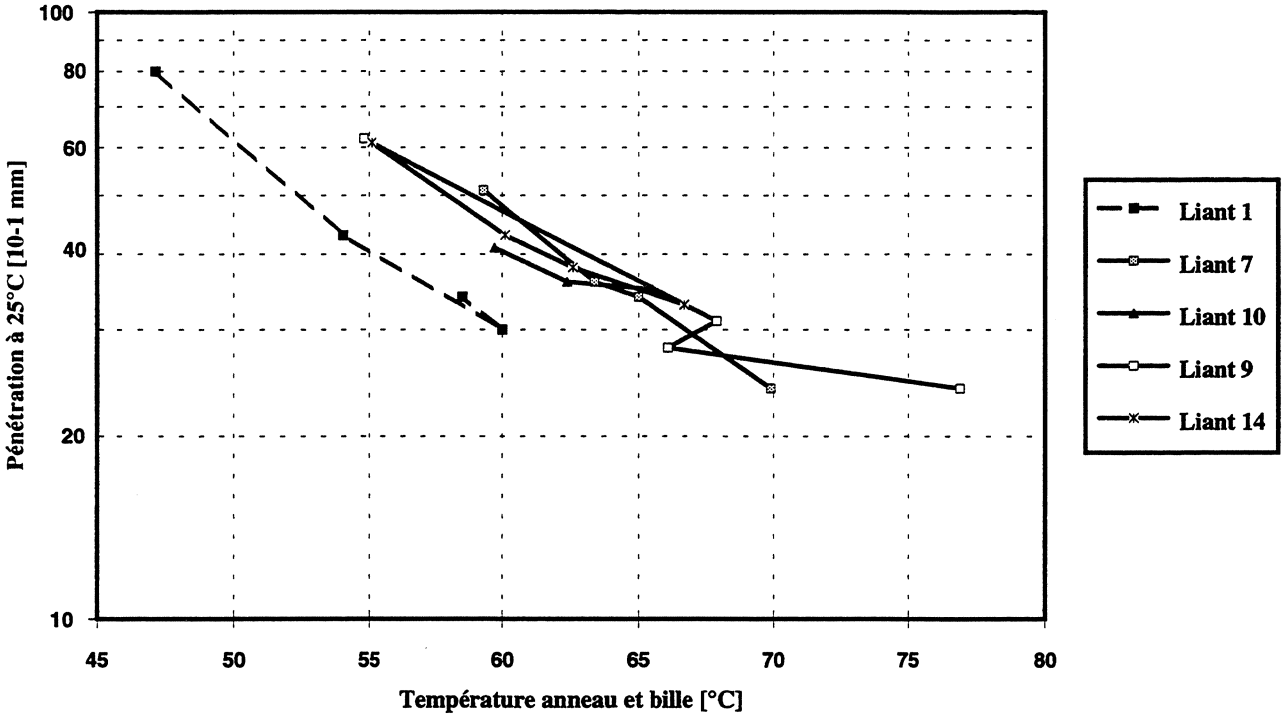


Figure 4.5: *Evolution de la pénétration à 25 °C et de la température anneau et bille en fonction du temps: liants modifiés avec polyoléfine et EPDM*
Veränderung der Penetration 25 °C und des Erweichungspunktes RuK in Abhängigkeit der Zeit (Anlieferungszustand; nach 0/2/4 Jahren)

4.3 Viscosité dynamique à 130 °C
Dynamische Viskosität bei 130 °C

Les valeurs de la viscosité à 130 °C font l'objet de la figure 4.6 sur laquelle un diagramme barre représente les valeurs du liant à la livraison, sauf pour le cas des ajouts pulvérulents, et après 2 et 4 ans.

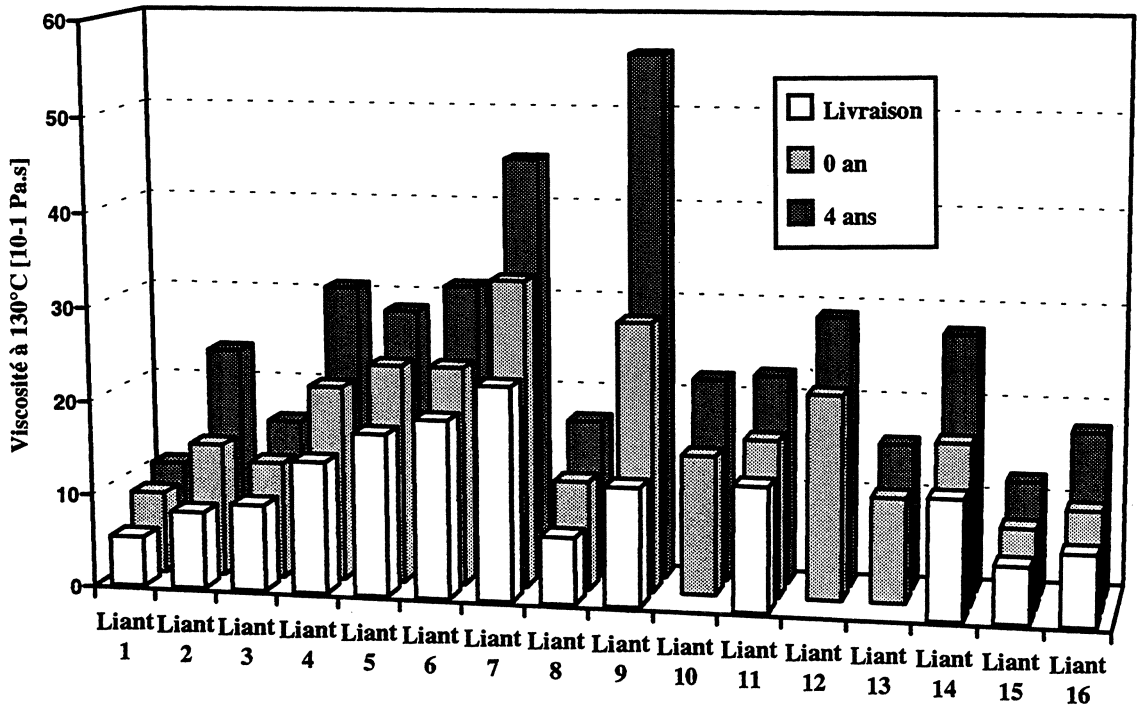


Figure 4.6: *Comparaison de la viscosité à 130 °C entre la livraison 2 et 4 ans*
Vergleich der dynamischen Viskosität (130 °C) (im Anlieferungszustand und nach 2 bzw 4 Jahren)

A l'état initial, la viscosité à 130 °C varie dans une plage couvrant environ 22x10 Pa.s. Après 4 ans, cette plage s'élargit à environ $55x10^1$ Pa.s, avec des variations aléatoires en fonction des liants: l'évolution la plus importante étant enregistrée pour le liant 9.

4.4 Teneur en asphaltènes
Asphalte Gehalt

La figure 4.7 présente également sous forme de diagramme barre l'évolution des teneurs en asphaltènes à la livraison, après passage en centrale et 4 ans après mise sous circulation.

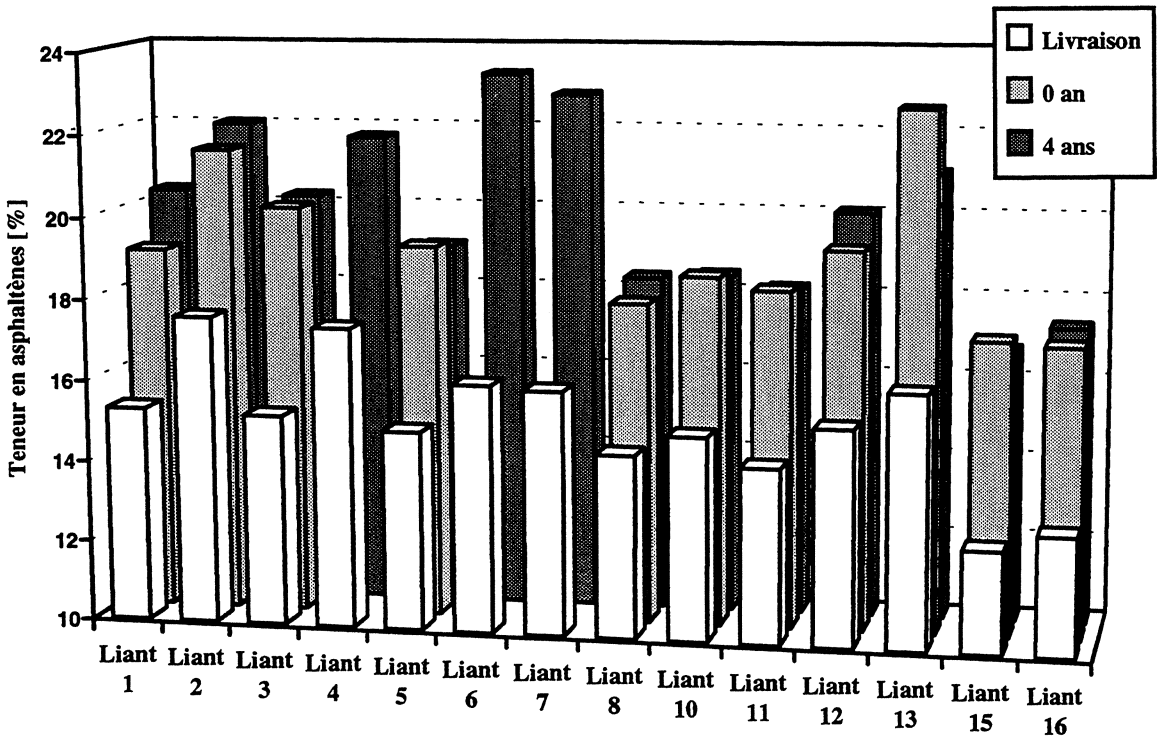


Figure 4.7: *Evolution de la teneur en asphaltènes*
Vergleich des Asphalten-Gehaltes (im Anlieferungszustand und nach 2 bzw 4 Jahren)

On constate que l'évolution majeure se situe après passage en centrale; cette évolution est ensuite très ralentie, les valeurs à 4 ans étant très peu différentes de celles au temps 0 pour les liants examinés. Il faut noter l'impossibilité d'exécution de l'essai avec le liant 9 pour toutes les étapes et pour les liants 6 et 7 au temps 0 du fait de leur très forte viscosité.

Le principe de l'essai est donné dans l'annexe J.

4.5 Traction directe à +20 °C
Zugversuch bei 20 °C

A la température de +20 °C, tous les essais de traction directe ont été réalisés au LAVOC, à la vitesse de 500 mm/min. Le déplacement des plateaux de la presse est limité à 300 mm, correspondant à un allongement maximal de 600%. Pour certains liants, cette déformation n'est pas suffisante pour qu'il y ait rupture. Une étude qualitative visant à distinguer les liants selon la forme de leur courbe a été réalisée.

On observe essentiellement trois types de courbe:

- *a*. Rupture en pente douce
- *b*. Rupture avec un point d'inflexion
- *c*. Pas encore de rupture avec présence d'un minimum

L' allure de ces courbes types à 20 °C est illustrée par la figure 4.8

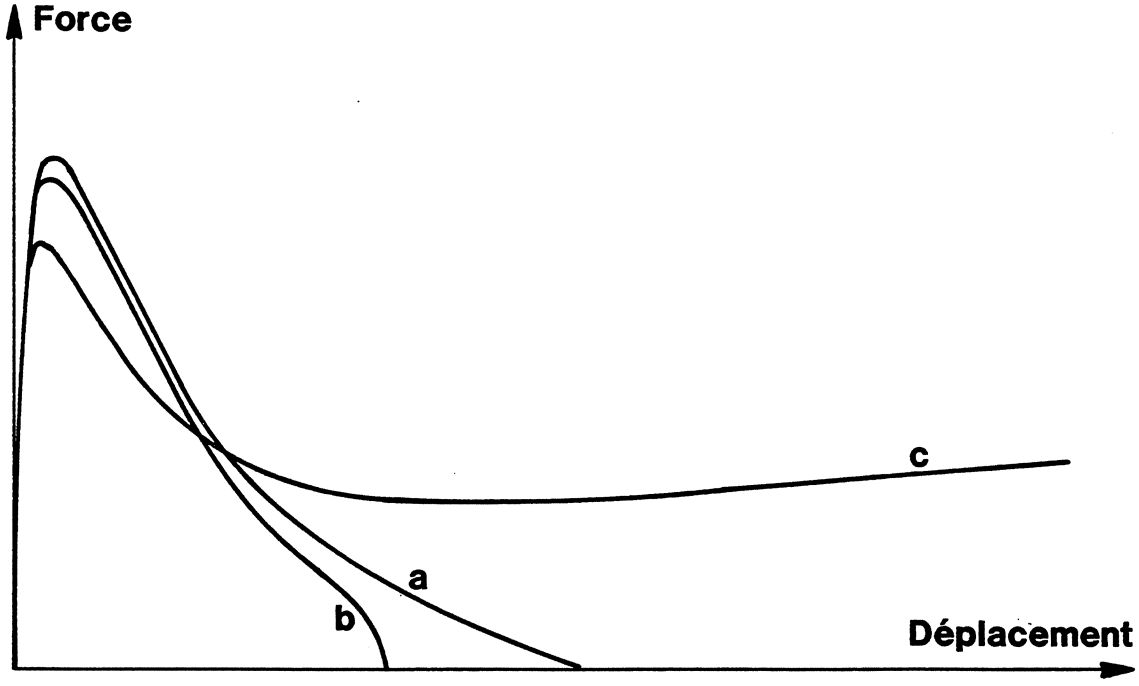


Figure 4.8: *Courbes types rencontrées lors de l'essai de traction directe à +20 °C*
Typisch Kraft- Weg- Kurven beim direkten Zugversuch (+20 °C)

La courbe *a* correspond à un comportement purement visqueux. Après le seuil, le liant n'est plus capable d'emmagasiner de l'énergie, elle est entièrement dissipée dans la déformation de l'éprouvette. Il y a relaxation totale de la contrainte appliquée, si bien que la contrainte à la rupture est nulle. Phénoménologiquement, il n'y a pas de striction, l'éprouvette se déforme uniformément jusqu'à ne plus former qu'un fil qui se rompt avec une contrainte de rupture nulle.

L'exemple *b* est dans sa première partie identique au cas *a*. Le point d'inflexion correspond a l'apparition d'une striction. La déformation se localise et précipite le processus de rupture. Il arrive que la contrainte de rupture ne soit pas nulle.

L'effet de plateau illustré par la courbe *c* est dû au caractère caoutchouté du polybutadiène du SBS. Le système est une matrice viscoélastique (bitume) dans laquelle est enchevêtré un réseau de polybutadiène fixé par des agrégats de polystyrène. Ce sont les chaînes de polybutadiène qui emmagasinent l'énergie de la déformation et donnent au liant sa résistance.

Le tableau 4.2 synthétise l'évolution phénoménologique à +20 °C.

Groupe	N° du liant	Type de courbe		
		Livraison	0 an	4 ans
Liants classiques	1	*a*	*a/b*	*a/b*
	2	*a*	*a/b*	*a/b*
	15	*a*	*a*	*a*
	16	*a*	*a*	*a*
	13	*)	*a/b*	*a/b*
Liants modifiés par SBS	3	*c*	*c*	*c*
	4	*c*	*c*	*c*
	5	*c*	*c*	*c*
	6	*c*	*c*	*c*
	11	*c*	*c*	*f*
Liants mixtes avec EVA	8	*a/b*	*a/b*	*b*
	12	*)	*a*	*a/b*
Liants avec polyoléfine	7	*a*	*a*	*a*
	10	*)	*b*	*b*
Liants modifiés par EPDM	9	*a/b*	*b*	*b*
	14	*a*	*a/b*	*d/e*

*) Pas testé, ajout pulvérulent

Tableau 4.2 : Evolution des types de courbes lors de l'essai de traction directe à 20 °C, au cours du temps
Änderung des Kurventyps beim direkten Zugversuch (+20 °C) im Verlauf der Zeit (Anlieferung/rückgewonnen nach 2 und 4 Jahren)

- Liants classiques:

A la livraison, le comportement des quatre bitumes classiques 1, 2, 15 et 16 correspond à celui de l'exemple *a* du graphique 4.6. Pour chacun de ces liants, certaines éprouvettes se sont rompues dans le domaine mesuré et d'autres non. De manière générale il y a une grande dispersion de l'allongement à la rupture.
Après récupération à 0 an, le comportement des liants semi-soufflés 1, 2 et 13 est mixte *a* et *b*. Cela signifie que certaines des cinq éprouvettes testées par liant se sont déformées en suivant une courbe de type *a* et d'autres en suivant le type *b*. Pour toutes les éprouvettes, la rupture a eu lieu dans le domaine mesuré (avant un allongement de 600%). Les liants provenant d'une distillation directe (15 et 16) ont gardé le même comportement qu'à la livraison. Il n'y a pas d'évolution notable du comportement phénoménologique des liants entre 0 et 4 ans, si ce n'est que la contrainte à la rupture du liant 13 n'est pas nulle à 4 ans.

- Liants modifiés par SBS:

Les liants modifiés uniquement par SBS (3, 4, 5, 6 et 11) sont les seuls liants présentant un type de courbe suivant l'exemple *c* de la figure 4.6. Ils ne se sont jamais rompus dans le domaine mesuré. Aucune évolution phénoménologique n'est observée au cours des étapes.

- Liants mixtes avec EVA:

Le liant 8 n'évolue pas entre la livraison et la récupération à 0 an. Son comportement est mixte entre *a* et *b*. A 4 ans toutes les éprouvettes ont un comportement de type *b*. Pour les trois étapes, la rupture est observée pour toutes les éprouvettes.
Le liant 12, non testé à la livraison, évolue fortement de 0 à 4 ans. A 0 an la courbe est de type *a* sans rupture dans la partie mesurée, et à 4 ans il a un comportement mixte *a* et *b*. A 4 ans certaines éprouvettes du type *b* ont une contrainte à la rupture non nulle.

- Liants avec polyoléfine:

Le liant 7 a un comportement identique pour les trois étapes. L'allure de la courbe diffère de celle des autres liants. La courbe est phénoménologiquement de type *a* mais la pente après le seuil est extrêmement faible. Après 300 mm, la contrainte est encore la moitié de celle du seuil. C'est le seul liant ayant ce comportement.
Le liant 10 a un comportement de type *b* à 0 an qu'il conserve à 4 ans. Pour cette dernière étape certaines des éprouvettes ont une contrainte à la rupture non nulle.

- Liants modifiés par EPDM:

Le liant 9 a un comportement mixte *a* et *b* à la livraison alors qu'après récupération à 0 an il a un comportement de type *b* avec une rupture juste après le point d'inflexion. Pour ce liant, la contrainte à la rupture est importante. Ce même comportement est observé après 4 ans.
Le liant 14 a un comportement de type *a* à la livraison sans rupture dans le domaine mesuré. Après récupération à 0 an l'allure des courbes est mixte *a* et *b*. Les éprouvettes ayant un comportement de type *a* ne se sont pas rompues dans les 300 mm de la mesure. Après récupération à 4 ans, les courbes restent mixtes *a* et *b*, mais toutes les éprouvettes se sont rompues dans la partie mesurée.

L'étude quantitative a montré de manière générale une augmentation de la contrainte au seuil de la livraison à 0 an et de 0 an à 4 ans. La figure 4.9 permet de visualiser cette augmentation. Par contre, l'allongement au seuil reste relativement stable.

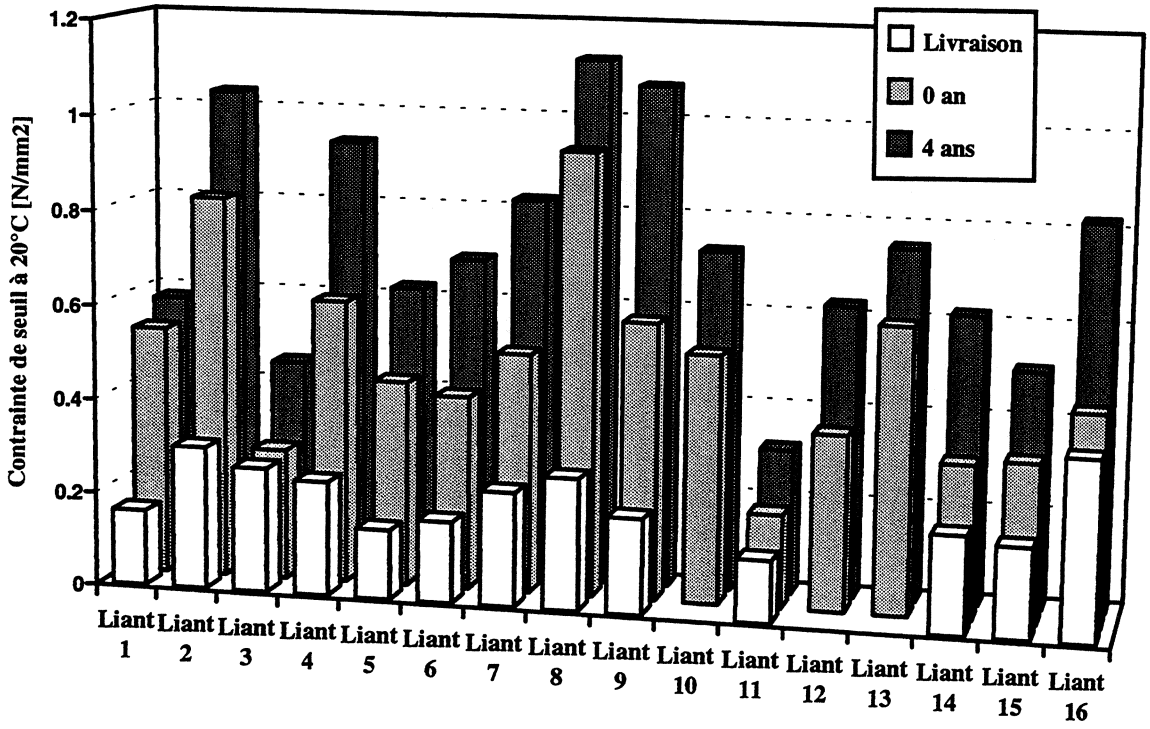


Figure 4.9: *Evolution de la contrainte au seuil de l'essai de traction directe à +20 °C*
Zugspannung beim direkten Zugversuch (+20 °C); Bindemittel im Anlieferungszustand und rückgewonnen nach 2 und 4 Jahren

4.6 Traction directe à -10 °C
Zugversuch bei -10 °C

Les essais de traction directe à -10 °C avant enrobage sur les liants 4, 6, 8, 11 et 14 ainsi que ceux après récupération à 0 an sur les liants 6, 8, 11 et 14 ont été réalisés au LCPC. Ces valeurs sont reportées à l'annexe E, mais en l'absence de l'enregistrement des courbes, elles n'ont pas été exploitées dans l'interprétation des résultats. A la température de -10 °C tous les essais réalisés au LAVOC l'ont été avec la vitesse la plus faible, soit 10 mm/min. Toutes les éprouvettes se sont rompues dans le domaine mesuré et avant l'apparition du seuil à l'exception des liants 5 et 9 à la livraison.

Lors de l'essai de traction directe à -10 °C, la contrainte à la rupture enregistrée dépend fortement des défauts ponctuels pouvant exister dans l'éprouvette. La dispersion des résultats obtenus sur la contrainte à la rupture est importante. Néanmoins plusieurs tendances peuvent être dégagées. Avant de rentrer dans une analyse quantitative des valeurs à la rupture à -10 °C, comme pour l'essai de traction directe à 20 °C une étude qualitative a été effectuée.

Les liants ont été classés selon le genre de rupture:

- *d.* Rupture avant le seuil et dans la partie pseudo-linéaire (rupture fragile)
- *e.* Rupture avant le seuil et après la partie pseudo-linéaire (rupture semi-fragile)
- *f.* Rupture après le seuil (rupture ductile)

La figure 4.10 visualise ces trois types de courbe à la température de -10 °C.

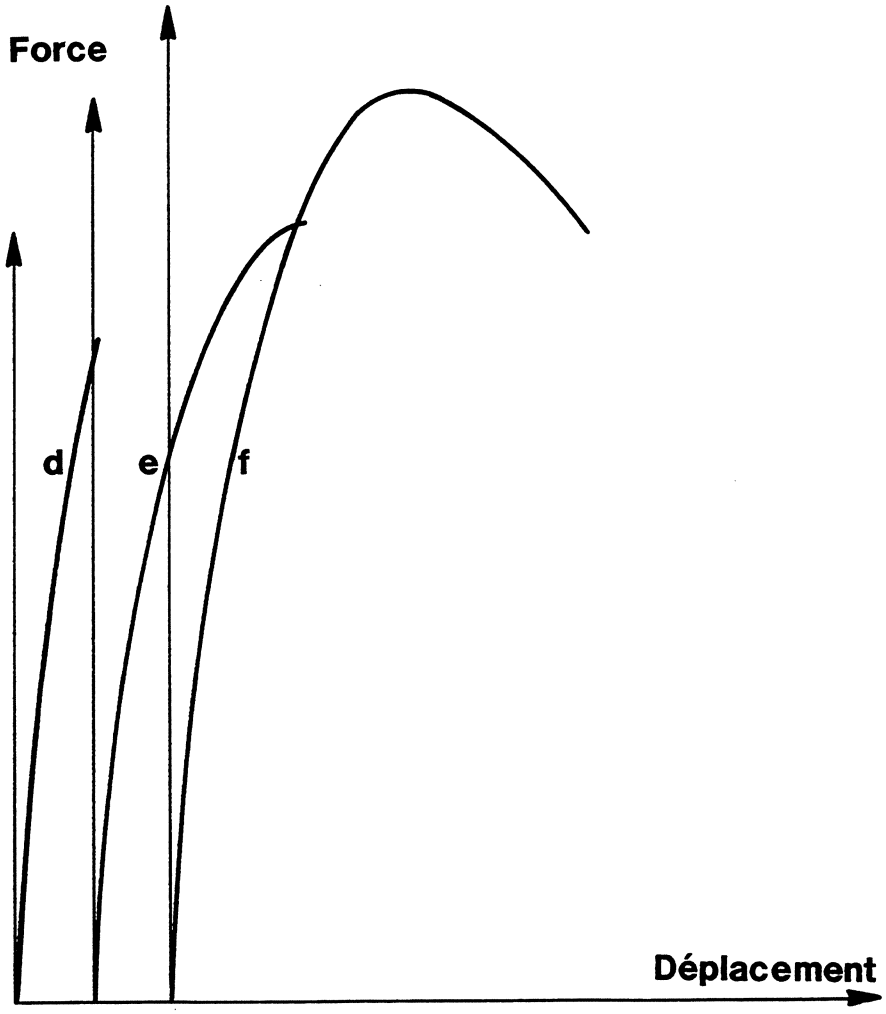


Figure 4.10: *Courbes types rencontrées lors de l'essai de traction directe à -10 °C*
Typische Kraft-Weg-Kurven beim direkten Zugversuch (-10 °C)

Cette classification permet d'apprécier l'évolution du comportement à la traction directe des liants testés au LAVOC.

Le tableau 4.3 présente l'évolution phénoménologique des liants à -10 °C.

Groupe	N° du liant	Type de courbe		
		Livraison	0 an	4 ans
Liants classiques	1, 2, 15, 16 et 13	Essais pas réalisés		
Liants modifiés par SBS	3	*d*	*d*	*e*
	4	**)	*d*	*d*
	5	*f*	*e*	*d*
	6	**)	**)	*e*
	11	**)	**)	*d*
Liants mixtes avec EVA	8	**)	**)	*d*
	12	*)	*d*	*d*
Liants avec polyoléfine	7	*d*	*d*	*d*
	10	*)	*d*	*d*
Liants modifiés par EPDM	9	*f*	*d*	*d*
	14	**)	**)	*a*

*) Pas testé, ajout pulvérulent
**) Essai réalisé au LCPC

Tableau 4.3: Evolution des types de courbes lors de l'essai de traction directe à -10 °C, au cours du temps
Änderung des Kurventyps beim direkten Zugversuch (-10 °C) im Verlauf der Zeit (Anlieferung und rückgewonnen nach 2 und 4 Jahren)

De manière générale, peu d'évolution a été observée. La plupart des liants présente des ruptures fragiles de type *d*. Les seules évolutions significatives sont enregistrées sur les liants 3, 5 et 9. Le liant 3 se ductilise légèrement, la courbe est de type *d* à la livraison et après récupération à 0 an alors qu'elle est de type *e* après récupération à 4 ans. Par contre, les liants 5 et 9 se fragilisent, en effet la courbe du liant 5 est de type *f* à la livraison, *e* au temps 0 et *d* à 4 ans et celle du liant 9 est de type *f* à la livraison alors qu'elle est de type *d* à 0 et 4 ans.

L'étude quantitative montre une augmentation, sauf pour les liants 10 et 12, de la contrainte à la rupture au fil des étapes, comme l'indique la figure 4.11

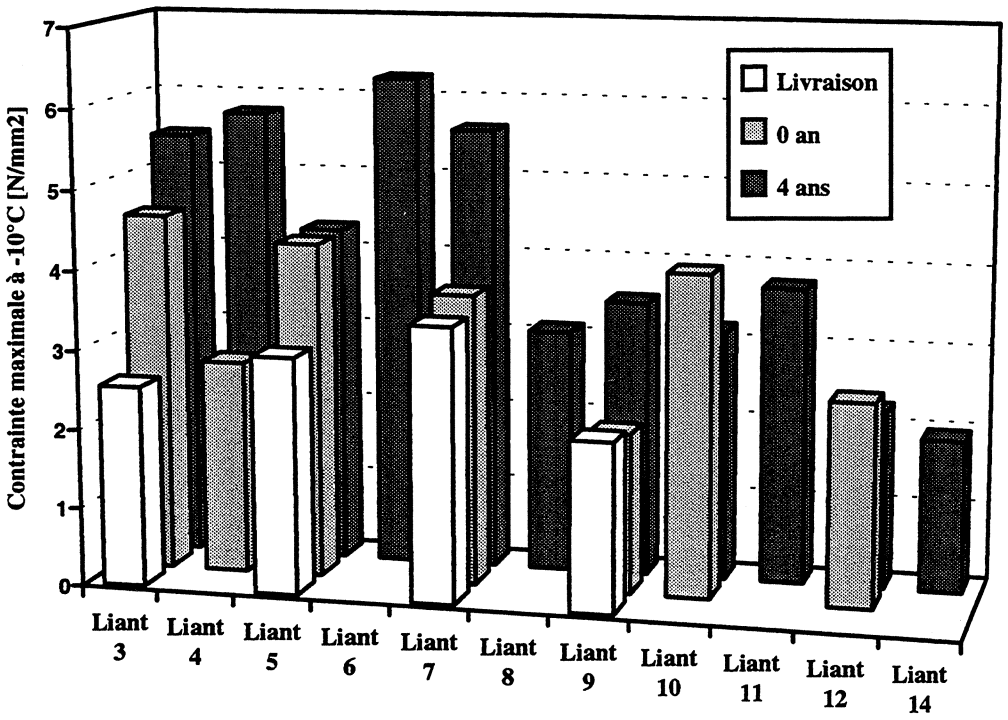


Figure 4.11: *Evolution de la contrainte maximale de l'essai de traction directe à -10 °C*
Zugspannung beim direkten Zugversuch (-10 °C); Bindemittel im Anlieferungszustand und rückgewonnen nach 2 und 4 Jahren

L'évolution de l'allongement à la rupture suit relativement bien celle de la contrainte. Le module sécant à la rupture ($\sigma_{rupt}/\epsilon_{rupt}$) a également été calculé pour les liants dont la rupture était de type fragile. Cette valeur est proche de 200 N/mm^2 pour l'ensemble de ces liants.

4.7 Retour élastique à 25 °C
Elastische Rückstellung bei 25 °C

La figure 4.12 illustre l'évolution du retour élastique à 25 °C de la livraison à 0 et 4 ans.

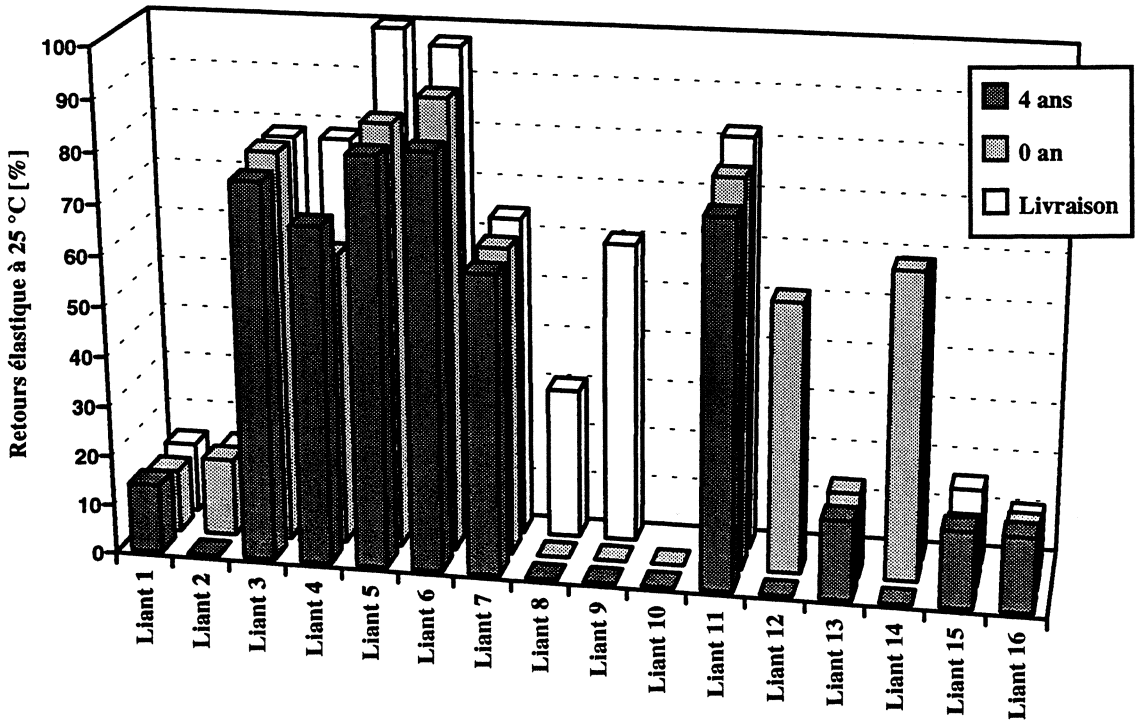


Figure 4.12: *Evolution du retour élastique à 25 °C*
Elastische Rückstellung (25 °C); Bindemittel im Anlieferungszustand, rückgewonnen nach 2 und 4 Jahren

Cette représentation met en évidence l'effet de l'adjonction de polymères dans les liants. Les cinq bitumes classiques 1, 2, 13, 15 et 16 ont, pour toutes les étapes, un retour élastique inférieur à 17% alors que tous les liants modifiés par l'adjonction de polymères, ayant pu être testés ont un retour élastique supérieur à 30%.

Pour quatre des bitumes classiques ainsi que pour les liants modifiés par SBS (liants 3, 4, 5, 6 et 11) cette caractéristique n'évolue que peu au cours des étapes. Par contre une évolution très significative est observée pour le bitume classique 2 ainsi que pour les liants modifiés par EVA (liants 8 et 12) et EPDM (liants 9 et 14). Ces cinq liants ont pu être testés à la livraison alors que le fil de liant s'est rompu en cours d'essai après récupération à 0 et 4 ans pour les liants 8 et 9, et après récupération à 4 ans pour les liants 2, 12 et 14. Le liant 10 n'a jamais pu être testé, le fil de liant s'est rompu dès la livraison.

4.8 Ductilité à 7 °C
Duktilität bei 7 °C

Les résultats de la ductilité à 7 °C sont reportés dans la figure 4.13

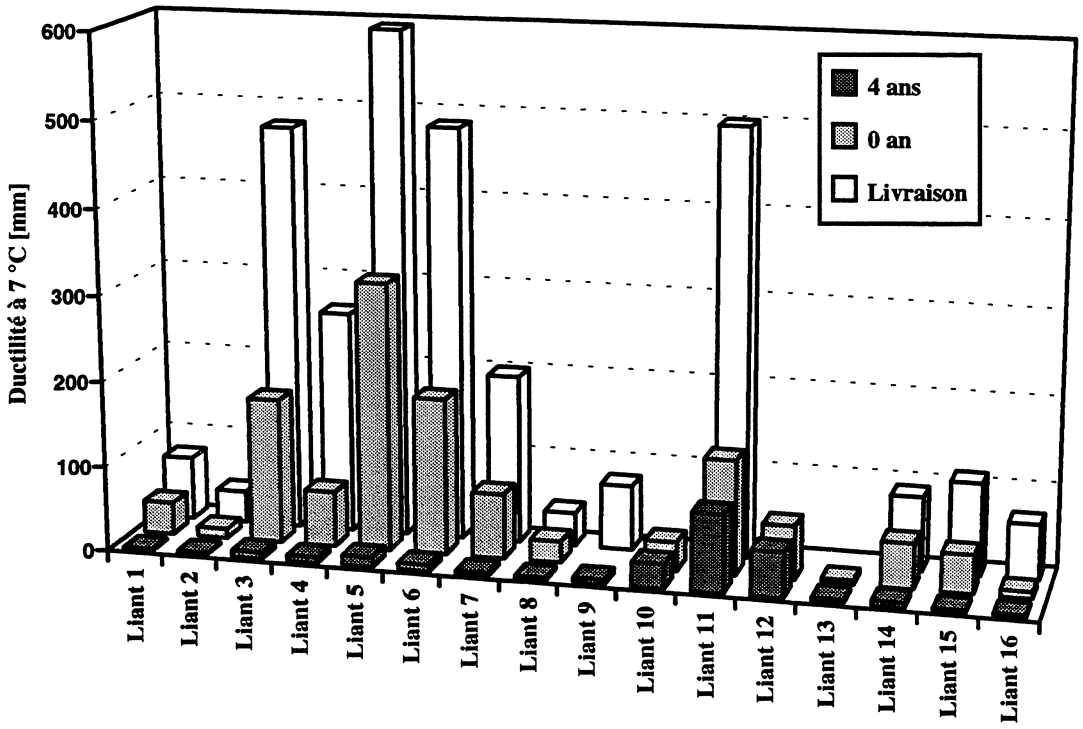


Figure 4.13: *Evolution de la ductilité à 7 °C*
Duktilität bei 7 °C; Bindemittel im Anlieferungszustand, rückgewonnen nach 2 und 4 Jahren

La ductilité à 7 °C évolue grandement au cours des étapes. A la livraison elle est comprise entre 592 et 37 mm alors qu'à 4 ans tous les liants, à l'exception des liants 10, 11 et 12, ont une ductilité inférieure à 8 mm.

A la livraison, seuls les liants modifiés par SBS (3, 4, 5, 6 et 11) ainsi que le liant avec polyoléfine (7) ont une ductilité supérieure à 197 mm. Tous les autre liants modifiés ont une ductilité comparable à celle des bitumes classiques. Après récupération à 0 an cette même classification est observée.

5. COMPARAISON DES RESULTATS DE LABORATOIRE AVEC LES CONSTATATIONS IN SITU A 4 ANS
ZUSAMMENFASSUNG: VERGLEICH DER LABORUNTERSUCHUNGEN MIT DER VISUELLEN ZUSTANDSERFASSUNG NACH 4 JAHREN

La comparaison entre les résultats précédents et le comportement in situ prend en compte l'indice I_1 de dégradation apparente de la chaussée, défini au chapitre 3, relatif aux mesures et relevés effectués in situ. Cet indice concerne les dégradations de surface, à savoir le degré de polissage, les pertes de matériaux et la fissuration, avec pour chacune d'entre elles la prise en compte de leur étendue et de leur gravité selon l'échelle définie par la norme SN 640 925 [Réf. 20]. Cet indice peut varier de 0 à 5; les valeurs 0 à 1 correspondent à un niveau de qualité qualifié de "mauvais", les valeurs 4 à 5 à un niveau de qualité qualifié de "bon".

5.1 Comparaison des taux d'évolution des caractéristiques mesurées en laboratoire avec les dégradations in situ
Zusammenfassung: Vergleich der Veränderung der Bindemitteleigenschaften mit dem Zuständindex

Cette comparaison a été effectuée à partir des quatre caractéristiques des liants qui nous ont paru les plus significatives vis-à-vis de l'appréciation du vieillissement, à savoir l'évolution de la pénétration à 25 °C, l'évolution de la température anneau et bille, de la viscosité à 130 °C et celle de la contrainte au seuil en traction directe à +20 °C. Le vieillissement pris en compte dans l'interprétation est le vieillissement global entre le livraison et après extraction à 4 ans. Le tableau 5.2 présente les taux d'évaluation de ces caractéristiques.

Les figures 5.1, 5.2, 5.3 et 5.4 présentent l'évolution de ces quatre caractéristiques par ordre croissant pour l'ensemble des liants, à l'exception de ceux où le polymère a été introduit sous forme pulvérulente, et des liants 5 et 6 pour la température anneau et bille. La variation de l'indice de dégradation apparente a été superposée pour faciliter la comparaison. L'examen de ces quatre figures fait apparaître les tendances suivantes:

- Le taux d'évolution globale de la pénétration à 25 °C (figure 5.1) (tableau 5.2) varie assez fortement selon les liants entre 46% et 57,5%, pour des valeurs absolues comprises entre 52 et 80 dixièmes de millimètre à l'état neuf et entre 23 et 40 à 4 ans. L'étendue des valeurs a donc chuté en moyenne de 50%. La comparaison du classement par ordre croissant de la pénétration résiduelle avec l'indice I_1 montre que les enrobés les plus fissurés, planches 8 et 9, correspondent à des liants ayant des taux d'évolution les plus élevés. Pour les planches 7, 6 et 11 ne présentant aucun dommage, la relation est moins évidente, sauf avec le liant 11 qui conduit à un taux d'évolution faible.

- Si l'on fait abstraction des liants 5 et 6 qui présentent des évolutions négatives, le taux d'évolution globale de la température anneau et bille entre l'état à la livraison et 4 ans (tableau 5.2) varie entre 17,5% et 40%. De la comparaison du classement croissant de cette variation avec l'indice I_1 (figure 5.2), il ressort une bonne concordance entre l'état fissuré et le taux élevé de l'évolution de la température anneau et bille des liants 8 et 9, pour lesquels l'indice I_1 est nettement plus faible que pour le reste de la population. Les valeurs absolues sont les plus élevées de l'ensemble: 78,5 et 77 °C respectivement. A l'inverse, les liants 7 et 11 correspondant à un indice élevé et à une fissuration nulle, présentent les taux d'évolution les plus faibles pour des valeurs absolues de 70 et 62,5 °C, situées au voisinage de la moyenne de la population.

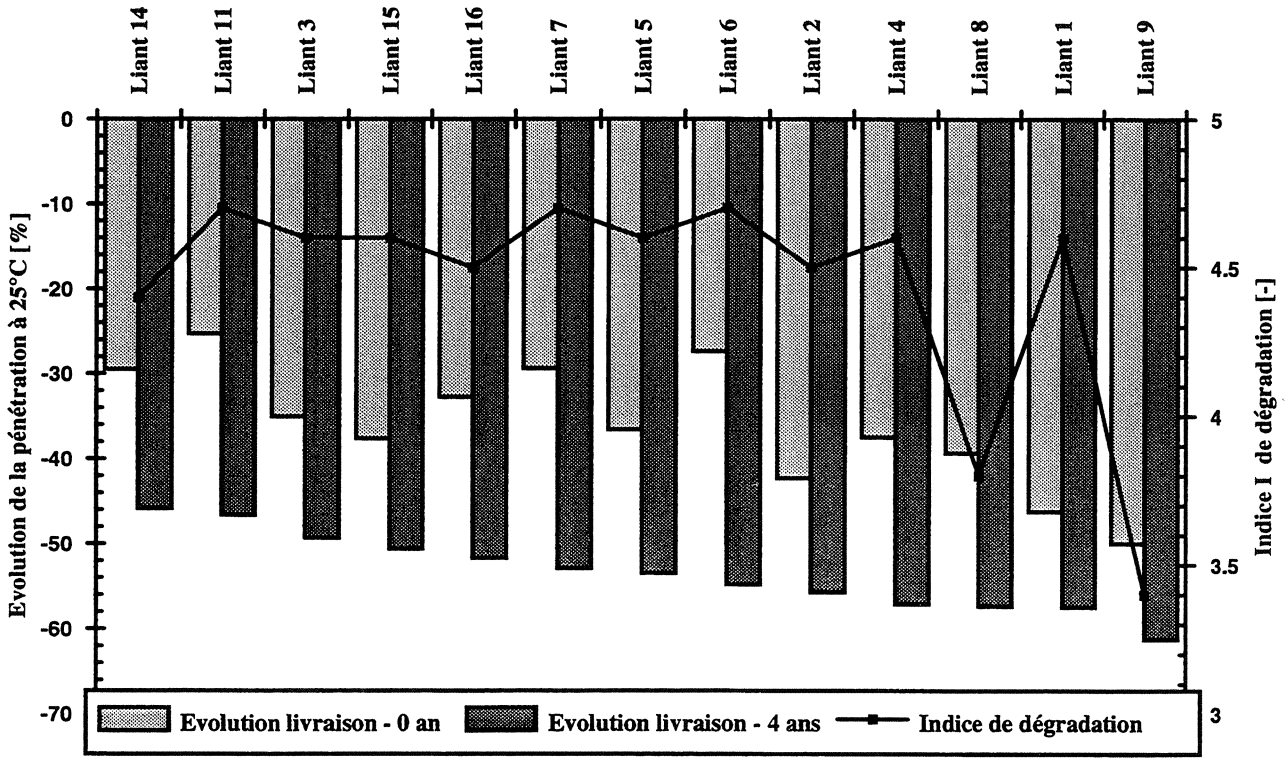


Figure 5.1: *Evolution en % de la pénétration à 25 °C de la livraison à 0 ans ainsi que de la livraison à 4 ans, comparativement à l'endommagement de surface à 4 ans*
Penetration im rückgewonnenen Bindemittel nach 0 und 4 Jahren in % der Penetration im Anlieferungszustand; Vergleich zum Zustandsindex nach 4 Jahren

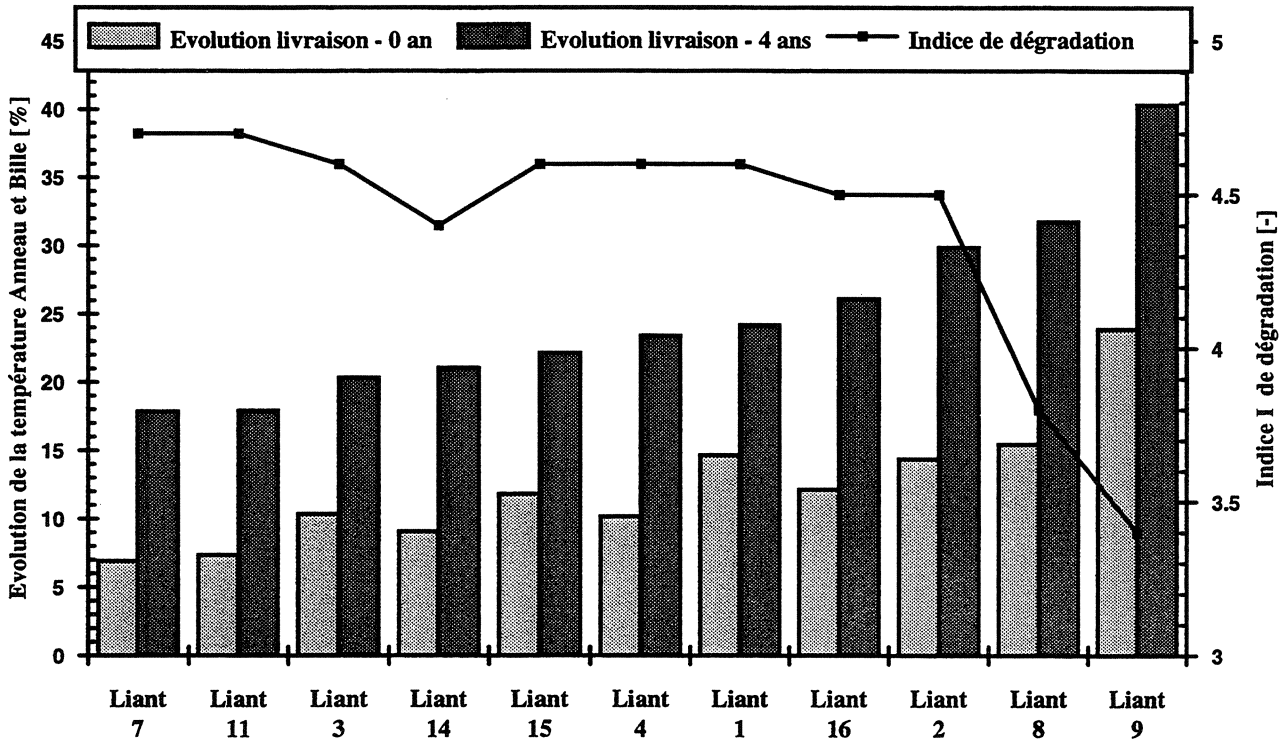


Figure 5.2: *Evolution en % de la température anneau et bille entre la livraison et 0 an ainsi que de la livraison à 4 ans, comparativement à l'endommagement de surface à 4 ans*
Erweichungspunkt RuK am rückgewonnenen Bindemittel nach 0 und 4 Jahren in % des EP RuK im Anlieferungszustand; Vergleich zum Zustandsindex

- Le taux de l'évolution globale de la viscosité à 130 °C (tableau 5.2) varie entre 69 et 344 % pour l'ensemble des liants, donc dans un rapport de 5, ce qui est considérable. La comparaison des taux d'évolution croissants avec l'indice I_1 (figure 5.3) fait apparaître une bonne concordance pour les liants 8 et 9. Les liants 6, 11 et 7 se situent dans la zone d'évolution de la viscosité la plus basse avec des valeurs absolues de viscosité à 4 ans, de respectivement 31, 22 et 45 10^{-1} Pa.s. Pour les autres liants, il existe une tendance de convergence bien que l'indice I_1 varie dans une plage très étroite.

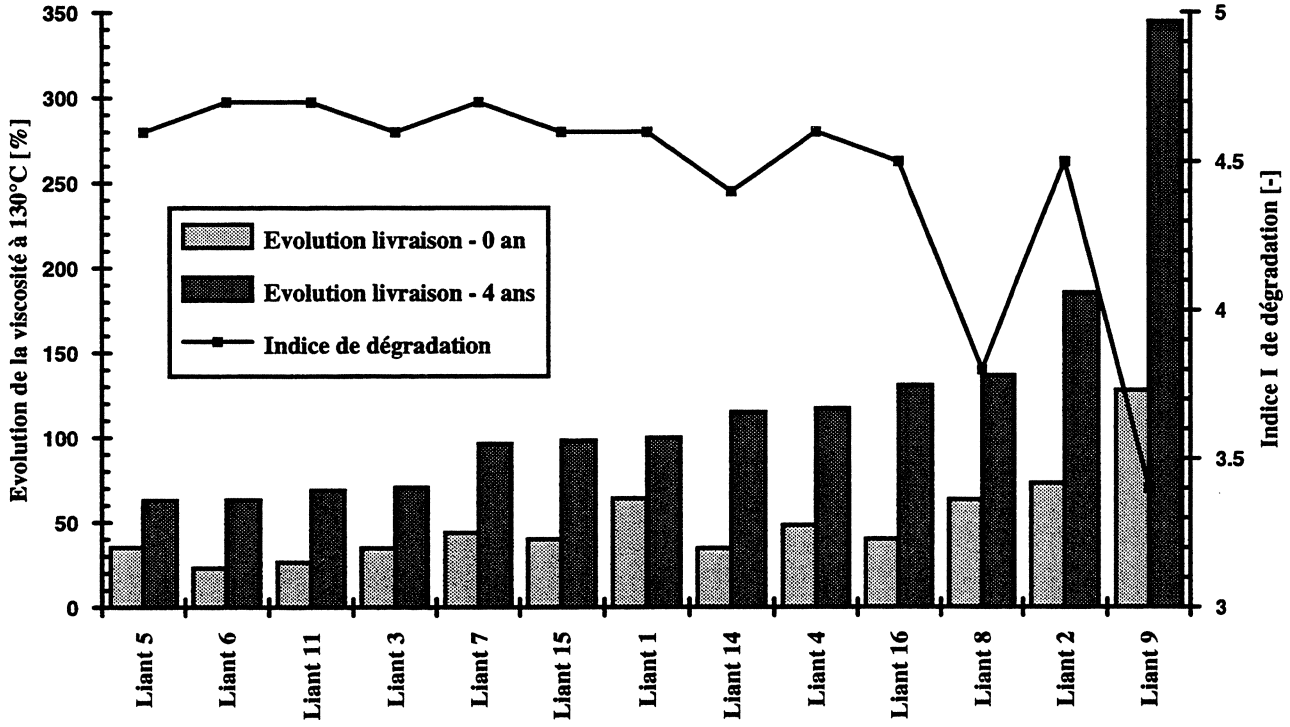


Figure 5.3: *Evolution en % de la viscosité à 130 °C entre la livraison et 0 an ainsi que la livraison et 4 ans , comparativement à l'endommagement de surface à 4 ans*
Dynamische Viskosität bei 130 °C am rückgewonnenen Bindemittel nach 0 und 4 Jahren in % der Viskosität im Anlieferungszustand; Vergleich zum Zustandsindex nach 4 Jahren

- Le taux de l'évolution globale de la contrainte au seuil à 20°C (figure 5.4) varie entre 68 et 425%. La corrélation entre le taux d'évolution et l'indice I_1 est médiocre (r = 0,59). Cependant, pour les indices les plus faibles et les plus différenciés correspondant aux liants 8 et 9, les taux d'évolution sont parmi les plus élevés.

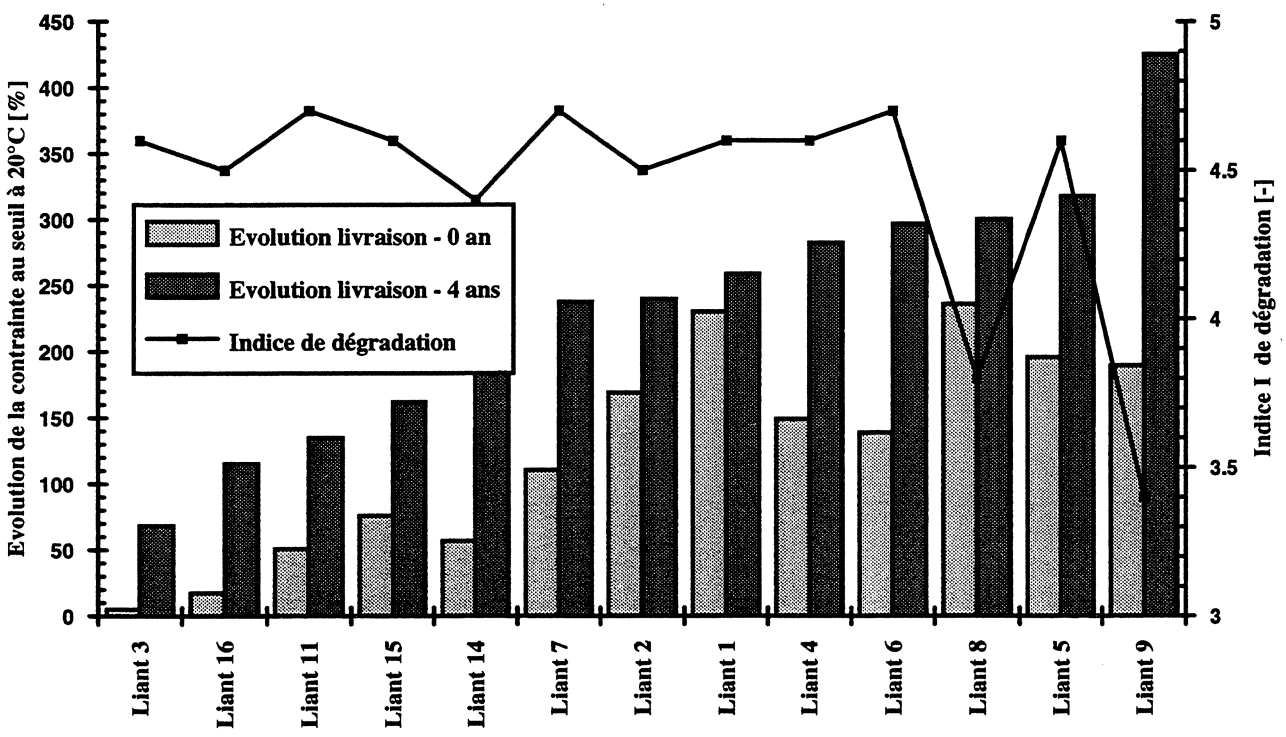


Figure 5.4: *Evolution en % de la contrainte au seuil de l'essai de traction directe à 20°C entre la livraison et 0 an ainsi qu'entre la livraison et 4 ans, comparativement à l'endommagement de surface à 4 ans*

Spannung beim direkten Zugversuch (20 °C) am rückgewonnenen Bindemittel nach 0 und 4 Jahren in % des Wertes im Anlieferungszustand; Vergleich zum Zustandsindex nach 4 Jahren

En résumé, il apparaît nettement dans cette étude que les essais d'anneau et bille et de viscosité à 130°C sont les plus significatifs vis-à-vis du vieillissement comme le montrent les coefficients de corrélation (r) portés dans le tableau 5.1. Les taux d'évolution de ces caractéristiques sont bien corrélés avec les constations in situ. Remarquons cependant que l'indice de dégradation apparente de la chaussée varie dans une plage très étroite pour 14 liants examinés: soit de 4.4 à 4.7 (à l'exception des liants 8 et 9).

	Effet centrale + mise en oeuvre	Effet in situ	Effet global
	Variation livraison - 0 an I_1	Variation 0 an - 4 ans I_1	Variation livraison - 4 ans I_1
Pénétration à 25°C	0.61	0.09	0.55
Température A&B *	0.85	0.59	0.89
Viscosité à 130°C	0.83	0.70	0.84
Contrainte au seuil de l'essai de traction directe à 20°C	0.42	0.07	0.59
Retour élastique à 25°C	0.85	0.38	0.66
Ductilité à 7°C	0.52	0.01	0.24

* sans les liants 5 et 6

Tableau 5.1: Coefficient de corrélation (r) entre la variation en % des caractéristiques des liants et l'indicede dégradation apparente de la chausséeI_1
Korrelationskoeffizient (r) der prozentualen Veränderung der Bindemitteleigenschaften mit dem Zuständnis

En décomposant le vieillissement global entre la livraison et 4 ans en deux phases: vieillissement entre la livraison et le temps 0 correspondant au passage en centrale et à la mise en oeuvre et le vieillissement entre le temps 0 et 4 ans correspondant au vieillissement in situ, les corrélations mentionnées dans le tableau 5.1 font apparaître très nettement l'incidence du vieillissement en centrale sur les dégradations in situ. Ce vieillissement en centrale et après mise en oeuvre apparaît comme le facteur déterminant sur le comportement de l'enrobé en place par rapport au vieillissement in situ. Cette constatation renforce l'intérêt présenté par le vieillissement artificiel en laboratoire qui représente non seulement un bon pouvoir prédictif du vieillissement à la fabrication, mais encore du vieillissement in situ à moyen terme.

Les droites de régression entre le taux d'évolution global et l'indice de dégradation apparente de la chaussée I_1 figurent à l'annexe I - figures I1 à I6.

5.2 Synthèse de la comparaison des résultats de laboratoire avec les constatations in situ à 4 ans
Folgerungen aus dem Vergleich des Laboruntersuchungen mit den Beobachtungen in situ

L'ensemble des caractéristiques considérées des liants évolue de façon très significative entre la livraison et après quatre années de service. Ces différents taux d'évolution sont repris dans le tableau 5.2 pour les caractéristiques étudiées y compris pour les liants 5 et 6 et à l'exception de ceux avec ajouts pulvérulents.

Caractéristique / Liants	Pénétration à 25 °C	Temp. anneau et bille	Viscosité 130 °C	Contrainte en traction à 20 °C	Ductilité à 7 °C	Retour élastique à 25 °C
1	-57.5	26.5	120	262.5	-97.5	≤15 %
2	-55.8	30.8	185.4	243.5	-94.5	≤15 %
3	-49.4	20.8	70.7	66.5	-98.5	≥60 %
4	-57.1	23.6	117	287.5	-97.5	≥60 %
5	-53.5	-10.6	63.0	313.5	-98	≥60 %
6	-54.8	-8.0	63.2	306	-98.5	≥60 %
7	-52.9	17.6	96.5	241.5	-98	≥60 %
8	-57.4	31.9	136.6	300	-92.5	fil rompu
9	-61.3	40.0	344.4	435	-92	fil rompu
11	-46.7	17.9	68.9	138.5	-81.5	≥60 %
14	-45.9	20.9	115	190.5	-93	fil rompu
15	-50.6	22.1	98.3	163	-97	≤15 %
16	-51.7	26.3	130	116	-95.5	≤ 15 %

Tableau 5.2: Taux d'évolution % entre la livraison et l'état après 4 ans pour les différents essais à l'exception des liants avec ajout pulvérulent
Veränderung der Untersuchungsergebnisse zwischen dem Bitumen im Anlieferungszustand und nach 4 Jahren

L'examen de ce tableau permet de tirer les conclusions suivantes:

- Les bitumes obtenus par distillation directe présentent des taux d'évolution plus faibles que ceux des bitumes semi-soufflés, sauf pour la ductilité à 7 °C et le retour élastique pour lesquels on ne constate pas de différence significative.
- Pour ce qui concerne la pénétrabilité, l'évolution est de l'ordre de 50% avec un taux minimal de 46% enregistré pour les liants 11 et 14 et un taux maximal de 61% pour le liant 9.

- La température anneau et bille évolue de façon plus différenciée, de 18% pour les liants 7 et 11 à 40% pour le liant 9, la majorité se situant entre 21 et 30%, en faisant abstraction des liants 5 et 6 qui présentent des évolutions négatives pour cette caractéristique.
- La viscosité à 130 °C varie dans des proportions considérables entre 63 et 79% pour les liants 5, 6 et 11 et 344% pour le liant 9.
- La contrainte au seuil en traction directe à 20°C varie également dans des limites du même ordre entre 68% (liant 3) et 435% (liant 9).
- La ductilité à 7°C présente une amplitude d'évolution faible comprise entre 92 et 99%, à l'exception du liant 11 pour lequel on enregistre une évolution de 81%.
- Le retour élastique à 4 ans est inférieur à 15% pour les bitumes classiques et supérieur à 60% pour les liants modifiés, à l'exception des liants 8, 9 et 14 pour lesquels le fil s'est rompu. Il met donc bien en évidence le caractère élastomérique de la plupart des liants modifiés.

Si l'on considère les valeurs absolues de ces différentes caractéristiques, on constate qu'il n'y a pas une liaison directe entre leur niveau et le degré de fissuration tel que cela a été constaté par exemple dans des études menées par Ramond [Réf. 24] ou encore par Pohlmann [Réf. 25] pour des bitumes classiques. La fissuration apparaît dans notre étude, essentiellement liée au taux d'évolution de la caractéristique considérée qui correspond très probablement à un taux de dégradation des propriétés d'autoréparation d'origine. Cette dégradation apparaît au niveau de la fabrication en centrale et l'intensité de cette dégradation semble "prédestiner" le comportement du matériau in situ. Cette constatation renforce l'intérêt du pouvoir prédictif du vieillissement artificiel en laboratoire. La corrélation avec le comportement in situ à 4 ans n'est pas du même ordre que celle obtenue avec les taux d'évolution à 4 ans, mais cependant l'examen des valeurs permet bien de déceler le facteur de risque présenté par le liant 9 et le bon comportement du liant 11. Par contre, le bitume 80/100 semi-soufflé 1 présente un comportement plus pessimiste avec le vieillissement artificiel. On constate également que c'est de nouveau l'essai de ramollissement anneau et bille et la viscosité à 130 °C qui apparaissent comme les essais les plus significatifs.

La lecture du tableau met en évidence, notamment pour les comportements extrêmes en place, les valeurs d'évolution les plus élevées pour le liant de la planche 9 pour toutes les caractéristiques, à l'exception de la ductilité à 7 °C, et les valeurs d'évolution les plus faibles pour le liant 11, à l'exception de la contrainte en traction à 20 °C. Cette étude souligne le fait que le film de liant est soumis à des contraintes énormes compte tenu des conditions climatiques très sévères au point de vue des amplitudes de variation de la température dans des temps très courts pouvant atteindre 30 °C en 24 heures. On comprend bien que selon le degré de vieillissement, le niveau des caractéristiques rhéologiques du liant soit déterminant.

Seuls deux produits sur les quatorze répondent au problème de la fissuration thermique de surface à 4 ans. Il est donc tout à fait nécessaire que, lors de la passation des marchés, les propriétés spécifiques des produits soient clairement énoncées par les fournisseurs.

6. CONCLUSIONS
FOLGERUNGEN

On ne peut pas aujourd'hui, après 4 ans, classer de façon univoque les planches montrant un début de fissuration. L'analyse à 8 ans devrait permettre de mettre en évidence les différents comportements. Du point de vue de la fissuration thermique seul deux liants (6 et 11) montrent un comportement amélioré par rapport aux bitumes classiques alors que deux autres liants (8 et 9) présentent un état de fissuration généralisé. Les sept autres liants modifiés ou ajout ne présentent pas d'amélioration significative par rapport aux bitumes classiques.

Notre étude indique à ce stade que la majorité de ces produits n'ont pas, vis-à-vis de la fissuration thermique, un comportement meilleur que celui des bitumes classiques.

Notons que les conditions de l'essai sont particulièrement contraignantes par le climat contrasté du Valais et par les teneurs en liant relativement basses du mélange retenu.

Parmi les essais de laboratoire, les plus significatifs par rapport à la fissuration de surface sont:

- la température anneau et bille
- la viscosité dynamique à 130 °C

Nous n'avons pas décelé de liaison directe entre les valeurs absolues à 4 ans des essais de laboratoire et l'indice de dégradation apparente de la chaussée à 4 ans. Par contre, la fissuration apparaît être liée au taux d'évolution de la caractéristique considérée.

Le vieillissement après passage en centrale et mise en oeuvre conditionne l'évolution in situ, d'où l'intérêt de l'essai de vieillissement en laboratoire.

Les résultats de cette étude ont fourni des éléments importants pour la réalisation de la pré-norme SN 671 400 [réf. 1] proposée par la sous-commission 271/15.

L'analyse des coûts montre que la plus-value de mise en oeuvre pour les liants modifiés ou ajouts n'est rentabilisé que si l'entretien de la couche de roulement peut être reporté d'au moins 2.5 ans dans l'hypothèse d'une réfection sur un enrobé en bitume classique après 10 ans ou d'au moins 5 ans dans l'hypothèse d'une réfection après 15 ans.

Cette expérience a confirmé que le maître de l'ouvrage doit définir clairement ses attentes vis-à-vis des performances du produit fini. De son côté, le fournisseur de bitumes modifiés ou d'ajouts doit assurer que les caractéristiques de son produit répondent à ces attentes.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[Réf. 1] Norme suisse (prénorme)
SN 671 400 (1993) "Bitumes modifiés avec des polymères (BMP) pour revêtements: Prescriptions de qualité"

[Réf. 2] A.-G. Dumont, B Schwery, Ch. Angst
Symposium Eurobitume. Madrid. Octobre 1989
"Planches comparatives de différents bitumes modifiés et ajouts"

[Réf. 3] B. Schwery, A.-G. Dumont
Article Route et Trafic 7/89
"Des liants modifiés au banc d'essai sur la N9 entre Riddes et Sion"

[Réf. 4] B. Schwery
Article Route et Trafic 12/91
"Des liants modifiés au banc d'essai sur la N9 entre Riddes et Sion, Rapport N°1: Etat initial"

[Réf. 5] A.-G. Dumont, M. Huet, E. Simond
Congrès Eurobitume. Stockholm. Juin 1993.
"Vieillissement de bitumes modifiés issus de planches comparatives réalisées en Suisse, dans le canton du Valais"

[Réf. 6] B Schwery, Ch. Angst, S. Aebersold
Congrès Eurobitume. Stockholm. Juin 1993.
"Comportement dans le temps des enrobés issus des planches comparatives réalisées en Suisse, dans le canton du Valais, avec différents bitumes polymères"

[Réf. 7] Journée technique du LAVOC 14 septembre 1993
Comptes rendus

[Réf. 8] Ch. Angst
Rapport N° 1 (non publié). 1991
"Planches de comparaison avec bitumes modifiés aux polymères"

[Réf. 9] Ancienne norme suisse
SN 640 322 (1971) "Dimensionnement"

[Réf. 10] Ancienne norme Suisse
SN 640 431 (1976) "Tapis et couches de support hydrocarbonés à chaud: Exécution, exigences"

[Réf. 11] Ancienne norme suisse
SN 670 710b (1972) "Gravillons et graviers concassés: Prescriptions de qualité"

[Réf. 12] Ancienne norme suisse
SN 670 760 (1976) "Filler pour enrobés bitumineux: Prescriptions de qualité"

[Réf. 13] Norme suisse
SN 671 965a (1981) "Enrobés hydrocarbonés: Masse volumique"

[Réf. 14] Norme suisse
SN 671 969b (1976) "Enrobés hydrocarbonés: Essai Marshall"

[Réf. 15] Norme suisse
SN 640 431a (1988) "Revêtements en béton bitumineux: Conception, exigences, exécution"

[Réf. 16] Norme suisse
SN 640 521a (1977) "Planéité: Exigences"

[Réf. 17] Norme suisse
SN 640 511b (1984) "Qualité antidérapante: Appréciation"

[Réf. 18] Laboratoire de mécanique des sols
Rapport au canton du Valais (non publié). Novembre 1993
"Planches d'essai N9 Ardon
Mesures météorologiques juillet 1989 à août 1993"

[Réf. 19] Norme SNV 670 140a
Page 14

[Réf. 20] Norme suisse
SN 640 925 (1990) "Relevé et évaluation de l'état des routes"

[Réf. 21] Norme suisse
SN 671 860 (1992) "Liants bitumineux, prescriptions d'essai: Récupération du liant résiduel de solutions provenant d'extractions"

[Réf. 22] Ancienne norme suisse
SN 671 752b (1978) "Liants hydrocarbonés: Modification de masse à 163°C, 85 minutes"

[Réf. 23] Norme DIN
DIN 52 016 (1980) "Thermische Beanspruchung im rotierenden Kolben (Essais des liants bitumineux; effet thermique dans le ballon tournant)"

[Réf. 24] "Rhéologie des bitumes - Méthodes de mesures" - Relation entre la composition et la rhéologie.
G. Ramond - Journées d'Etudes AFREM, St-Rémy-lès-Chevreuse, France. Novembre 1991

[Réf. 25] "Influence des conditions climatologiques sur la construction des chaussées en enrobés"
P. Pohlmann, docteur-ingénieur, Allemagne. Routes/Roads. AIPCR, n° 276, I, 1992

ANNEXES

ANNEXE A

Caractéristiques des enrobés

- Fractions passantes cumulées des granulats extraits des enrobés prélevés en centrale
- Teneurs en liant sur les carottes prélevées au temps 0, après 2 et 4 ans comparativement à la teneur en liant de l'enrobé prélevé en centrale
- Résultats de l'étude Marshall

N9 - CANTON DU VALAIS - LOT NO 342 BMP

PLANCHES DE COMPARAISON AVEC BITUMES MODIFIES AUX POLYMERES

CARACTERISTIQUES DES ENROBES PRELEVES EN CENTRALE, ETAT 0

	FRACTIONS PASSANTES CUMULEES										TENEURS EN LIANTS	
ENROBE N°	< 0.08 (%)	0.16 (%)	0.315 (%)	0.63 (%)	1.6 (%)	3.15 (%)	6.3 (%)	10.0 (%)	16.0 (%)	25.0 (%)	GRANULATS (%)	ENROBE (%)
1	5.2	8.8	12.9	18.6	25.9	37.6	53.1	66.5	98.1	100.0	5.31	5.04
2	6.1	9.1	13.3	19.1	26.6	39.3	58.9	73.2	98.0	100.0	5.76	5.45
3	5.2	8.7	12.8	18.8	27.1	39.5	55.7	71.4	98.1	100.0	5.69	5.38
4	5.3	8.9	13.2	19.2	27.2	39.4	57.2	72.6	99.7	100.0	5.69	5.38
5	6.0	9.0	13.1	18.8	26.2	37.8	54.3	67.0	99.4	100.0	5.46	5.18
6	5.7	9.1	13.2	18.7	25.9	36.3	52.5	68.2	98.8	100.0	5.30	5.03
7	7.8	9.3	13.1	18.3	25.7	36.7	55.7	67.7	99.3	100.0	5.62	5.32
8	6.5	8.8	12.6	17.8	25.1	37.1	54.5	69.4	99.3	100.0	5.67	5.37
9	5.6	9.2	13.1	18.6	26.1	38.4	58.1	71.1	99.0	100.0	5.75	5.44
10	6.6	9.4	13.6	18.4	26.7	38.0	55.1	68.0	99.6	100.0	5.92	5.59
11	6.4	9.7	13.6	18.8	25.8	37.4	56.0	68.8	99.6	100.0	5.55	5.26
12	7.5	9.2	13.6	19.6	25.5	38.9	56.5	70.1	99.7	100.0	6.12	5.77
13	8.0	11.1	15.2	21.1	29.1	41.8	56.2	70.2	99.4	100.0	5.84	5.52
14	5.6	9.0	13.1	18.6	25.7	37.3	57.7	71.4	99.2	100.0	5.59	5.29
15	5.6	9.1	13.1	18.4	25.0	35.3	52.1	66.8	99.0	100.0	5.43	5.15
16	5.3	8.9	13.0	18.8	26.6	39.7	59.9	71.1	98.6	100.0	5.80	5.48
THEORIQUE	6.0	9.0	15.0	23.0	30.0	41.0	55.0	68.0	100.0	100.0	5.60	5.30
MOYENNE	6.2	9.2	13.3	18.9	26.3	38.2	55.8	69.6	99.1	100.0	5.66	5.35
ECART-TYPE	0.9	0.6	0.6	0.7	1.0	1.6	2.2	2.1	0.6	0.0	0.22	0.20
MINIMUM	5.2	8.7	12.6	17.8	25.0	35.3	52.1	66.5	98.0	100.0	5.30	5.03
MAXIMUM	8.0	11.1	15.2	21.1	29.1	41.8	59.9	73.2	99.7	100.0	6.12	5.77

N9 - CANTON DU VALAIS - LOT NO 342 BMP

PLANCHES DE COMPARAISON AVEC BITUMES MODIFIES AUX POLYMERES

CARACTERISTIQUES DES ENROBES , RECAPITULATION DES TENEURS EN LIANTS

	TENEURS EN LIANTS SUR ENROBE (%)							
ENROBE N°	CENTRALE ETAT 0	CAROTTES ETAT 0	CAROTTES 2 ANS	CAROTTES 4 ANS	MOYENNE (%)	ECART-TYPE (-)	MINIMUM (%)	MAXIMUM (%)
1	5.04	5.19	5.03	5.14	5.10	0.08	5.03	5.19
2	5.45	5.10	5.17	5.15	5.22	0.16	5.10	5.45
3	5.38	5.18	5.20	5.18	5.24	0.10	5.18	5.38
4	5.38	5.06	5.21	5.16	5.20	0.13	5.06	5.38
5	5.18	5.01	5.09	5.24	5.13	0.10	5.01	5.24
6	5.03	5.03	5.12	5.20	5.10	0.08	5.03	5.20
7	5.32	5.07	5.12	5.17	5.17	0.11	5.07	5.32
8	5.37	5.19	5.20	5.28	5.26	0.08	5.19	5.37
9	5.44	5.03	5.25	5.26	5.25	0.17	5.03	5.44
10	5.59	5.39	5.43	5.39	5.45	0.10	5.39	5.59
11	5.26	5.16	5.19	5.23	5.21	0.04	5.16	5.26
12	5.77	5.63	5.71	5.59	5.68	0.08	5.59	5.77
13	5.52	5.07	5.07	5.12	5.20	0.22	5.07	5.52
14	5.29	5.05	5.14	5.10	5.15	0.10	5.05	5.29
15	5.15	5.18	5.13	5.09	5.14	0.04	5.09	5.18
16	5.48	5.04	5.12	5.09	5.18	0.20	5.04	5.48
THEORIQUE	5.30	5.30	5.30	5.30	5.30	0.00	5.30	5.30

MOYENNE	**5.35**	**5.15**	**5.20**	**5.21**	**5.23**
ECART-TYPE	**0.20**	**0.16**	**0.16**	**0.13**	**0.18**

MINIMUM	**5.03**	**5.01**	**5.03**	**5.09**
MAXIMUM	**5.77**	**5.63**	**5.71**	**5.59**

ETUDE MARSHALL

Planche N°	Masse volumique apparente [g/cm3]	Teneur en vides [%]	Teneur en vides comblée (HFB) [%]	Stabilité Marshall [kN]	Fluage Marshall [mm]	Module Marshall [kN/mm]
1	2.352	6.2	65.1	10.3	3.6	2.9
2	2.365	5.3	70.2	12.0	4.0	3.0
3	2.376	5.0	71.3	13.7	4.2	3.3
4	2.361	5.7	68.5	13.5	4.0	3.4
5	2.361	5.6	68.0	12.8	4.0	3.2
6	2.371	5.5	67.9	13.9	4.0	3.5
7	2.385	4.7	72.3	16.0	3.4	4.7
8	2.371	5.0	71.2	11.2	3.4	3.3
9	2.341	6.3	66.2	15.4	3.3	4.7
10	2.377	4.4	74.7	11.0	3.6	3.1
11	2.382	4.5	73.3	13.0	4.1	3.2
12	2.378	4.4	75.3	10.5	3.5	3.0
13	2.417	3.3	78.6	14.5	4.0	3.6
14	2.353	5.8	67.6	13.2	4.0	3.3
15	2.376	4.9	70.7	11.4	3.6	3.2
16	2.377	4.7	72.8	13.6	4.2	3.2
Moyenne	2.371	5.1	70.9	12.9	3.8	3.4
Ecart-type	0.017	0.8	3.6	1.7	0.3	0.5
Maximum	2.417	6.3	78.6	16.0	4.2	4.7
Minimum	2.341	3.3	65.1	10.3	3.3	2.9

A N N E X E B

Conformité du revêtement

- Epaisseur de la couche de roulement et teneur en vides sur carottes
- Degrés de compactage par nucléodensimètre
- Profondeur d'ornière et index de confort de roulement RCI au temps 0 et après 4 ans de mise sous circulation
- Modules élastiques au déflectomètre à masse tombante (FWD)
- Qualité antidérapante mesurée au temps 0 et après 4 ans

    * Skiddomètre à 60 et 80 Km/h
    * Pendule SRT
    * Drainabilité
    * Hauteur au sable

CONTOLE DE COMPACTAGE SUR CAROTTES

Planche N°	Masse volumique apparente moyenne [g/cm3]	Teneur en vides moyenne [%]	Epaisseur de la couche de roulement moyenne [mm]	Degrés de compactage par nucléodensimètre [%]
1	2.386	4.75	39	101.4
2	2.330	7.05	39	98.5
3	2.385	5.06	41	100.4
4	2.378	5.07	40	100.7
5	2.351	6.40	40	99.6
6	2.356	3.90	38	99.4
7	2.368	5.38	42	99.3
8	2.364	5.32	40	99.7
9	2.374	5.08	35	101.4
10	2.394	3.85	38	100.7
11	2.401	4.06	35	100.6
12	2.367	4.84	39	99.5
13	2.393	4.27	40	99.0
14	2.347	6.33	36	99.7
15	2.339	6.40	35	98.4
16	2.360	5.59	35	99.3
Moyenne	2.368	5.21	38.3	99.9
Ecart-type	0.021	0.96	2.4	0.9
Maximum	2.401	7.05	42	101.4
Minimum	2.330	3.85	35	98.4

MESURES EFFECTUEES PAR L'APPAREIL ARAN

Planche N°	Index de confort de roulement RCI		Profondeur d'ornière (voie lente)	
	Etat initial [-]	Après 4 ans [-]	Etat initial [-]	Après 4 ans [-]
1	4.01	4.11	3.4	6.0
2	3.87	4.07	2.4	4.5
3	3.87	3.85	2.7	4.7
4	4.08	3.91	2.4	4.4
5	4.08	4.14	2.7	4.4
6	4.10	4.07	2.6	4.1
7	4.02	4.03	3.7	5.3
8	4.09	4.02	3.0	5.3
9	4.14	4.01	3.1	4.7
10	4.22	4.00	2.6	4.7
11	4.20	4.06	2.8	4.8
12	4.09	3.95	2.7	4.7
13	4.07	3.71	2.3	4.6
14	4.06	3.88	2.5	4.1
15	4.10	3.91	3.0	4.6
16	4.03	3.93	4.5	5.4
Moyenne	4.06	3.98	2.9	4.8
Ecart-type	0.09	0.11	0.6	0.50
Maximum	4.22	4.14	4.5	6.0
Minimum	3.87	3.71	2.3	4.1

DEFLECTOMETRE A MASSE TOMBANTE (FWD)

Planche N°	Module élastique sur revêtement [MPa]	[MPa]	[MPa]	Durée de vie en mio d'essieux 10t
1	2760	807	281	490
2	3327	843	91	500
3	3321	831	108	500
4	3366	954	115	500
5	3362	672	100	500
6	3288	663	107	260
7	3397	1178	100	500
8	2861	746	155	500
9	3284	811	122	490
10	3872	1211	85	500
11	3613	1104	81	500
12	3181	1069	82	410
13	3101	732	117	480
14	2889	680	172	500
15	2773	1275	120	440
16	2827	540	188	300
Moyenne	3201	882	127	461
Ecart-type	316	223	52	75
Maximum	3872	1275	281	500
Minimum	2760	540	81	260

MESURES DE MICROTEXTURE ET DE MACROTEXTURE A L'ETAT INITIAL ET A 4 ANS

Planche N°	Mesures au Skiddomètre 60Km/h		Mesures au Skiddomètre 80Km/h		Mesures au pendule SRT		Mesures au drainomètre		Mesures de hauteur au sable	
	Etat initial [-]	Après 4 ans [-]	Etat initial [-]	Après 4 ans [-]	Etat initial [-]	Après 4 ans [-]	Etat initial [s]	Après 4 ans [s]	BAU à 4 ans [mm]	Après 4 ans [mm]
1	0.62	0.62	0.53	0.58	74	62	4	5	0.52	0.65
2	0.60	0.62	0.51	0.58	74	61	7	6	0.46	0.57
3	0.63	0.62	0.52	0.60	73	62	8	5	0.46	0.50
4	0.61	0.62	0.52	0.59	74	60	7	5	0.43	0.59
5	0.64	0.62	0.53	0.59	73	58	8	5	0.42	0.55
6	0.65	0.62	0.55	0.59	73	57	6	5	0.48	0.59
7	0.61	0.62	0.51	0.59	72	56	5	5	0.48	0.62
8	0.63	0.63	0.57	0.58	75	58	6	5	0.44	0.55
9	0.68	0.64	0.55	0.58	73	56	6	5	0.52	0.67
10	0.64	0.60	0.55	0.53	73	58	6	7	0.43	0.54
11	0.59	0.62	0.50	0.53	74	57	5	10	0.49	0.52
12	0.67	0.62	0.55	0.55	75	58	6	6	0.46	0.54
13	0.60	0.62	0.49	0.56	69	56	6	7	0.43	0.53
14	0.63	0.63	0.52	0.57	71	56	5	6	0.50	0.61
15	0.63	0.62	0.53	0.55	71	55	5	6	0.46	0.58
16	0.58	0.62	0.49	0.57	72	56	8	5	0.41	0.61
Moyenne	0.63	0.62	0.53	0.57	73	58	6	6	0.46	0.58
Ecart-type	0.03	0.01	0.02	0.02	1.6	2.2	1.0	1.3	0.03	0.05
Maximum	0.68	0.64	0.57	0.60	75	62	8	10	0.52	0.67
Minimum	0.58	0.60	0.49	0.53	69	55	4	5	0.41	0.50

A N N E X E C

Relevés au cadre de l'état de fissuration et photographies des types de dégradations rencontrés

- Relevés au cadre des planches 8, 9, 10, 12 et 13
- Photographies des types de dégradations des planches 2, 8, 9 et 13

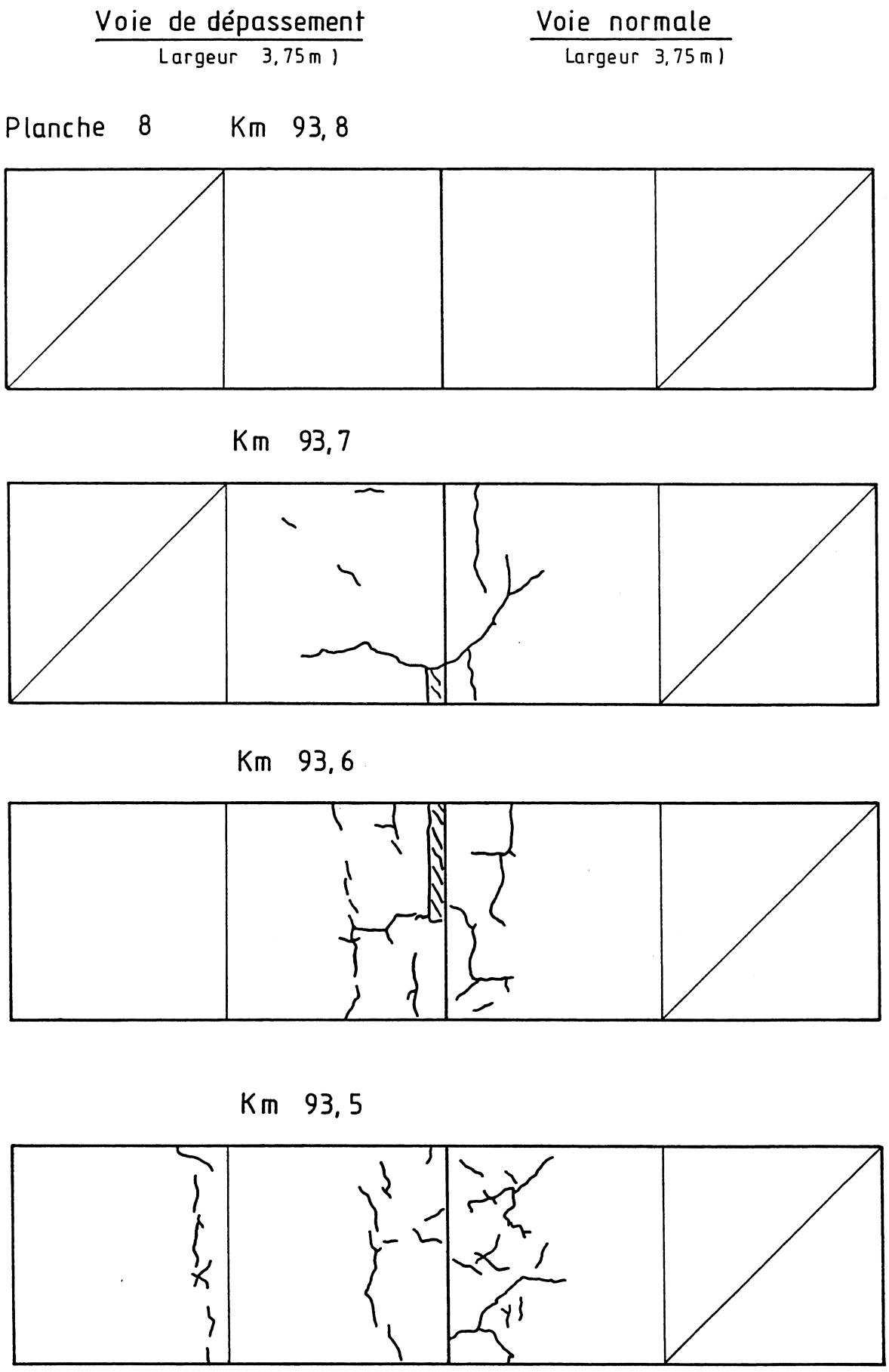


Figure C.1: *Relevé de la fissuration à l'aide d'un cadre (1.9 x 1.9 m); planche 8*

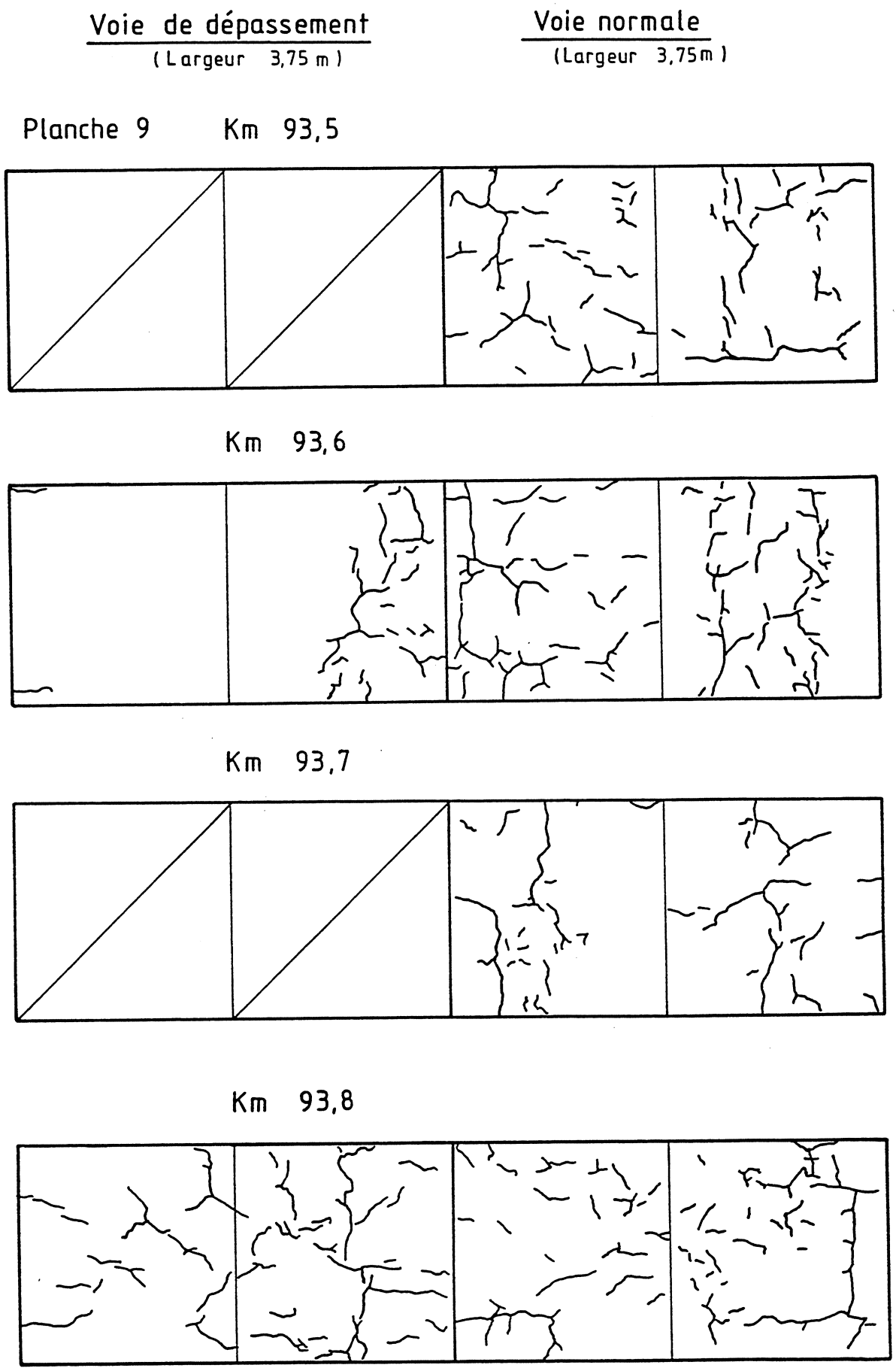


Figure C.2: *Relevé de la fissuration à l'aide d'un cadre (1.9 x 1.9 m); planche 9*

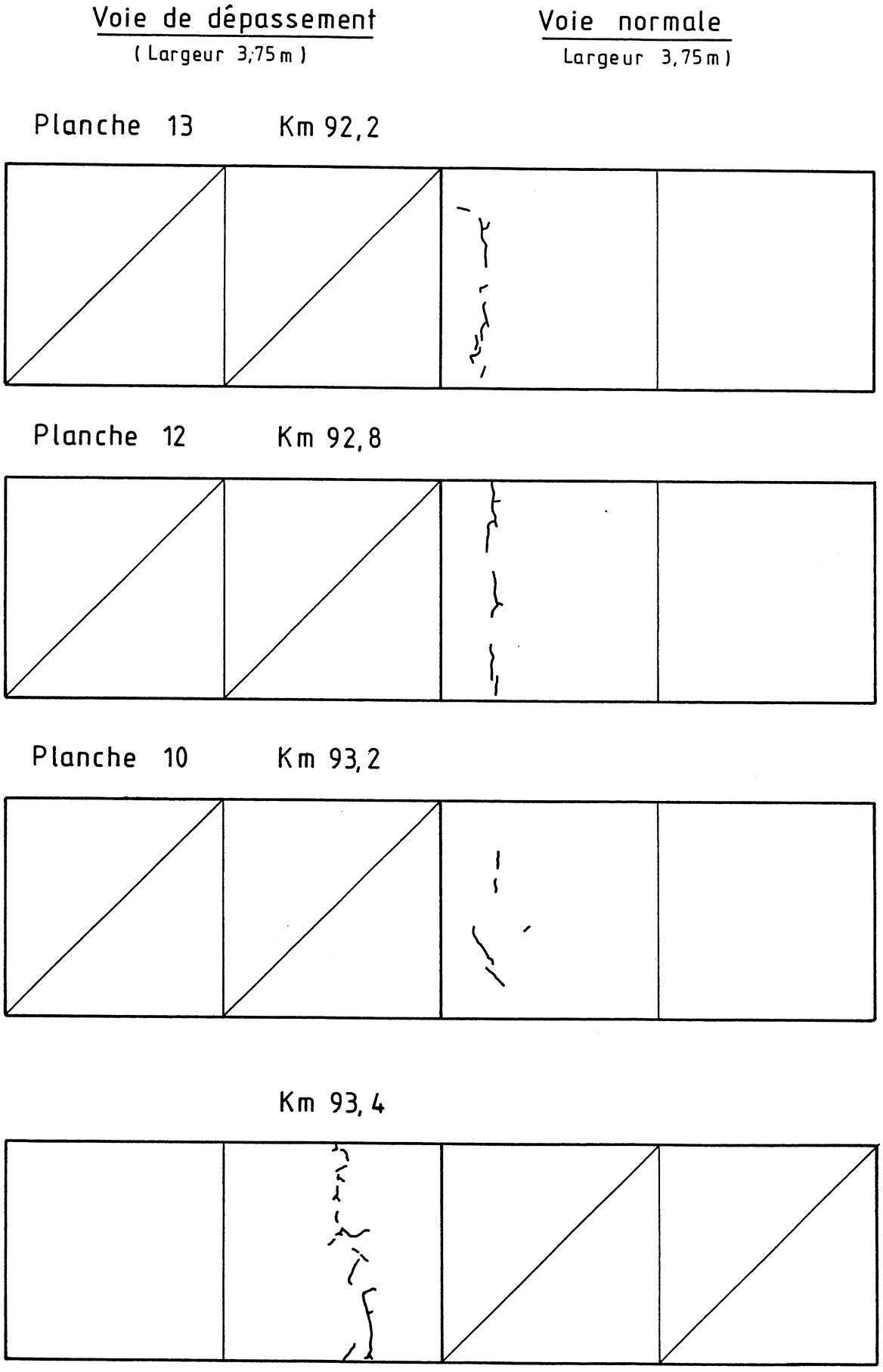


Figure C.3: *Relevé de la fissuration à l'aide d'un cadre (1.9 x 1.9 m); planches 13, 12 et 10*

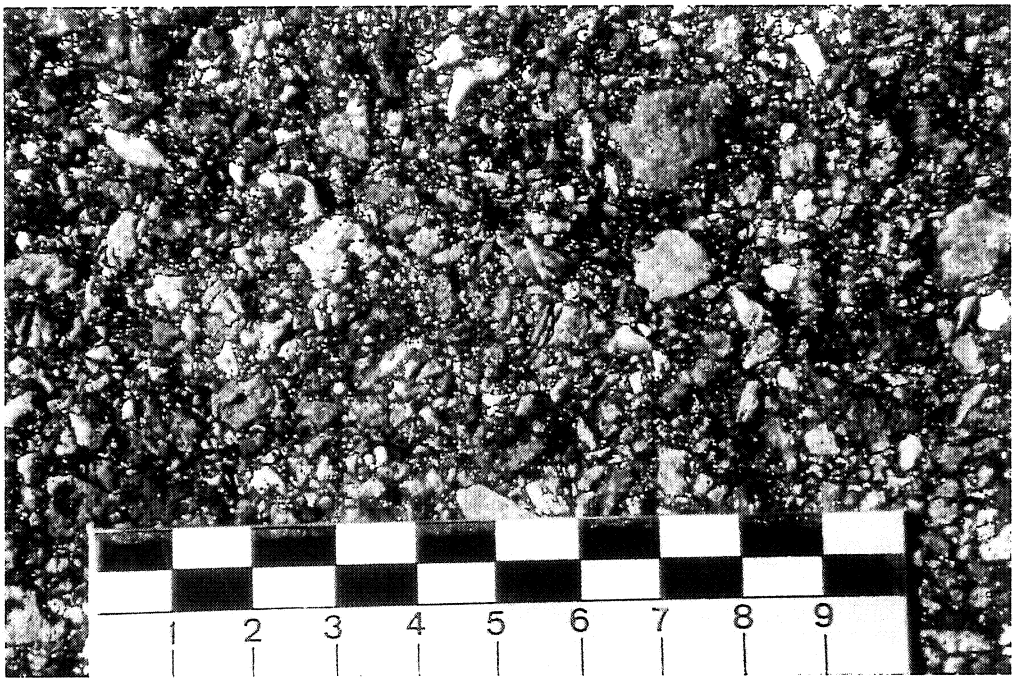


Photo C.1: *Illustration de la perte de matériaux (planche 2)*

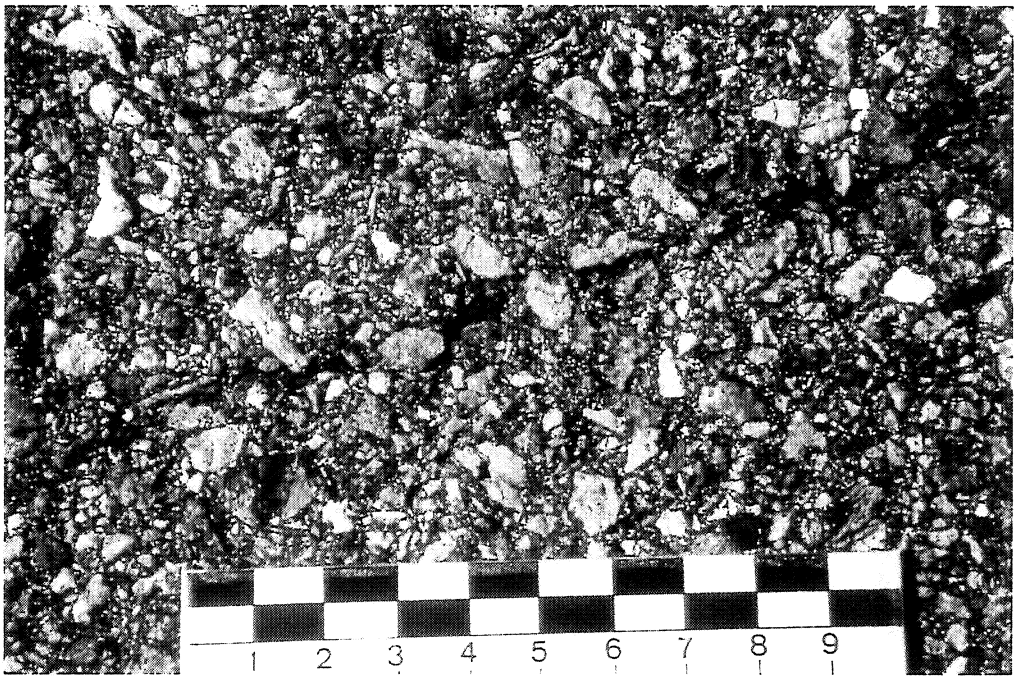


Photo C.2: *Illustration d'une petite fissure (planche 2)*

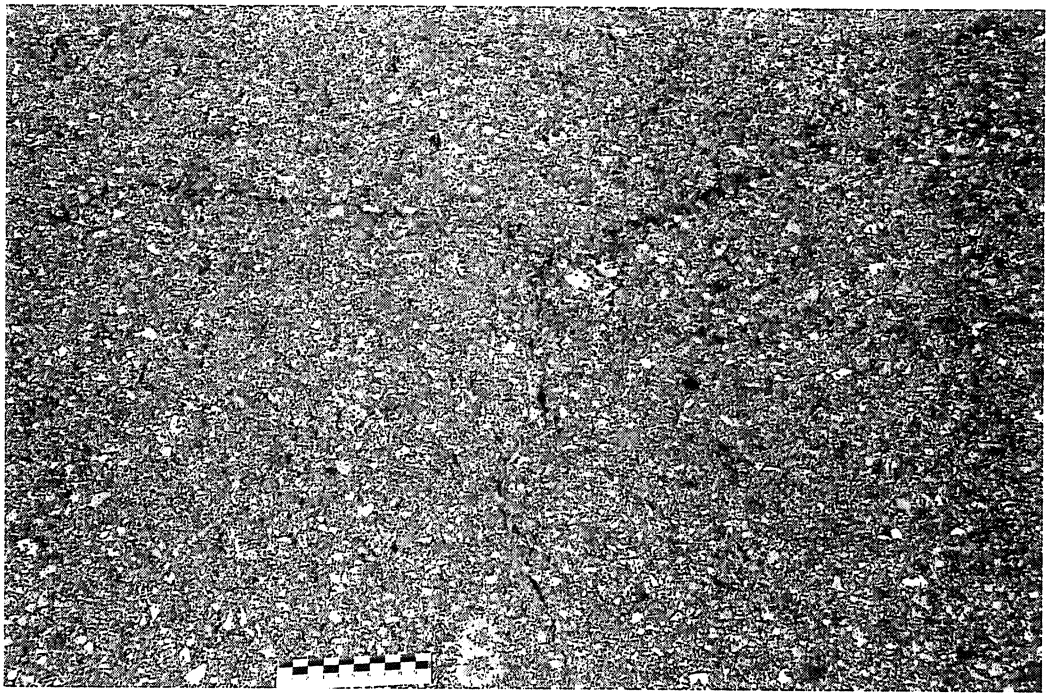


Photo C.3: *Illustration d'une fissure à trois branches (planche 8)*

Photo C.4: *Illustration de la perte de matériaux et de la fissuration (planche 9)*

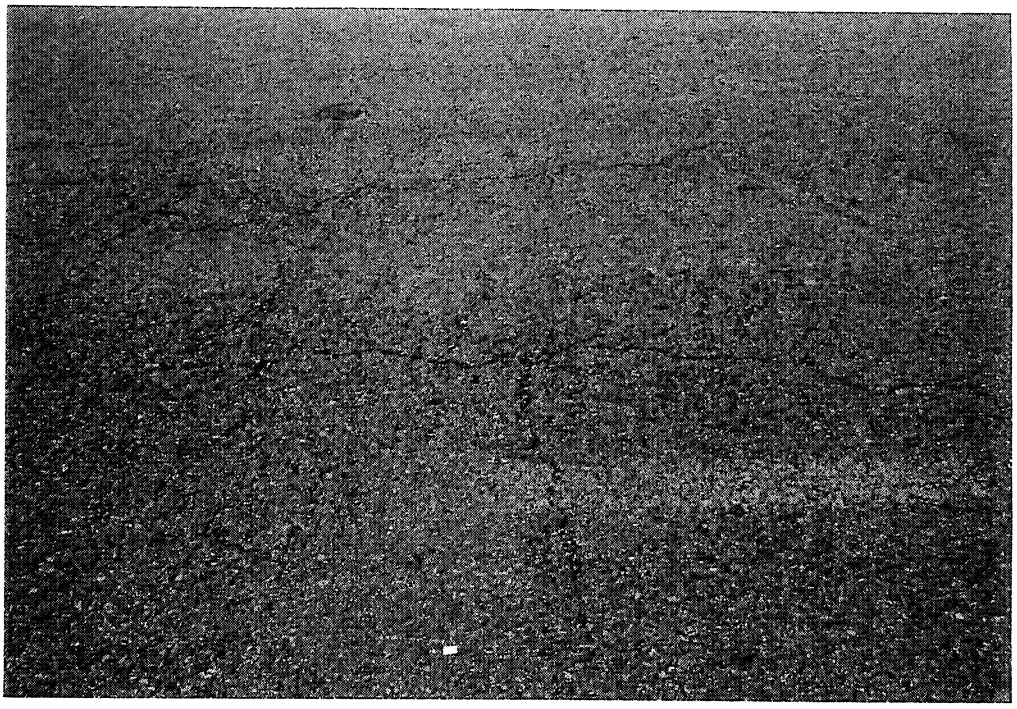


Photo C.5: *Illustration de la fissuration (planche 9)*

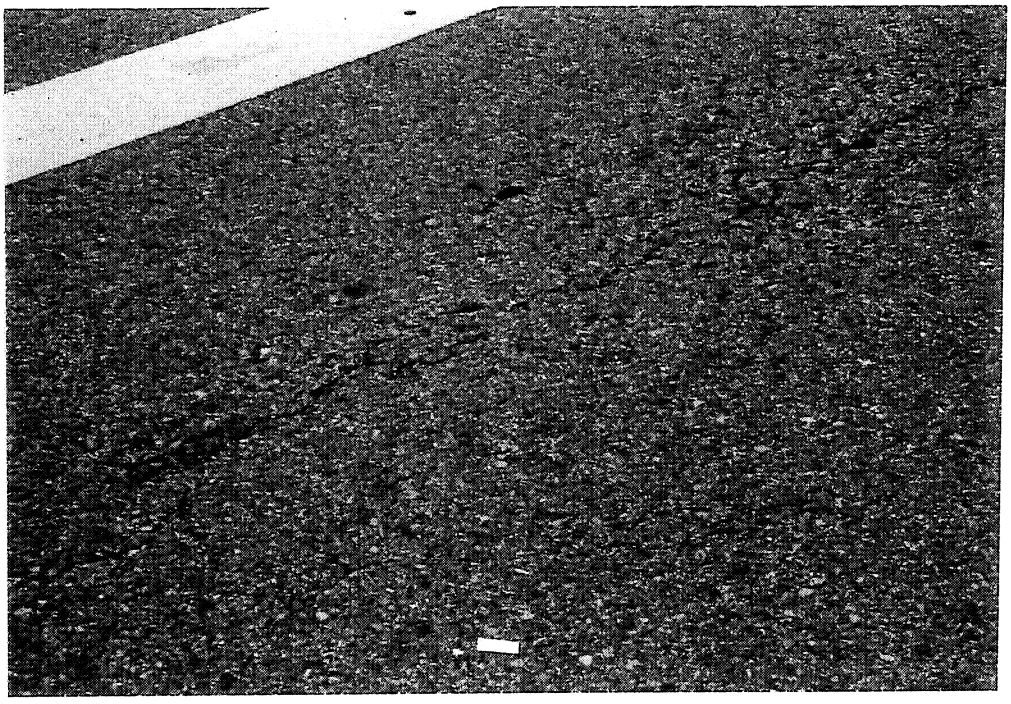


Photo C.6: *Illustration d'une fissure longitudinale (planche 13)*

ANNEXE D

Données permettant le calcul de l'indice de dégradation apparente de la chaussée

- Note de gravité et d'étendue du polissage
- Note de gravité et d'étendue de la perte de matériaux
- Note de gravité et d'étendue de la fissuration
- Indice de dégradation apparente de la chaussée

CALCUL DE L'INDICE DE DEGRADATION APPARENTE DE LA CHAUSSEE

Planche N°	Polissage		Perte de matériaux		Fissuration		Indice de dégradation apparente de la chaussée
	note de gravité [-]	note d'étendue [-]	note de gravité [-]	note d'étendue [-]	note de gravité [-]	note d'étendue [-]	[-]
1	0.33	3	0.8	1	0.125	1	4.6
2	0.33	3	1	1	0.25	1	4.5
3	0.33	3	0.45	1	0.125	1	4.6
4	0.33	3	0.35	1	0.25	1	4.6
5	0.33	3	0.6	1	0.25	1	4.6
6	0.33	3	0.45	1	0	0	4.7
7	0.33	3	0.35	1	0.125	1	4.7
8	0.33	3	0.3	1	0.75	3	3.8
9	0.33	3	1.1	1	1	3	3.4
10	0.33	3	0.6	1	0.25	2	4.5
11	0.33	3	0.7	1	0	0	4.7
12	0.33	3	0.4	1	0.25	1	4.6
13	0.33	3	0.8	1	0.25	2	4.4
14	0.33	3	1.3	1	0.125	2	4.4
15	0.33	3	0.9	1	0.125	1	4.6
16	0.33	3	1.1	1	0.125	1	4.5
Moyenne	0.33	3	0.70	1	0	1	4.5
Ecart-type	0.00	0	0.31	0.00	0.3	0.9	0.4
Maximum	0.33	3	1.30	1	1	3	4.7
Minimum	0.33	3	0.30	1	0	0	3.4

A N N E X E E

Tableaux des résultats sur les liants

TABLEAU RECAPITULATIF

	Pénétration à 25°C (1/10 mm)			
	Livraison	Récupération 0 an	Récupération 2 ans	Récupération 4 ans
Liant 1	80	43	30	34
Liant 2	52	30	24	23
Liant 3	77	50	45	39
Liant 4	56	35	29	24
Liant 5	71	45	42	33
Liant 6	62	45	37	28
Liant 7	51	36	34	24
Liant 8	61	37	30	26
Liant 9	62	31	28	24
Liant 10	*	41	36	35
Liant 11	75	56	50	40
Liant 12	*	42	42	37
Liant 13	*	35	32	31
Liant 14	61	43	38	33
Liant 15	77	48	41	38
Liant 16	58	39	29	28

Température d'Anneau et Bille (°C)			
Livraison	Récupération 0 an	Récupération 2 ans	Récupération 4 ans
47.1	54	60	58.5
52.2	59.7	64.6	67.8
53.1	58.6	61.2	63.9
55.1	60.7	65.4	68
80.6	77.6	68.9	71.8
81	77.6	78.2	74.7
59.3	63.4	65	69.9
59.5	68.7	73.4	78.4
54.8	67.9	66.1	76.9
*	59.7	62.4	65.5
53	56.9	58	62.5
*	62.1	62.5	68.7
*	57.4	59.7	62.2
55.1	60.1	62.6	66.7
47.4	53	56	57.9
49.4	55.4	59.5	62.3

Température Fraass (°C)			
Livraison	Récupération 0 an	Récupération 2 ans	Récupération 4 ans
-18	-15	-12	-16
-15	-12	-12	-8
-27	-21	-21	-19
-19	-16	-17	-14
-19	-17	-17	-17
-25	-17	-22	-20
-19	-22	-20	-18
-24	-22	-21	-21
-23	-15	-14	-21
*	-14	-16	-15
-20	-18	-18	-24
*	-17	-17	-18
*	-12	-11	-16
-25	-19	-18	-24
-20	-15	-17	-18
-17	-15	-12	-15

	Viscosité dynamique à 130°C (10-1 Pa.s)			
	Livraison	Récupération 0 an	Récupération 2 ans	Récupération 4 ans
Liant 1	5.3	8.7	12.7	10.6
Liant 2	8.2	14.2	20.4	23.4
Liant 3	9.2	12.4	14.4	15.7
Liant 4	14.1	20.9	26.1	30.6
Liant 5	17.3	23.4	23.9	28.2
Liant 6	19	23.4	25.9	31
Liant 7	22.8	32.8	34.5	44.8
Liant 8	7.1	11.6	14.7	16.8
Liant 9	12.6	28.7	24.1	56
Liant 10	*	14.8	17.7	21.7
Liant 11	13.2	16.7	18.6	22.3
Liant 12	*	21.7	24.9	28.7
Liant 13	*	11.1	13.4	15.4
Liant 14	12.7	17.1	20.5	27.3
Liant 15	6	8.4	10.6	11.9
Liant 16	7.5	10.5	14	17.3

Teneur en asphaltènes (%)		
Livraison	Récupération 0 an	Récupération 4 ans
15.3	19	20.3
17.6	21.5	22
15.2	20.1	20.2
17.4	*	21.7
14.9	19.2	19
16.1	*	23.3
16	*	22.8
14.5	17.9	18.3
*	*	*
15	18.6	18.4
14.3	18.3	18.1
15.3	19.3	20
16.2	22.7	21
*	*	*
12.5	17.2	16.7
12.9	17.1	17.3

* essai non réalisé

	Pénétration à 25°C (1/10 mm)			
	Livraison	Récupération	Vieillissement artificiel	
		0 an	RTFOT	DIN
Liant 1	80	43	41	47
Liant 2	52	30	32.5	33
Liant 3	77	50	52	51
Liant 4	56	35	38	39
Liant 5	71	45	48	50
Liant 6	62	45	46	48
Liant 7	51	36	36	37
Liant 8	61	37	35	38
Liant 9	62	31	38	41
Liant 10	*	41	*	*
Liant 11	75	56	50	52
Liant 12	*	42	*	*
Liant 13	*	35	*	*
Liant 14	61	43	43	42
Liant 15	77	48	48	46
Liant 16	58	39	36	37

	Température d'Anneau et Bille (°C)			
	Livraison	Récupération	Vieillissement artificiel	
		0 an	RTFOT	DIN
Liant 1	47.1	54	61.8	54.6
Liant 2	52.2	59.7	60.4	59.5
Liant 3	53.1	58.6	59.4	60.1
Liant 4	55.1	60.7	62.5	62.1
Liant 5	80.6	77.6	69.6	76
Liant 6	81	77.6	77.3	74.4
Liant 7	59.3	63.4	64.7	64.1
Liant 8	59.5	68.7	66.6	72.1
Liant 9	54.8	67.9	65.1	63.7
Liant 10	*	59.7	*	*
Liant 11	53	56.9	57.9	57.9
Liant 12	*	62.1	*	*
Liant 13	*	57.4	*	*
Liant 14	55.1	60.1	61.4	61.5
Liant 15	47.4	53	54.1	54.6
Liant 16	49.4	55.4	57.1	55.9

	Température Fraass (°C)			
	Livraison	Récupération	Vieillissement artificiel	
		0 an	RTFOT	DIN
Liant 1	-18	-15	-16	-16
Liant 2	-15	-12	-13	-10
Liant 3	-27	-21	-20	-18
Liant 4	-19	-16	-18	-17
Liant 5	-19	-17	-17	-17
Liant 6	-25	-17	-23	-18
Liant 7	-19	-22	-22	-22
Liant 8	-24	-22	-19	-21
Liant 9	-23	-15	-20	-19
Liant 10	*	-14	*	*
Liant 11	-20	-18	-20	-21
Liant 12	*	-17	*	*
Liant 13	*	-12	*	*
Liant 14	-25	-19	-17	-19
Liant 15	-20	-15	-18	-20
Liant 16	-17	-15	-17	-15

	Viscosité dynamique à 130°C (10-1 Pa.s)		
	Livraison	Récupération	Vieillissement
		0 an	RTFOT
Liant 1	5.3	8.7	24.5
Liant 2	8.2	14.2	14.5
Liant 3	9.2	12.4	13
Liant 4	14.1	20.9	22.2
Liant 5	17.3	23.4	21.9
Liant 6	19	23.4	24.8
Liant 7	22.8	32.8	34.1
Liant 8	7.1	11.6	16.7
Liant 9	12.6	28.7	26.2
Liant 10	*	14.8	*
Liant 11	13.2	16.7	17.7
Liant 12	*	21.7	*
Liant 13	*	11.1	*
Liant 14	12.7	17.1	19.5
Liant 15	6	8.4	9.3
Liant 16	7.5	10.5	12

	Teneur en asphaltènes (%)		
	Livraison	Récupération	Vieillissement
		0 an	RTFOT
Liant 1	15.3	19	20.3
Liant 2	17.6	21.5	21.5
Liant 3	15.2	20.1	19.3
Liant 4	17.4	*	21.6
Liant 5	14.9	19.2	19
Liant 6	16.1	*	20.4
Liant 7	16	*	20.3
Liant 8	14.5	17.9	18
Liant 9	*	*	*
Liant 10	15	18.6	*
Liant 11	14.3	18.3	17.5
Liant 12	15.3	19.3	*
Liant 13	16.2	22.7	*
Liant 14	*	*	*
Liant 15	12.5	17.2	16.6
Liant 16	12.9	17.1	16.5

* essai non réalisé

	Contrainte au seuil à 20°C (N/mm2)		
	Livraison	Récupération 0 an	Récupération 4 ans
Liant 1	0.16	0.53	0.58
Liant 2	0.30	0.82	1.03
Liant 3	0.27	0.28	0.45
Liant 4	0.24	0.61	0.93
Liant 5	0.15	0.44	0.62
Liant 6	0.17	0.41	0.69
Liant 7	0.24	0.51	0.82
Liant 8	0.28	0.94	1.12
Liant 9	0.20	0.59	1.07
Liant 10	*	0.53	0.73
Liant 11	0.13	0.20	0.31
Liant 12	*	0.37	0.62
Liant 13	*	0.61	0.75
Liant 14	0.21	0.33	0.61
Liant 15	0.19	0.34	0.50
Liant 16	0.38	0.45	0.82

Contrainte à la rupture, -10°C (M/mm2)		
Livraison	Récupération 0 an	Récupération 4 ans
*	*	*
*	*	*
2.54	4.55	5.46
*2.72 **)*	2.70	5.76
2.08	4.25	4.28
*4.77 **)*	*3.13 **)*	6.24
3.46	3.68	5.61
*1.96 **)*	*2.78*	3.08
2.14	2.02	3.49
*	4.06	3.17
*2.09 **)*	*2.32 **)*	3.75
*	2.56	2.24
*	*	*
*33.7 **)*	*23.2 **)*	1.93
*	*	*
*	*	*

	Contrainte au seuil à 20°C (N/mm2)			
	Livraison	Récupération 0 an	Vieillissement artificiel	
			RTFOT	DIN
Liant 1	0.16	0.53	0.43	0.37
Liant 2	0.30	0.82	0.65	0.64
Liant 3	0.27	0.28	0.29	0.27
Liant 4	0.24	0.61	0.52	0.47
Liant 5	0.15	0.44	0.34	0.31
Liant 6	0.17	0.41	0.35	0.31
Liant 7	0.24	0.51	0.49	0.51
Liant 8	0.28	0.94	0.87	0.83
Liant 9	0.20	0.59	0.47	0.36
Liant 10	*	0.53	*	*
Liant 11	0.13	0.20	0.25	0.21
Liant 12	*	0.37	*	*
Liant 13	*	0.61	*	*
Liant 14	0.21	0.33	0.33	0.35
Liant 15	0.19	0.34	0.37	0.35
Liant 16	0.38	0.45	0.57	0.53

Contrainte à la rupture, -10°C (M/mm2)			
Livraison	Récupération 0 an	Vieillissement artificiel	
		RTFOT	DIN
*	*	*	*
*	*	*	*
2.54	4.55	3.17	2.98
*2.72 **)*	2.70	4.27	2.26
2.08	4.25	4.01	3.69
*4.77 **)*	*3.13 *)*	2.04	3.93
3.46	3.68	4.05	3.12
*1.96 **)*	2.78	3.70	2.60
2.14	2.02	3.84	2.73
*	4.06	*	*
*2.09 **)*	*2.32 **)*	4.50	3.31
*	2.56	*	*
*	*	*	*
*33.7 **)*	*23.2 **)*	3.60	2.42
*	*	*	*
*	*	*	*

* essai non réalisé
**) contrainte au seuil
Les valeurs en italiques correspondent aux essais réalisés au LCPC

	Retour élastique à 25°C (%)			
	Livraison	Récupération 0 an	Récupération 2 ans	Récupération 4 ans
Liant 1	14.0	12.5	12.5	13.8
Liant 2	14.0	15.5	15.5	**
Liant 3	78.0	78.0	78.0	75.3
Liant 4	78.0	58.5	58.5	67.3
Liant 5	100.0	84.5	84.3	81.3
Liant 6	97.0	89.8	89.8	82.5
Liant 7	64.0	61.5	61.5	59.8
Liant 8	30.0	**	**	**
Liant 9	60.0	**	**	**
Liant 10	*	**	**	**
Liant 11	82.0	77.3	77.3	73.0
Liant 12	*	54.0	54.0	0.0
Liant 13	*	17.0	17.0	15.8
Liant 14	58.0	61.3	61.3	**
Liant 15	15.0	11.5	11.5	15.3
Liant 16	10.0	12.5	12.5	15.0

	Ductilité à 7 °C (mm)		
	Livraison	Récupération 0 an	Récupération 4 ans
Liant 1	74	38	2
Liant 2	37	11	2
Liant 3	475	170	8
Liant 4	260	65	7
Liant 5	592	314	12
Liant 6	483	183	8
Liant 7	197	76	4
Liant 8	39	25	3
Liant 9	76	*	6
Liant 10	*	34	29
Liant 11	498	134	91
Liant 12	*	63	53
Liant 13	*	5	4
Liant 14	87	53	6
Liant 15	108	45	3
Liant 16	65	8	3

	Retour élastique à 25°C (%)		
	Livraison	Récupération 0 an	Vieillissement RTFOT
Liant 1	14.0	12.5	15.0
Liant 2	14.0	15.5	15.0
Liant 3	78.0	78.0	77.0
Liant 4	78.0	58.5	70.0
Liant 5	100.0	84.5	91.0
Liant 6	97.0	89.8	92.0
Liant 7	64.0	61.5	58.0
Liant 8	30.0	**	40.0
Liant 9	60.0	**	58.0
Liant 10	*	**	**
Liant 11	82.0	77.3	78.0
Liant 12	*	54.0	**
Liant 13	*	17.0	**
Liant 14	58.0	61.3	61.0
Liant 15	15.0	11.5	16.0
Liant 16	10.0	12.5	12.0

	Ductilité à 7 °C (mm)		
	Livraison	Récupération 0 an	Vieillissement RTFOT
Liant 1	74	38	35
Liant 2	37	11	25
Liant 3	475	170	208
Liant 4	260	65	137
Liant 5	592	314	413
Liant 6	483	183	310
Liant 7	197	76	108
Liant 8	39	25	21
Liant 9	76	*	44
Liant 10	*	34	*
Liant 11	498	134	218
Liant 12	*	63	*
Liant 13	*	5	*
Liant 14	87	53	57
Liant 15	108	45	39
Liant 16	65	8	23

* essai non réalisé
** fil rompu

	Pénétration à 5°C (1/10 mm)	
	Livraison	Récupération 0 an
Liant 1	9	7
Liant 2	7	5
Liant 3	11	8
Liant 4	10	7
Liant 5	9	8
Liant 6	10	7
Liant 7	8	8
Liant 8	11	10
Liant 9	12	7
Liant 10	*	9
Liant 11	11	9
Liant 12	*	10
Liant 13	*	6
Liant 14	11	9
Liant 15	9	8
Liant 16	8	7

	Pénétration à 15°C (1/10 mm)		
	Livraison	Récupération 0 an	Récupération 4 ans
Liant 1	23	18	14
Liant 2	18	14	9
Liant 3	27	21	17
Liant 4	21	16	12
Liant 5	27	19	14
Liant 6	25	19	13
Liant 7	21	17	13
Liant 8	26	18	15
Liant 9	27	15	13
Liant 10	*	20	15
Liant 11	28	24	18
Liant 12	*	21	19
Liant 13	*	14	14
Liant 14	26	20	16
Liant 15	25	19	16
Liant 16	19	16	14

	Pénétration à 35°C (1/10 mm)		
	Livraison	Récupération 0 an	Récupération 4 ans
Liant 1	207	106	85
Liant 2	112	69	43
Liant 3	176	115	86
Liant 4	128	76	51
Liant 5	135	100	71
Liant 6	136	94	63
Liant 7	116	73	49
Liant 8	130	70	50
Liant 9	138	60	45
Liant 10	*	85	68
Liant 11	169	126	95
Liant 12	*	88	74
Liant 13	*	82	70
Liant 14	128	93	67
Liant 15	177	121	89
Liant 16	157	95	56

	Viscosité dynamique à 60°C (10-1 Pa.s)		
	Livraison	Récupération 0 an	Récupération 4 ans
Liant 1	2058.2	4587.8	8872
Liant 2	4004.6	13510.8	47840
Liant 3	4315.7	10521.9	17334
Liant 4	5161.3	15211.8	45563
Liant 5	3926.9	9214.6	22599
Liant 6	14142.6	25247.7	44803
Liant 7	8893.8	22963.5	43740
Liant 8	5676.5	12490.2	*
Liant 9	6104.2	20144.7	*
Liant 10	*	13510.8	23895
Liant 11	5452.9	9127.1	15309
Liant 12	*	10619.1	22583
Liant 13	*	8028.7	16654
Liant 14	4218.5	12538.8	33291
Liant 15	1749.6	3888	8586
Liant 16	2711.9	6055.6	18387

	Viscosité dynamique à 90°C (10-1 Pa.s)		
	Livraison	Récupération 0 an	Récupération 4 ans
Liant 1	71.7	142.5	215
Liant 2	133.7	298.4	785
Liant 3	126.6	222.1	481
Liant 4	186.6	367.4	907
Liant 5	175.9	293.1	663
Liant 6	266.3	414.1	1319
Liant 7	268.3	499.6	1264
Liant 8	105.8	313.5	1996
Liant 9	184.9	476.3	1631
Liant 10	*	238.6	595
Liant 11	173.4	245.9	507
Liant 12	*	306.7	782
Liant 13	*	201.2	387
Liant 14	190.5	287.7	854
Liant 15	79.7	132.8	243
Liant 16	111.4	182.3	413

	Viscosité dynamique à 150°C (10-1 Pa.s)		
	Livraison	Récupération 0 an	Récupération 4 ans
Liant 1	2.2	3.2	3.9
Liant 2	3.2	4.9	7.3
Liant 3	3.9	4.9	5.8
Liant 4	5.6	7.5	10.1
Liant 5	6.5	8	9.5
Liant 6	7.5	8.5	10
Liant 7	9.3	11.8	15.3
Liant 8	2.9	4.4	6.1
Liant 9	4.9	9.7	16.4
Liant 10	*	5.8	8
Liant 11	5.3	6.6	8.1
Liant 12	*	8	10.3
Liant 13	*	4.1	5.4
Liant 14	4.8	6.1	9.2
Liant 15	2.5	3.3	4.6
Liant 16	2.9	4	5.8

* essai non réalisé

	Viscosité dynamique à 60°C (10-1 Pa.s)		
	Livraison	Récupération 0 an	Vieillissement RTFOT
Liant 1	2058.2	4587.8	16572.6
Liant 2	4004.6	13510.8	16499.7
Liant 3	4315.7	10521.9	12636
Liant 4	5161.3	15211.8	19610.1
Liant 5	3926.9	9214.6	11348.1
Liant 6	14142.6	25247.7	36693
Liant 7	8893.8	22963.5	23376.6
Liant 8	5676.5	12490.2	15503.4
Liant 9	6104.2	20144.7	31916.4
Liant 10	*	13510.8	*
Liant 11	5452.9	9127.1	12004.2
Liant 12	*	10619.1	*
Liant 13	*	8028.7	*
Liant 14	4218.5	12538.8	16499.7
Liant 15	1749.6	3888	5015.5
Liant 16	2711.9	6055.6	8334.9

	Viscosité dynamique à 90°C (10-1 Pa.s)		
	Livraison	Récupération 0 an	Vieillissement RTFOT
Liant 1	71.7	142.5	390.3
Liant 2	133.7	298.4	318.3
Liant 3	126.6	222.1	245.9
Liant 4	186.6	367.4	411.6
Liant 5	175.9	293.1	317.4
Liant 6	266.3	414.1	458.3
Liant 7	268.3	499.6	484.1
Liant 8	105.8	313.5	467.5
Liant 9	184.9	476.3	455.9
Liant 10	*	238.6	*
Liant 11	173.4	245.9	289.2
Liant 12	*	306.7	*
Liant 13	*	201.2	*
Liant 14	190.5	287.7	338.3
Liant 15	79.7	132.8	155.5
Liant 16	111.4	182.3	219.7

	Viscosité dynamique à 150°C (10-1 Pa.s)		
	Livraison	Récupération 0 an	Vieillissement RTFOT
Liant 1	2.2	3.2	8.8
Liant 2	3.2	4.9	5
Liant 3	3.9	4.9	5.1
Liant 4	5.6	7.5	7.7
Liant 5	6.5	8	8
Liant 6	7.5	8.5	8.8
Liant 7	9.3	11.8	12.4
Liant 8	2.9	4.4	5.2
Liant 9	4.9	9.7	9
Liant 10	*	5.8	*
Liant 11	5.3	6.6	6.6
Liant 12	*	8	*
Liant 13	*	4.1	*
Liant 14	4.8	6.1	7
Liant 15	2.5	3.3	2.8
Liant 16	2.9	4	4.4

	Viscosité dynamique à 170°C (10-1 Pa.s)		
	Livraison	Récupération 0 an	Récupération 4 ans
Liant 1	1.1	1.5	1.7
Liant 2	1.5	2.1	3
Liant 3	1.9	2.4	2.7
Liant 4	2.6	3.2	4.3
Liant 5	3.4	3.7	4.2
Liant 6	3.6	3.8	4.4
Liant 7	4.3	5.2	6.4
Liant 8	1.4	2	2.7
Liant 9	2.2	4	6.2
Liant 10	*	2.7	3.7
Liant 11	2.6	3	3.5
Liant 12	*	3.5	4.5
Liant 13	*	1.8	2.4
Liant 14	2.3	2.8	4
Liant 15	1.1	1.5	2
Liant 16	1.3	1.8	2.6

	Viscosité dynamique à 170°C (10-1 Pa.s)		
	Livraison	Récupération 0 an	Vieillissement RTFOT
Liant 1	1.1	1.5	3.9
Liant 2	1.5	2.1	2.1
Liant 3	1.9	2.4	2.4
Liant 4	2.6	3.2	3.4
Liant 5	3.4	3.7	3.7
Liant 6	3.6	3.8	4.1
Liant 7	4.3	5.2	5.4
Liant 8	1.4	2	2.4
Liant 9	2.2	4	3.9
Liant 10	*	2.7	*
Liant 11	2.6	3	3
Liant 12	*	3.5	*
Liant 13	*	1.8	*
Liant 14	2.3	2.8	3.2
Liant 15	1.1	1.5	1.7
Liant 16	1.3	1.8	2.1

	Densité (-)		
	Livraison	Récupération 0 an	Récupération 4 ans
Liant 1	1.03	1.04	1.05
Liant 2	1.03	1.02	1.05
Liant 3	1.02	1.03	1.04
Liant 4	1.02	1.03	1.04
Liant 5	1.02	1.02	1.04
Liant 6	1.01	1.03	1.04
Liant 7	1.01	1.02	1.03
Liant 8	1.01	1.02	1.03
Liant 9	1.02	1.05	1.04
Liant 10	*	1.02	1.03
Liant 11	1.02	1.04	1.04
Liant 12	*	1.03	1.04
Liant 13	*	1.04	1.05
Liant 14	1.02	1.03	1.03
Liant 15	1.03	1.04	1.04
Liant 16	1.03	1.04	1.04

* essai non réalisé

ANNEXE F

Graphiques reprenant l'évolution des caractéristiques des liants au cours du temps

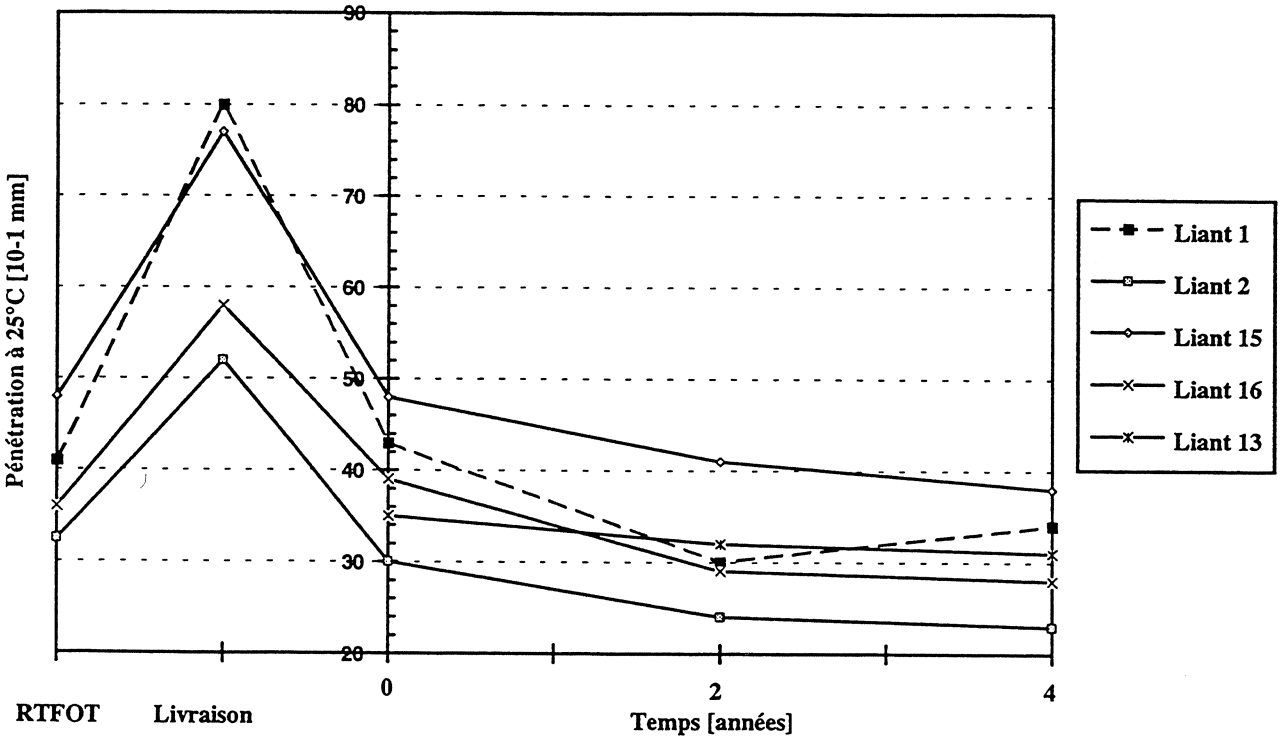


Figure F.1: *Evolution du résultat de la pénétration à 25 °C: Bitumes classiques et avec addition d'asphalte naturel*

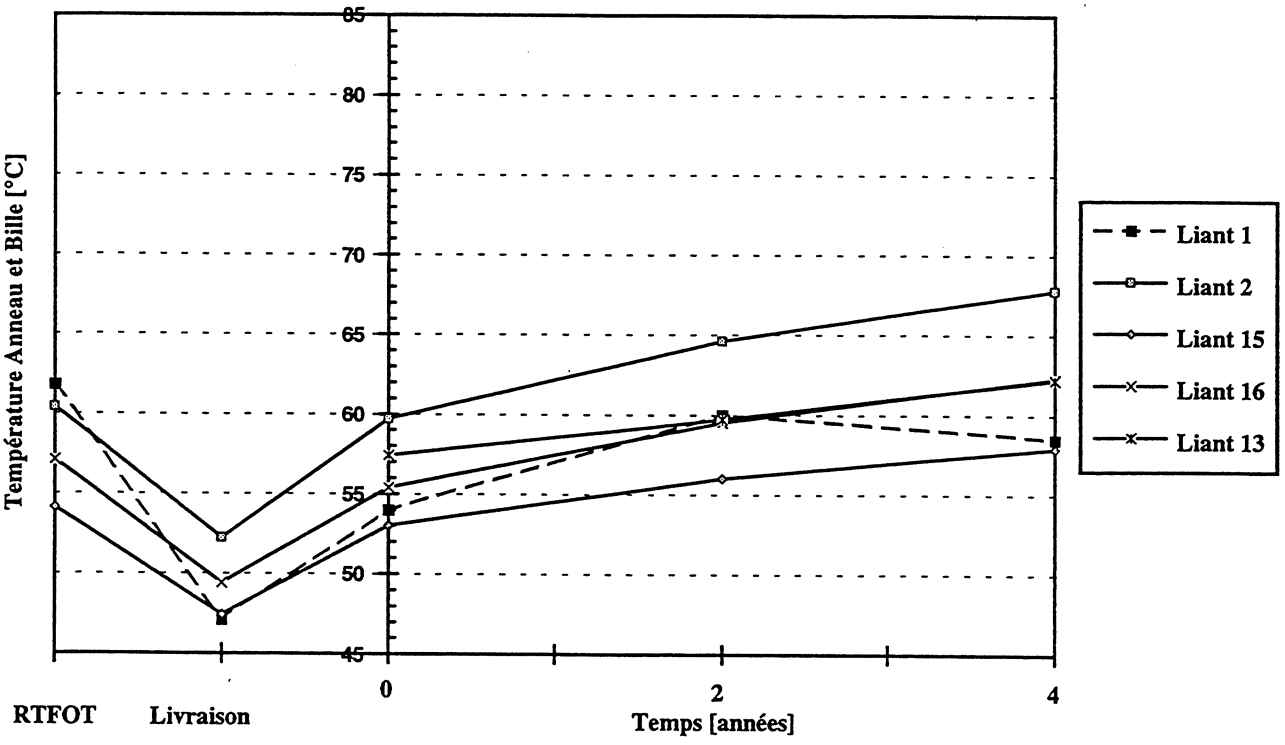


Figure F.2: *Evolution du résultat de la température anneau et bille: Bitumes classiques et avec addition d'asphalte naturel*

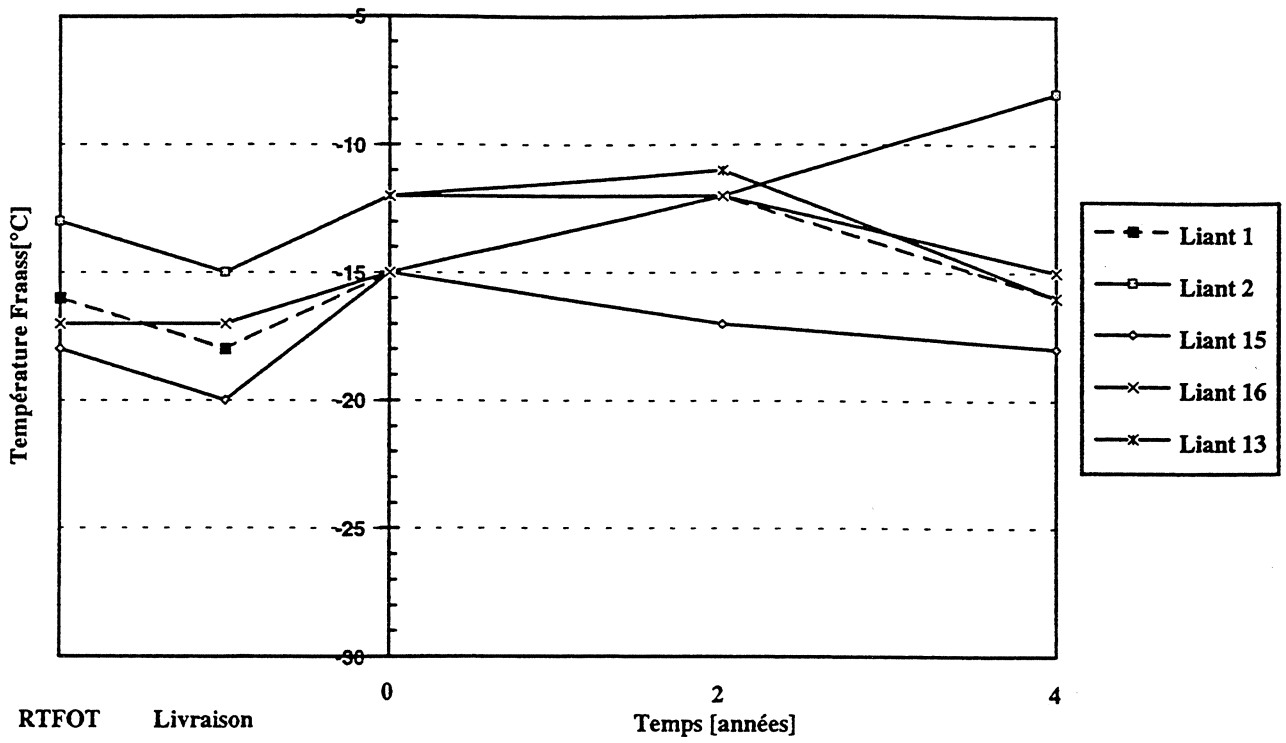


Figure F.3: *Evolution du résultat de la température Fraass: Bitumes classiques et avec addition d'asphalte naturel*

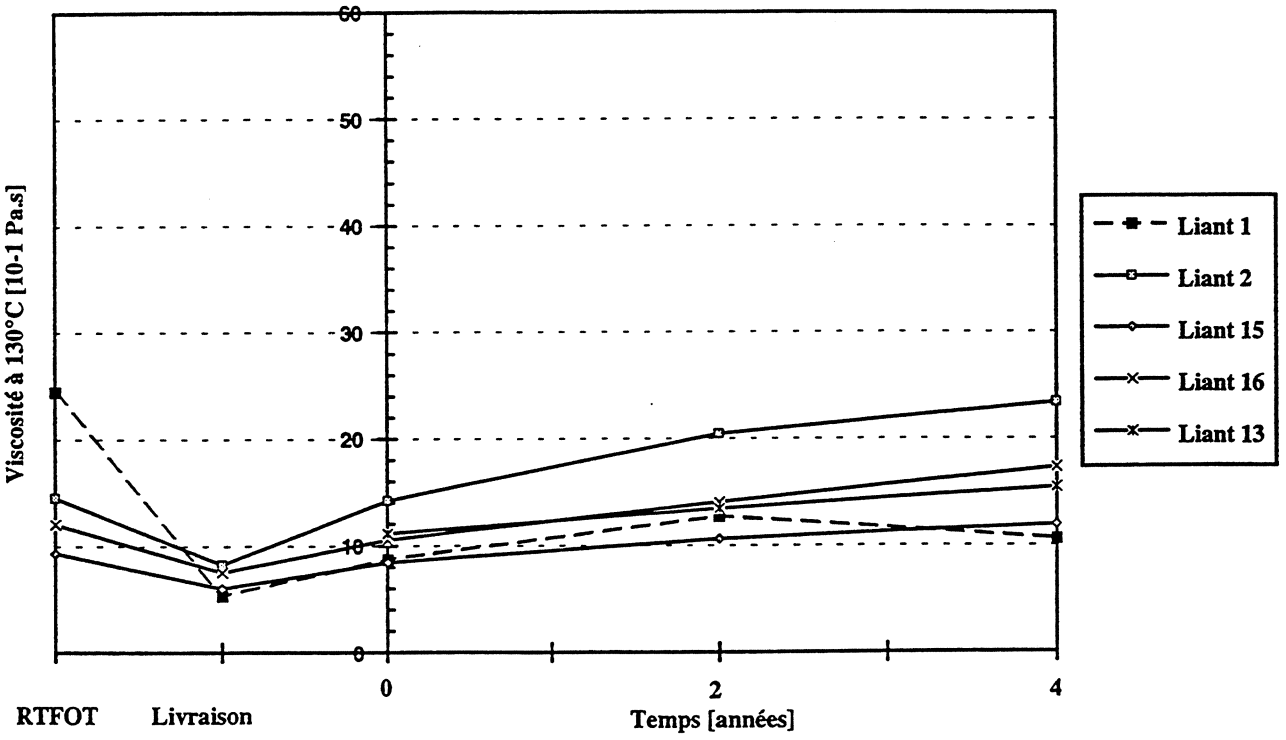


Figure F.4: *Evolution du résultat de la viscosité dynamique à 130 °C: Bitumes classiques et avec addition d'asphalte naturel*

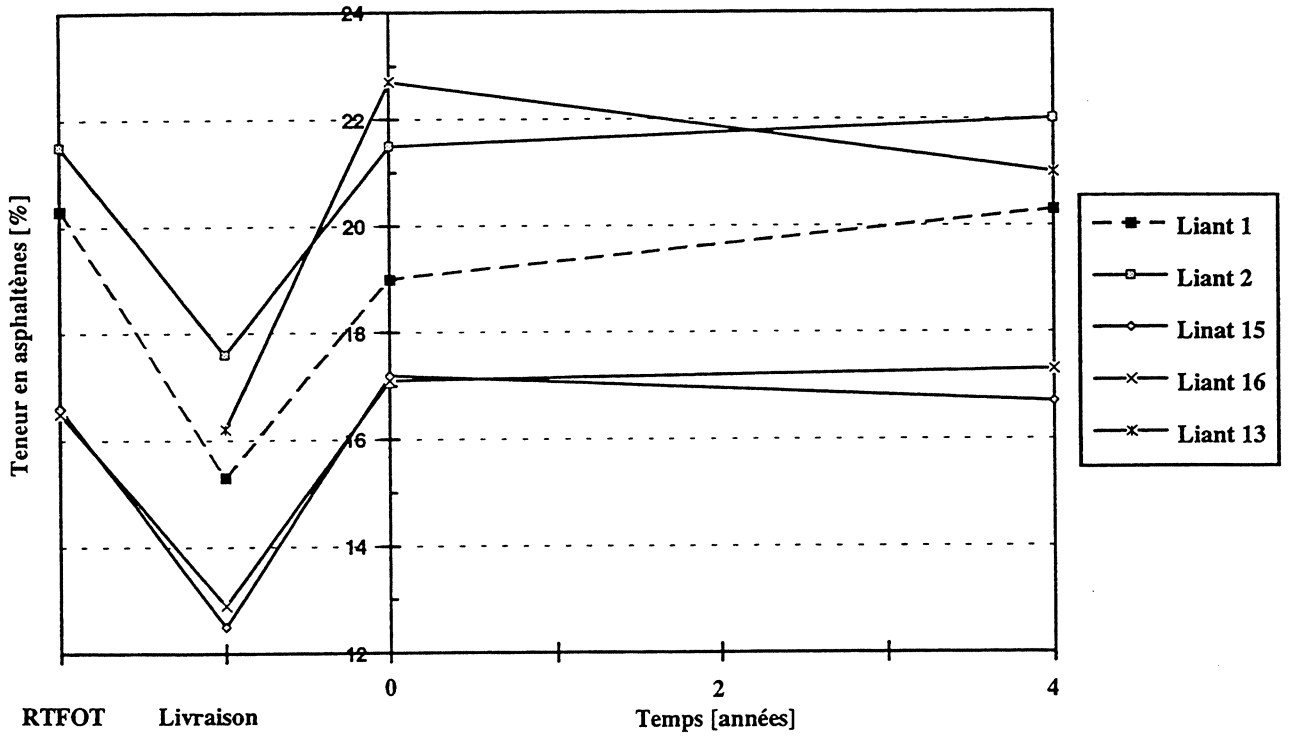


Figure F.5: *Evolution du résultat de la teneur en asphaltènes: Bitumes classiques et avec addition d'asphalte naturel*

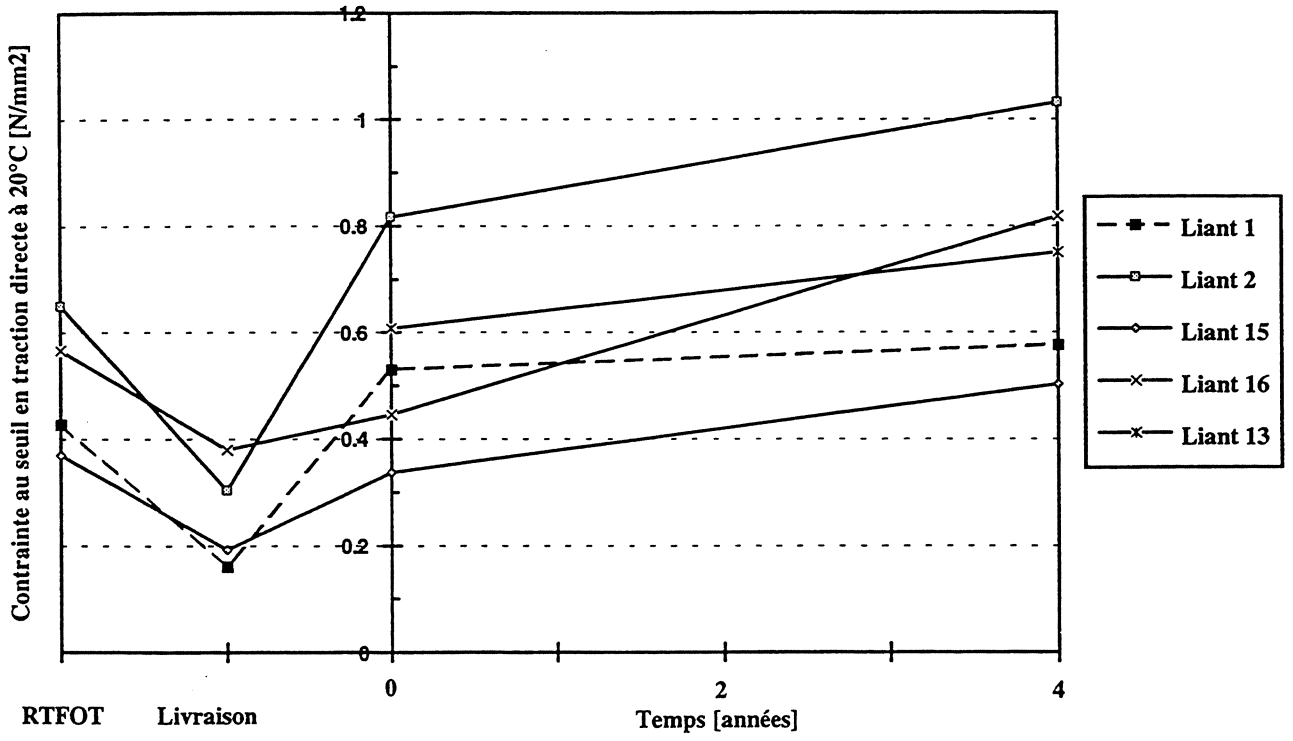


Figure F.6: *Evolution du résultat de la contrainte au seuil en traction directe à +20 °C: Bitumes classiques et avec addition d'asphalte naturel*

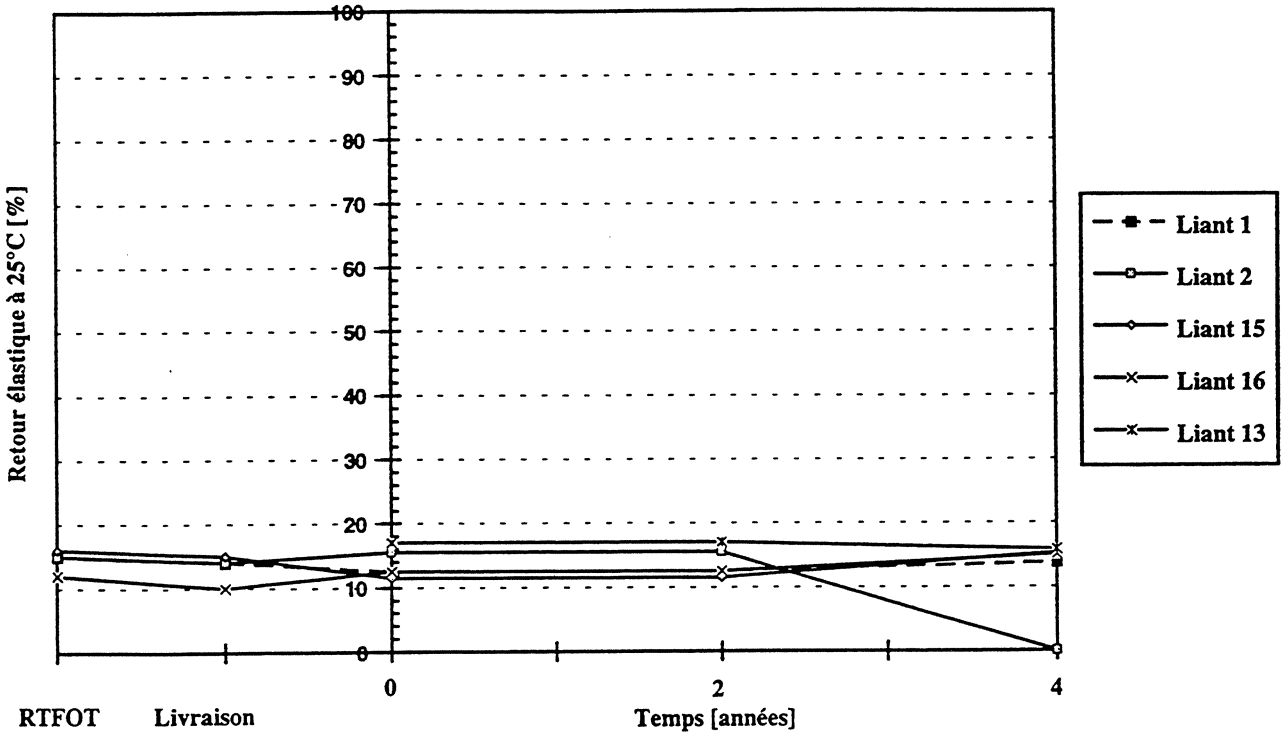


Figure F.7: *Evolution du résultat du retour élastique à 25 °C: Bitumes classiques et avec addition d'asphalte naturel*

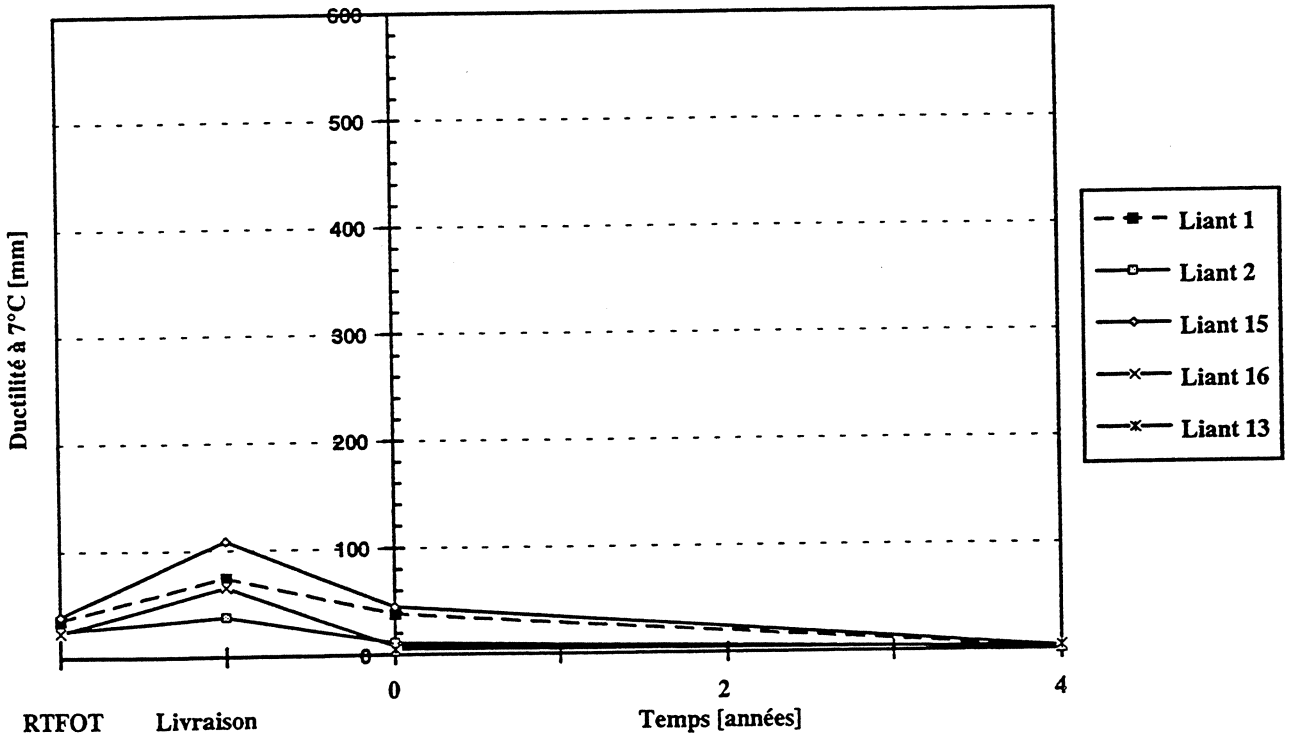


Figure F.8: *Evolution du résultat de la ductilité à 7 °C: Bitumes classiques et avec addition d'asphalte naturel*

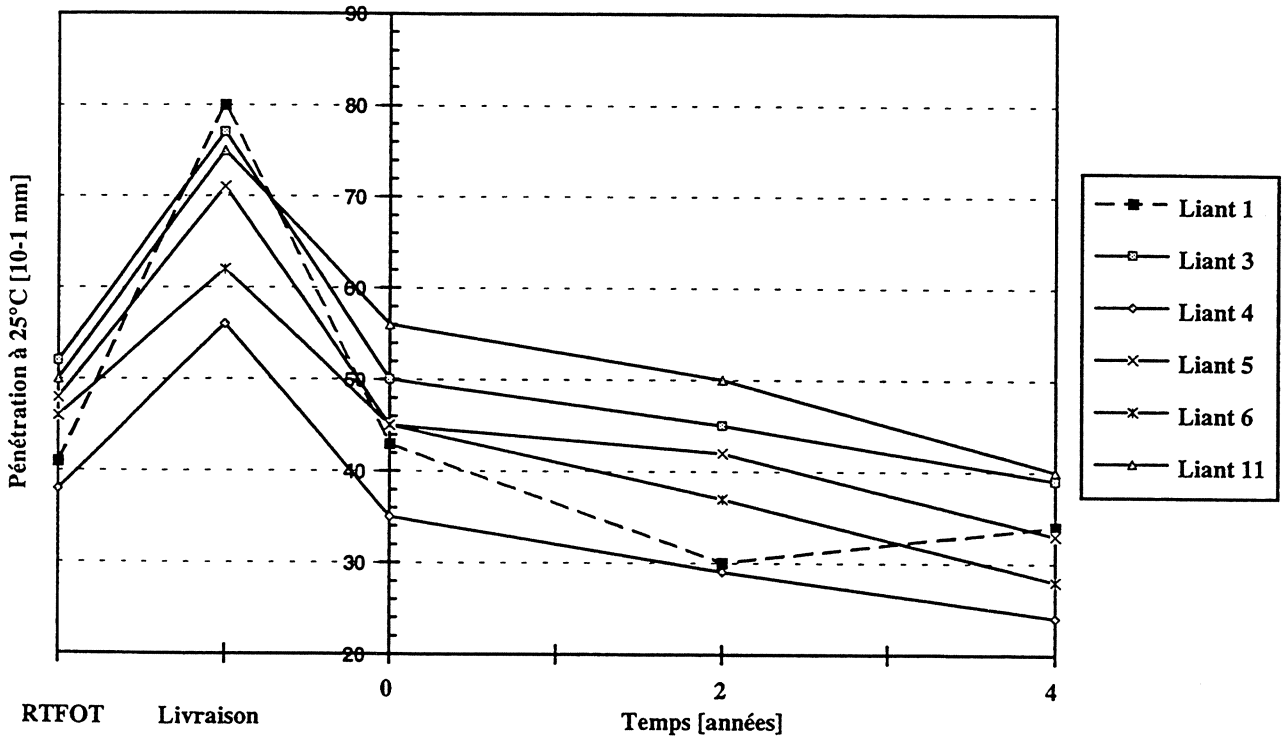


Figure F.9: *Evolution du résultat de la pénétration à 25 °C: Liants modifiés par addition de S.B.S*

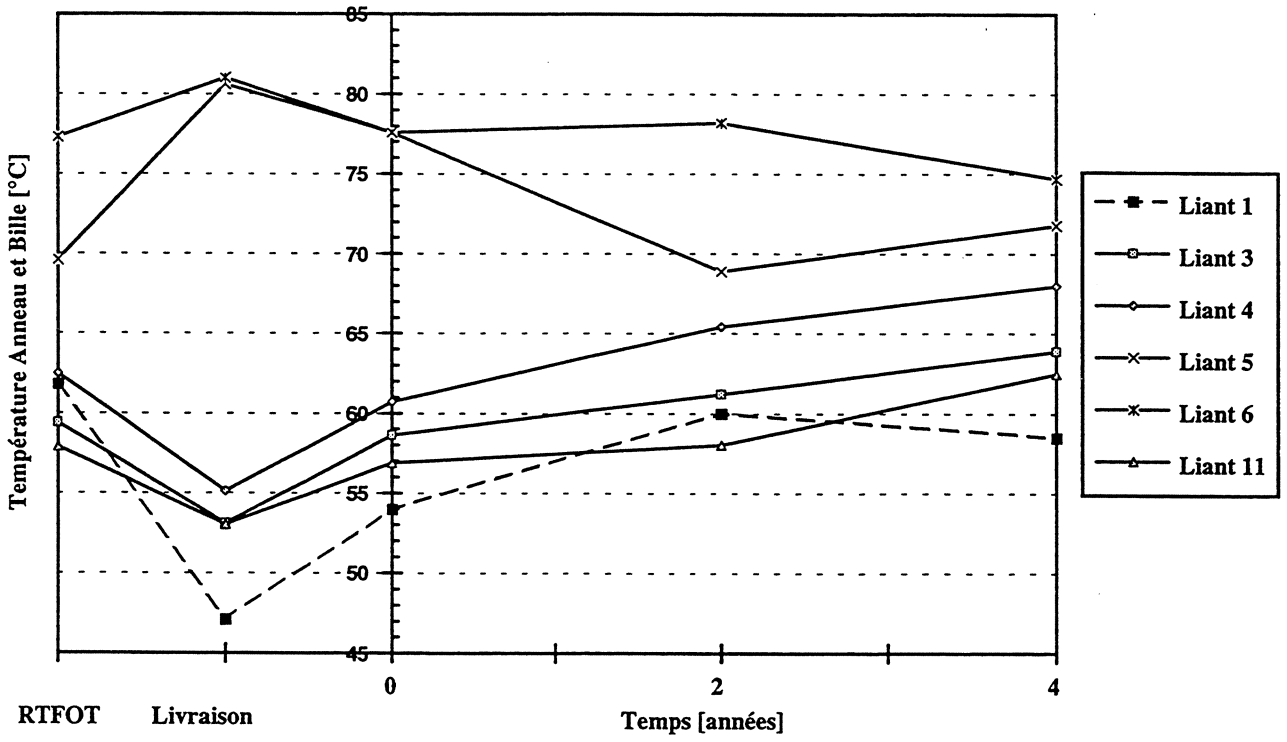


Figure F.10: *Evolution du résultat de la température anneau et bille: Liants modifiés par addition de S.B.S*

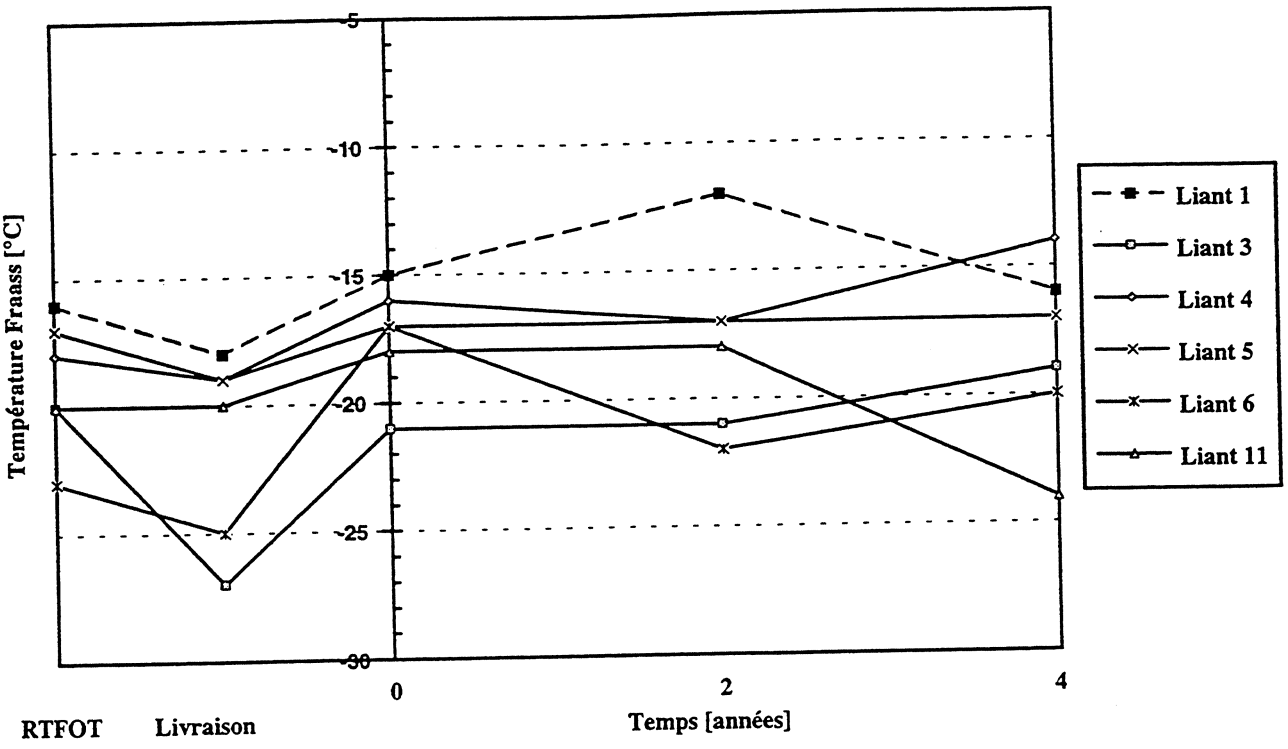


Figure F.11: *Evolution du résultat de température Fraass: Liants modifiés par addition de S.B.S*

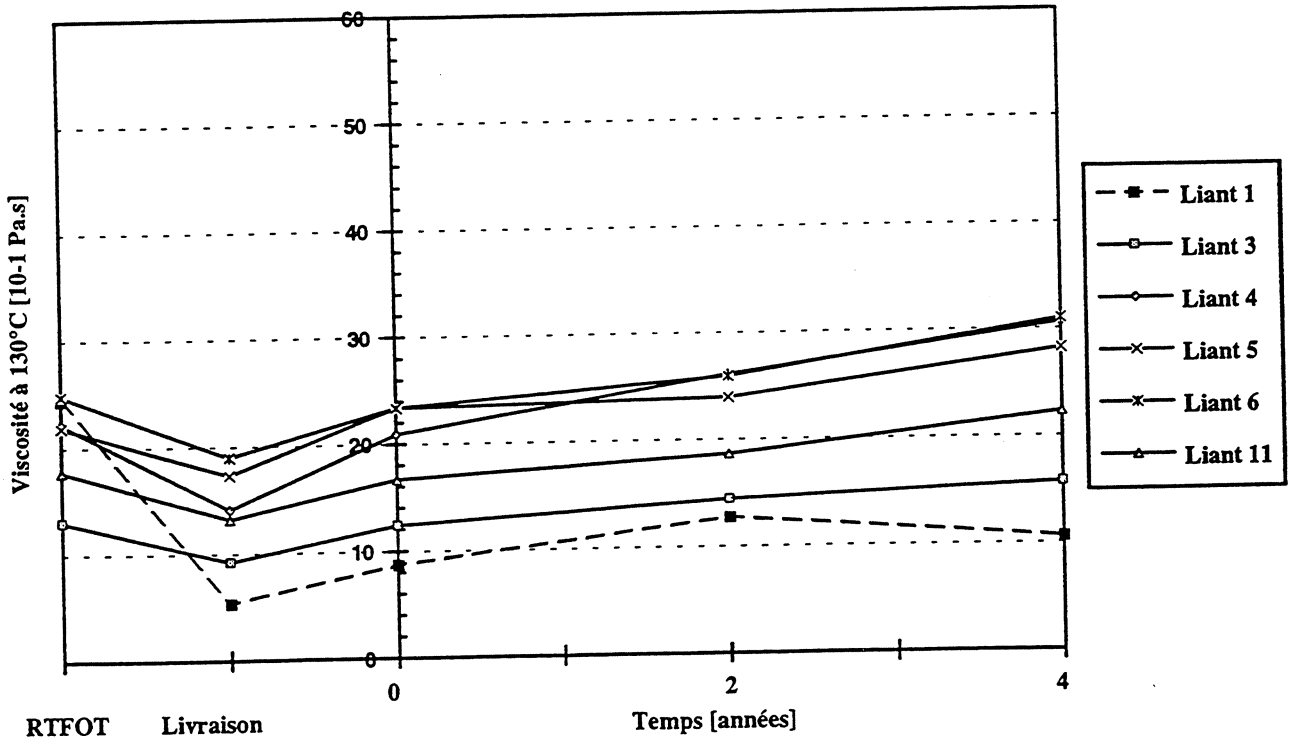


Figure F.12: *Evolution du résultat de la viscosité dynamique à 130 °C: Liants modifiés par addition de S.B.S*

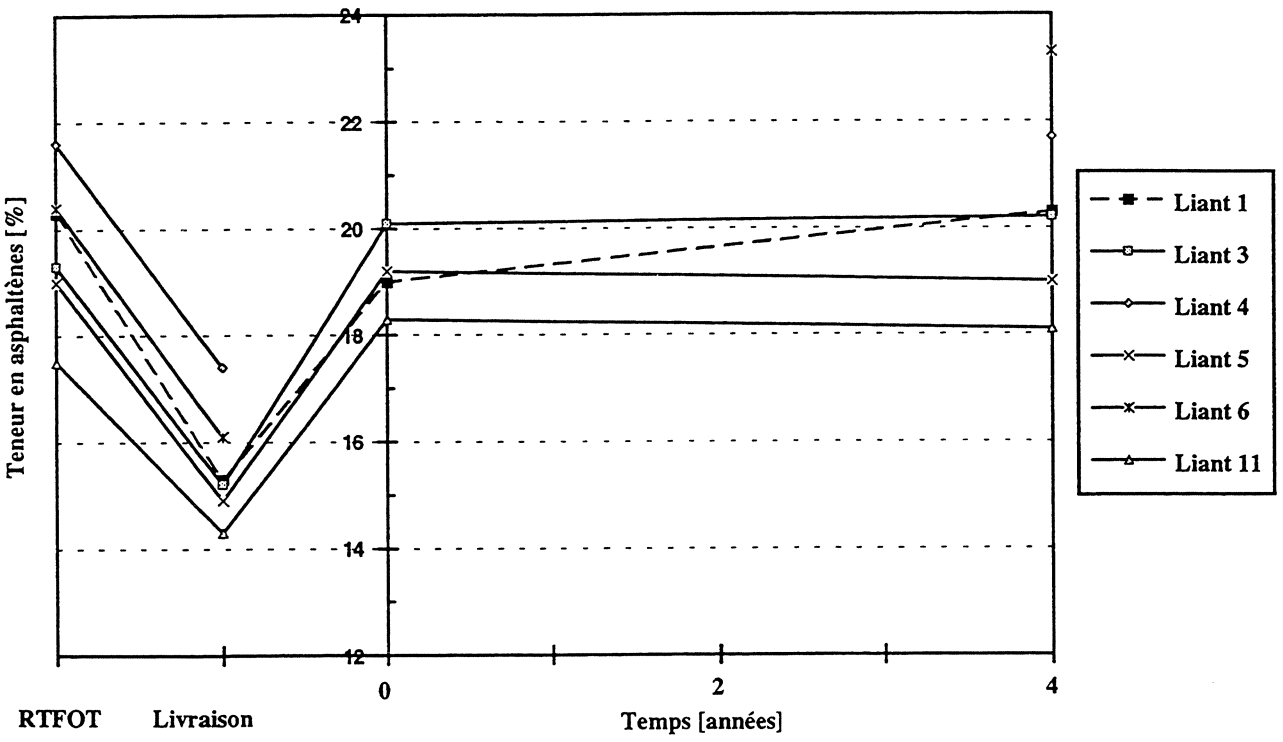


Figure F.13: *Evolution du résultat de la teneur en asphaltènes: Liants modifiés par addition de S.B.S*

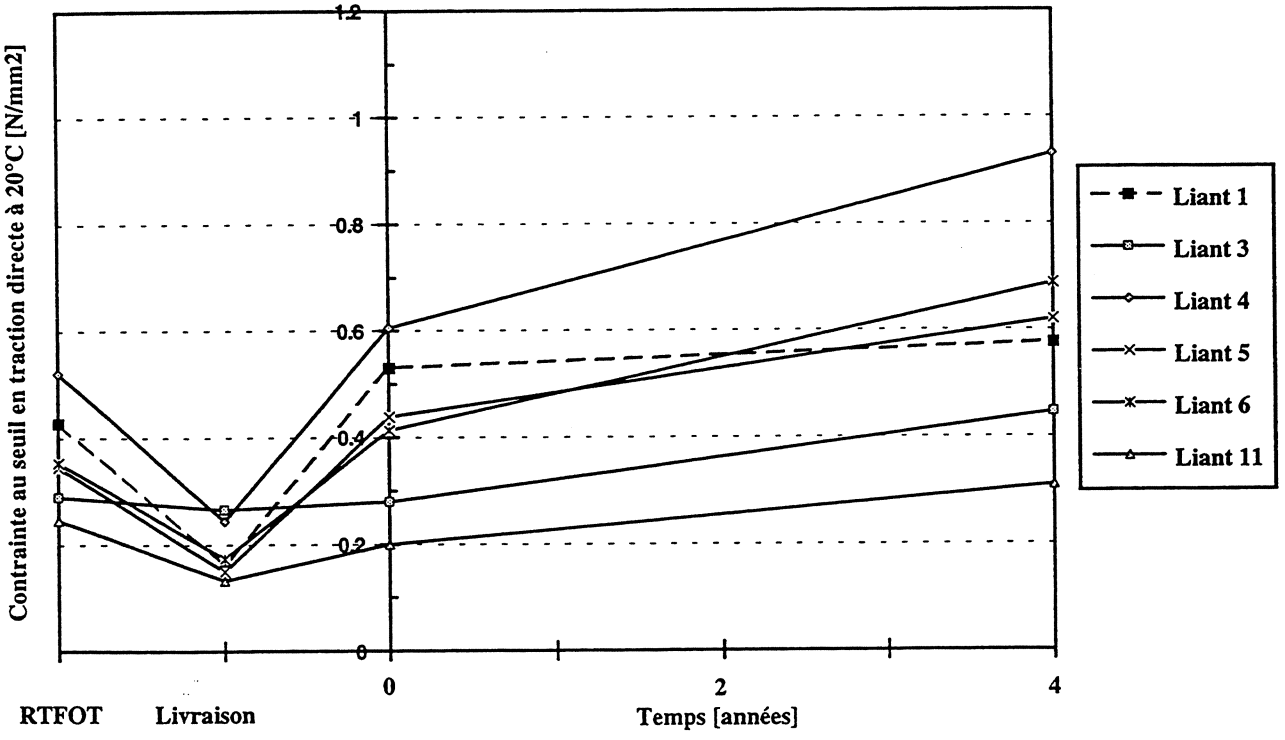


Figure F.14: *Evolution du résultat de la contrainte au seuil en traction directe à +20 °C: Liants modifiés par addition de S.B.S*

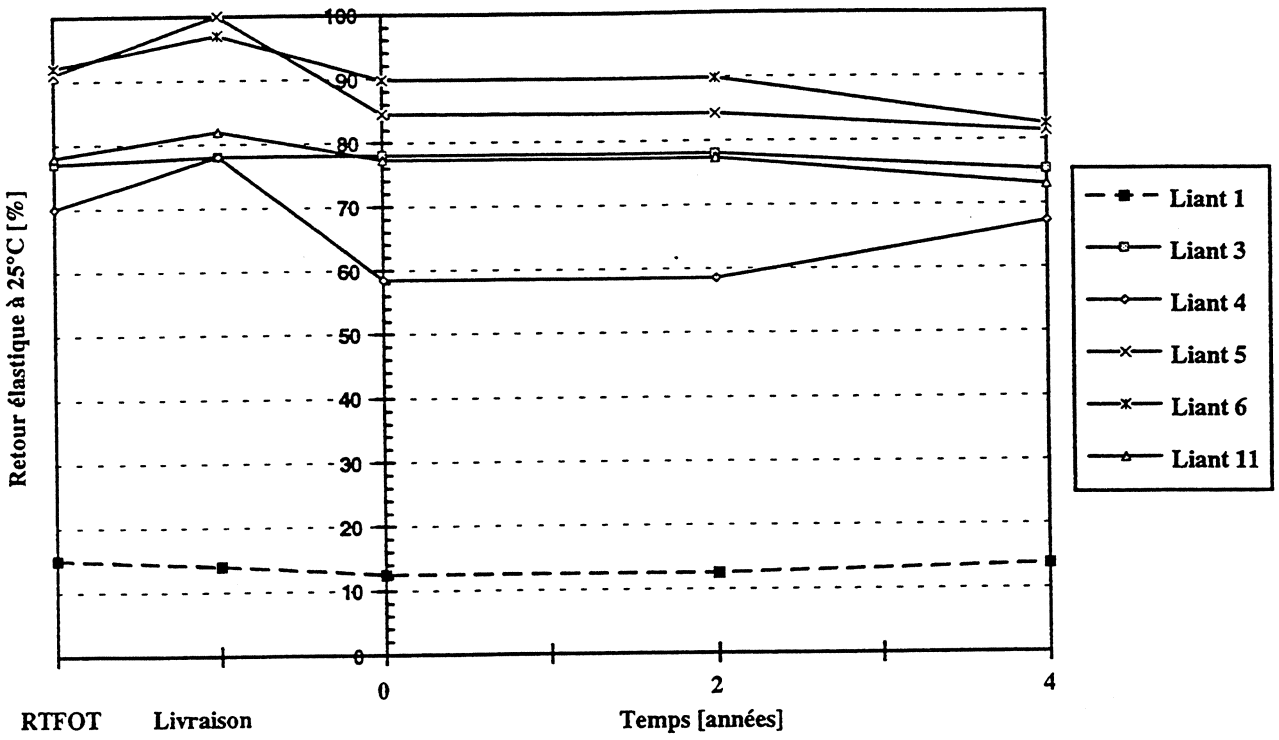


Figure F.15: *Evolution du résultat du retour élastique à 25 °C: Liants modifiés par addition de S.B.S*

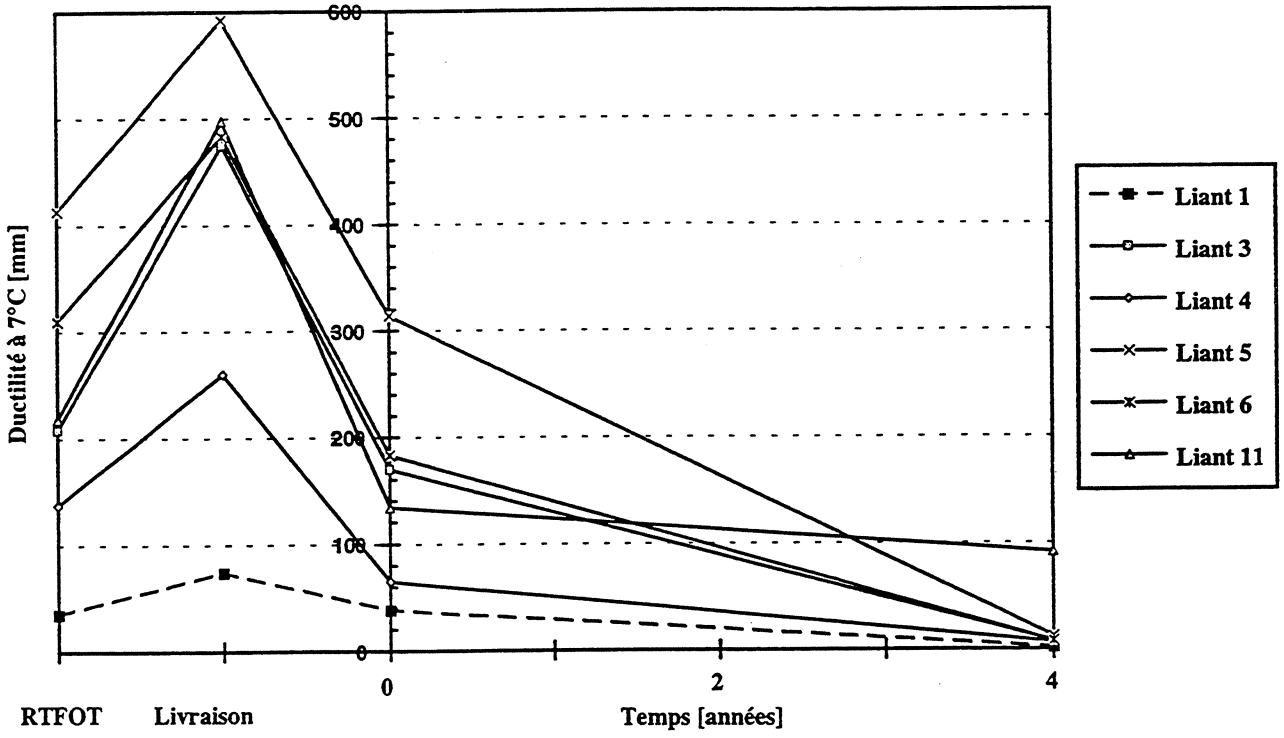


Figure F.16: *Evolution du résultat de la ductilité à 7 °C: Liants modifiés par addition de S.B.S*

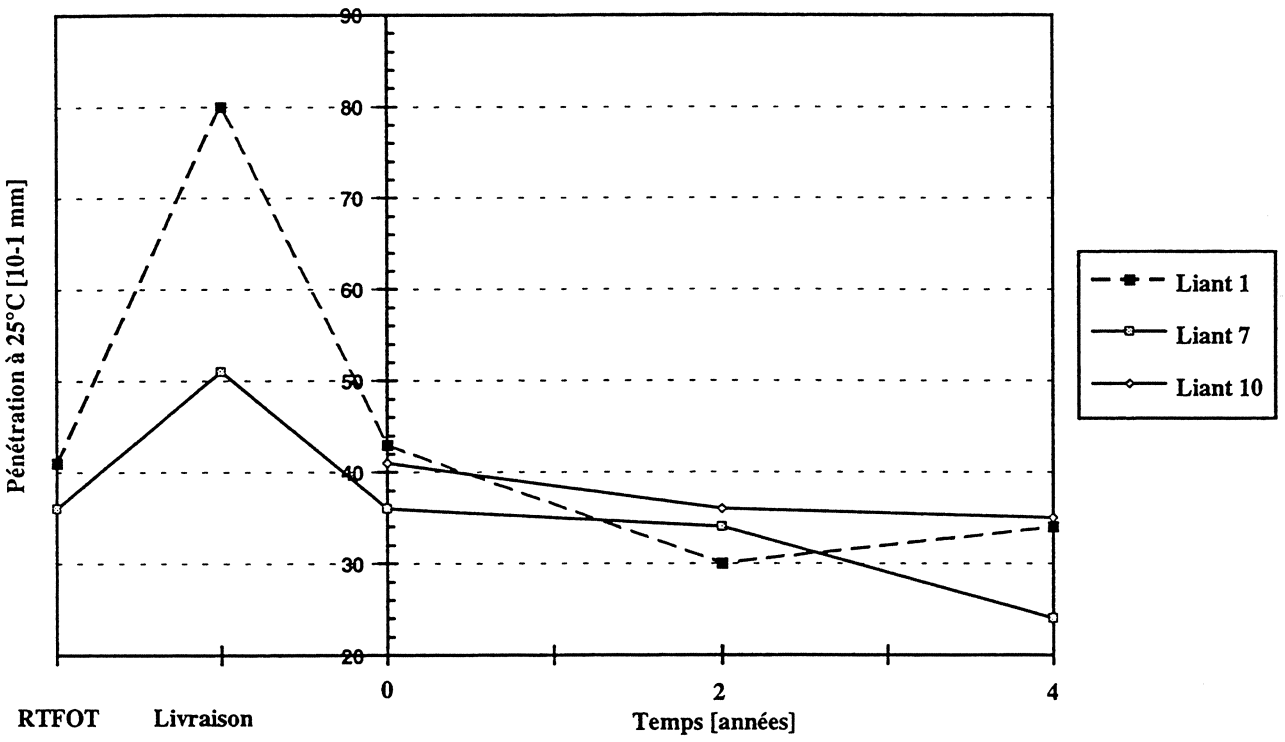


Figure F.17: *Evolution du résultat de la pénétration à 25 °C: Liants avec addition de polyoléfine*

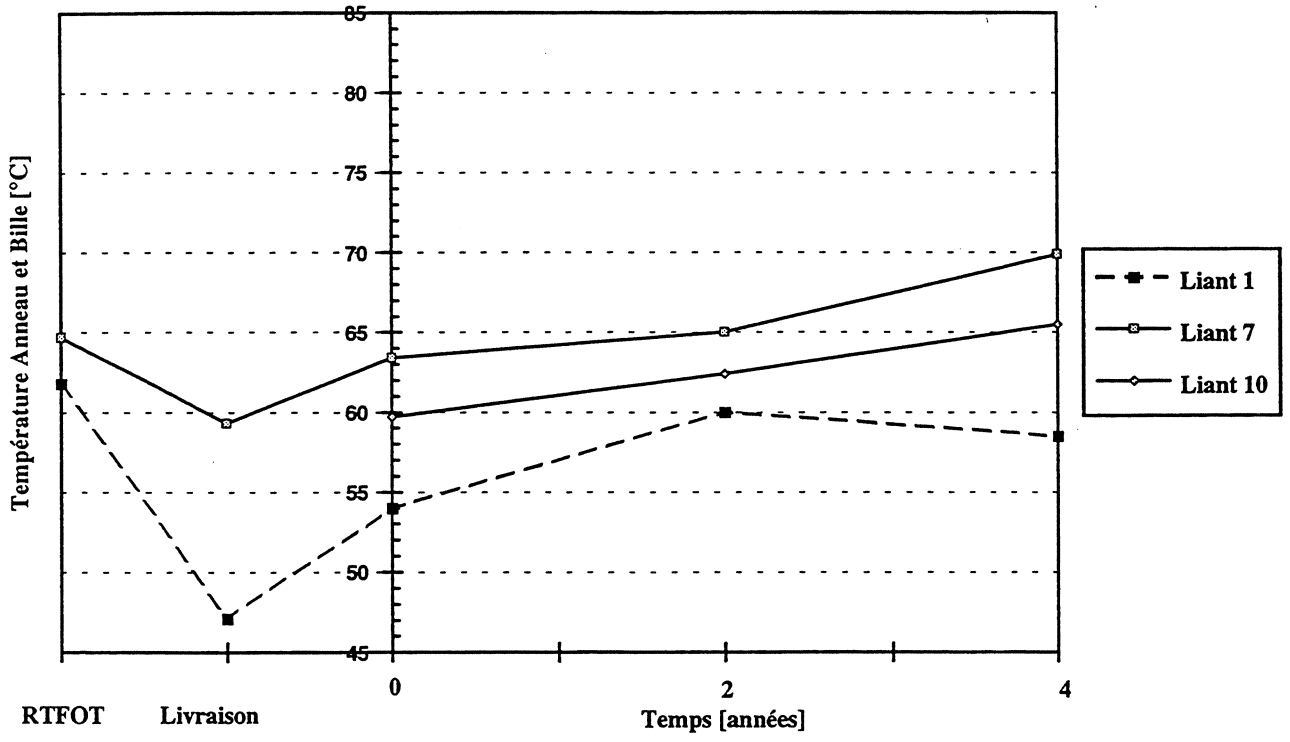


Figure F.18: *Evolution du résultat de la température anneau et bille: Liants avec addition de polyoléfine*

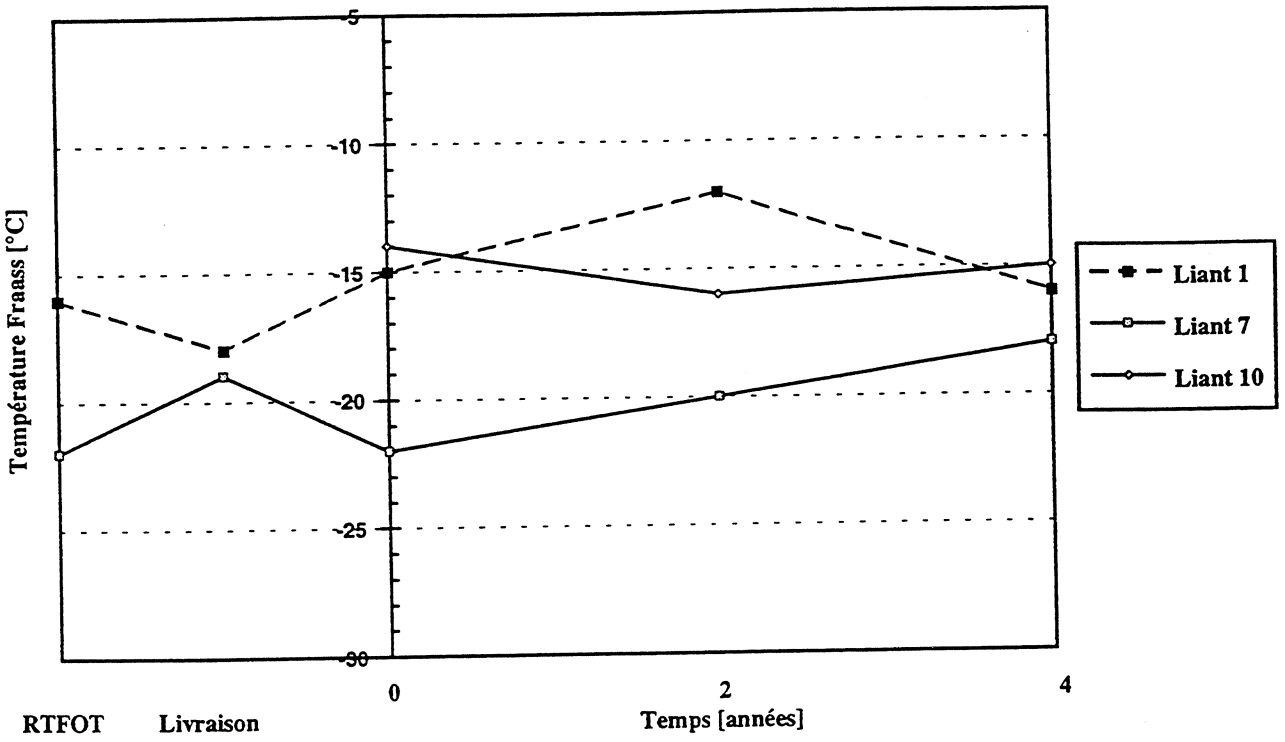


Figure F.19: *Evolution du résultat de température Fraass: Liants avec addition de polyoléfine*

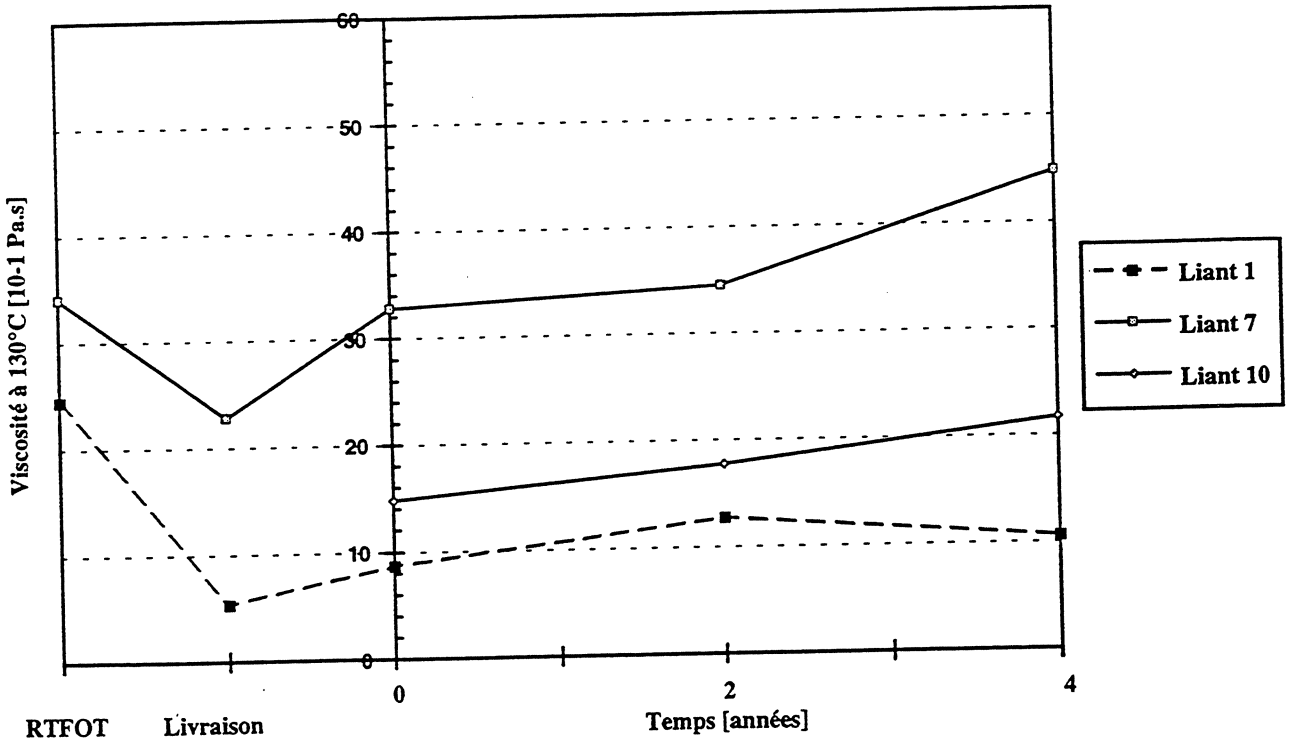


Figure F.20: *Evolution du résultat de la viscosité dynamique à 130 °C: Liants avec addition de polyoléfine*

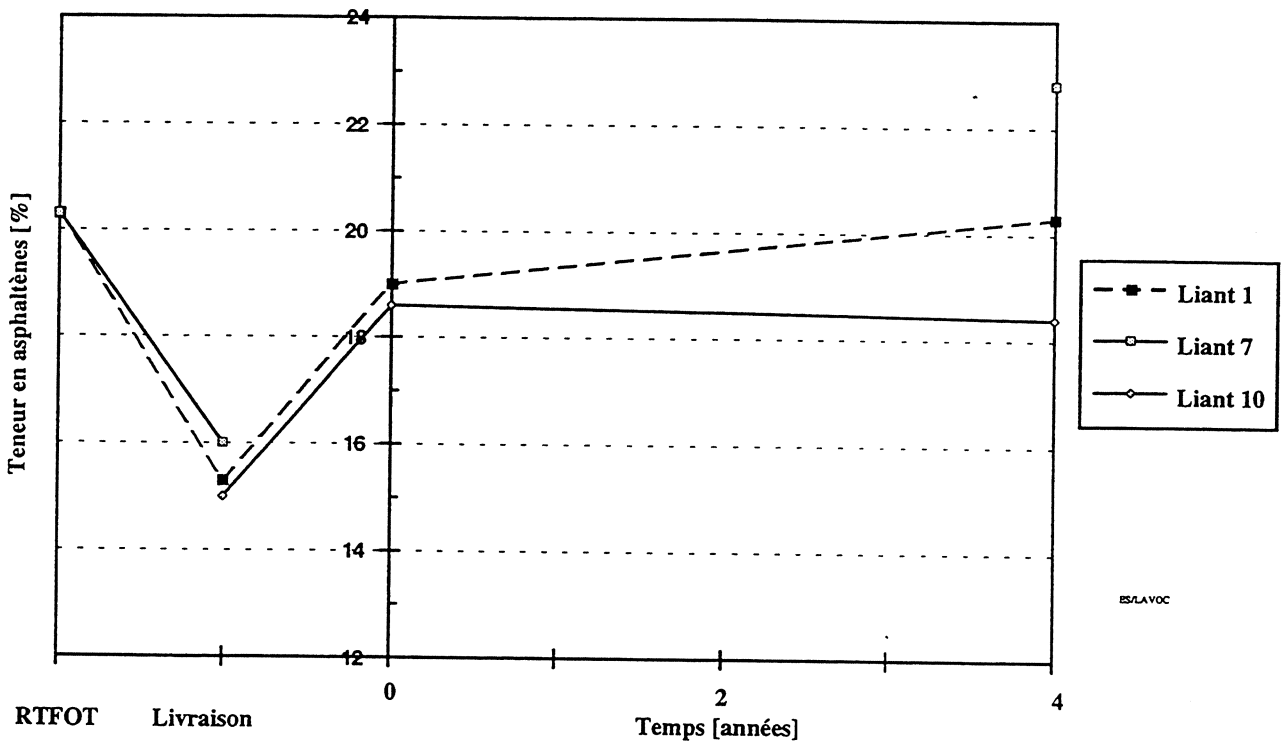


Figure F.21: *Evolution du résultat de la teneur en asphaltènes: Liants avec addition de polyoléfine*

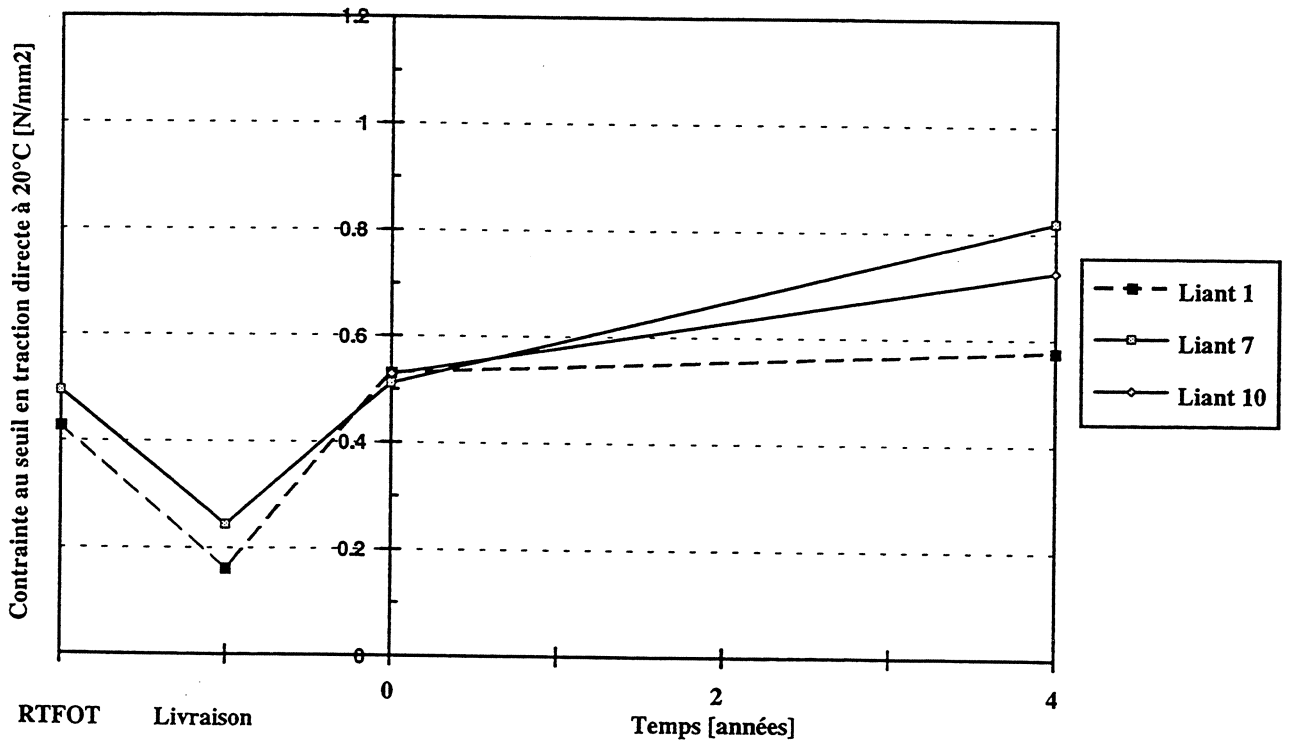


Figure F.22: *Evolution du résultat de la contrainte au seuil en traction directe à +20 °C: Liants avec addition de polyoléfine*

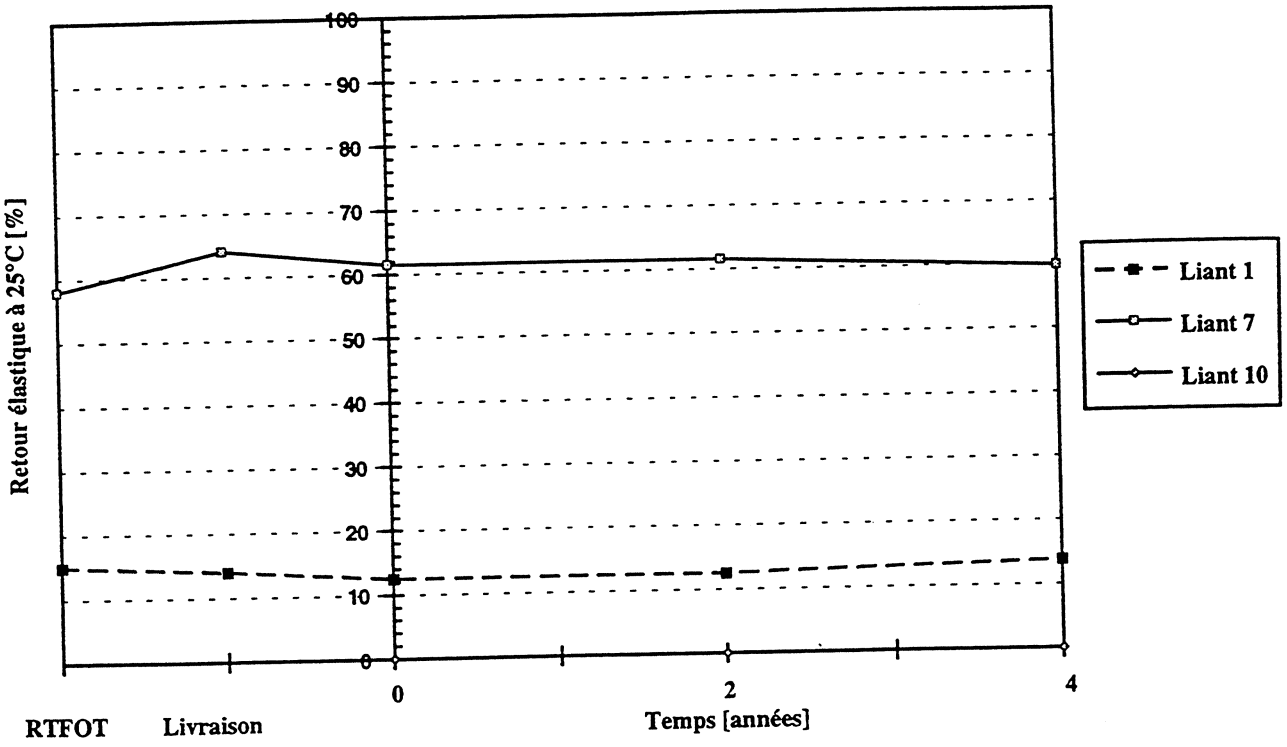


Figure F.23: *Evolution du résultat du retour élastique à 25 °C: Liants avec addition de polyoléfine*

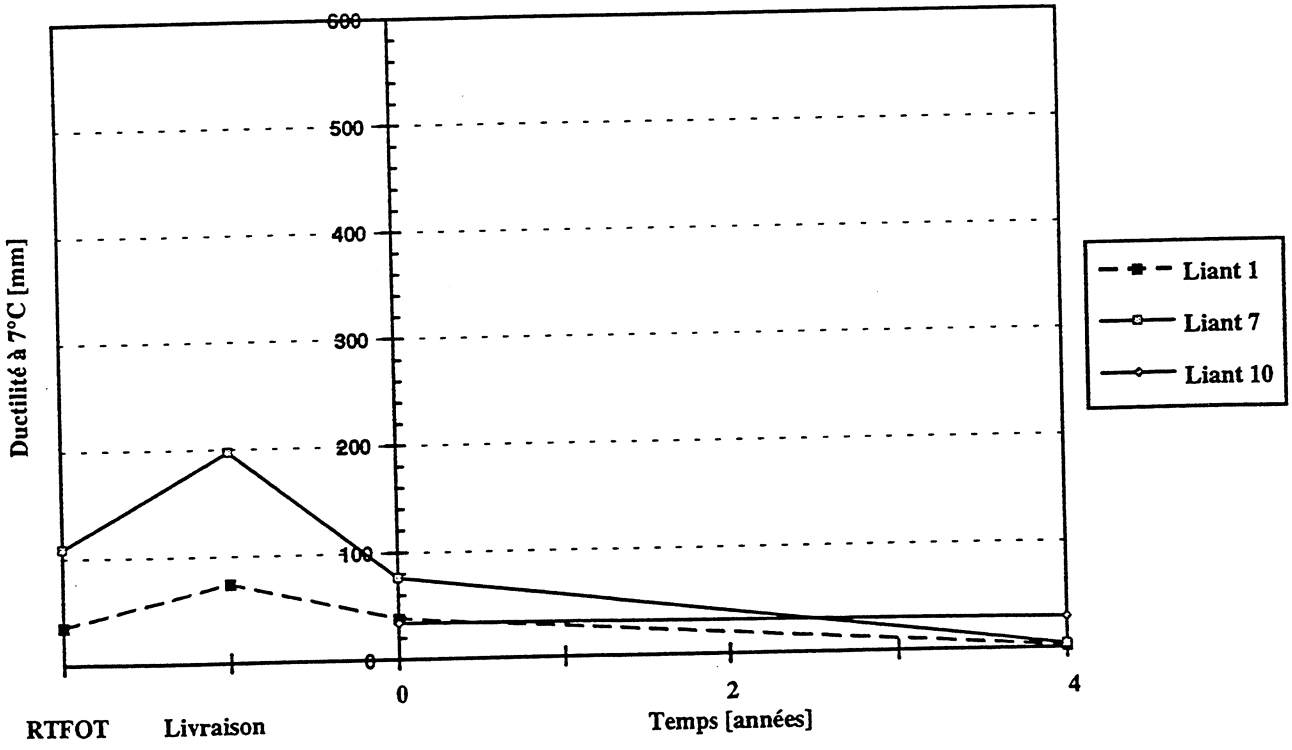


Figure F.24: *Evolution du résultat de la ductilité à 7 °C: Liants avec addition de polyoléfine*

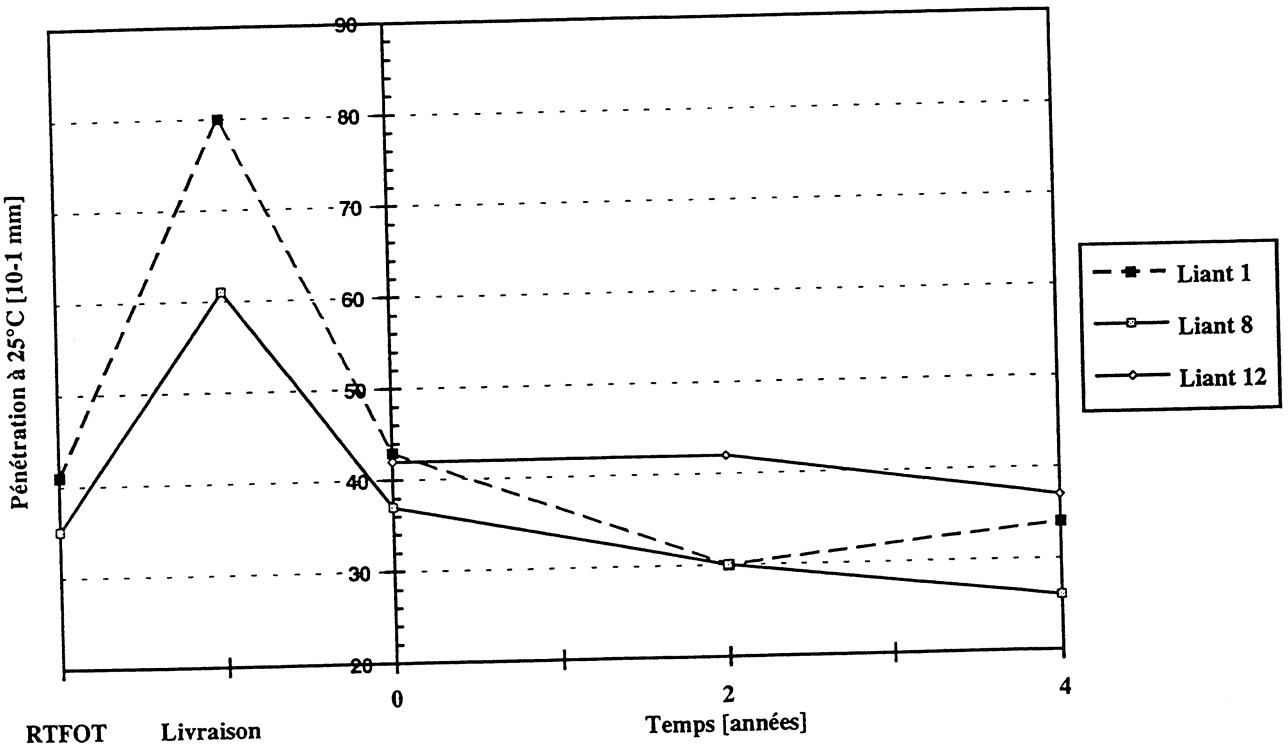


Figure F.25: *Evolution du résultat de la pénétration à 25 °C: Liants avec addition d'E.V.A.*

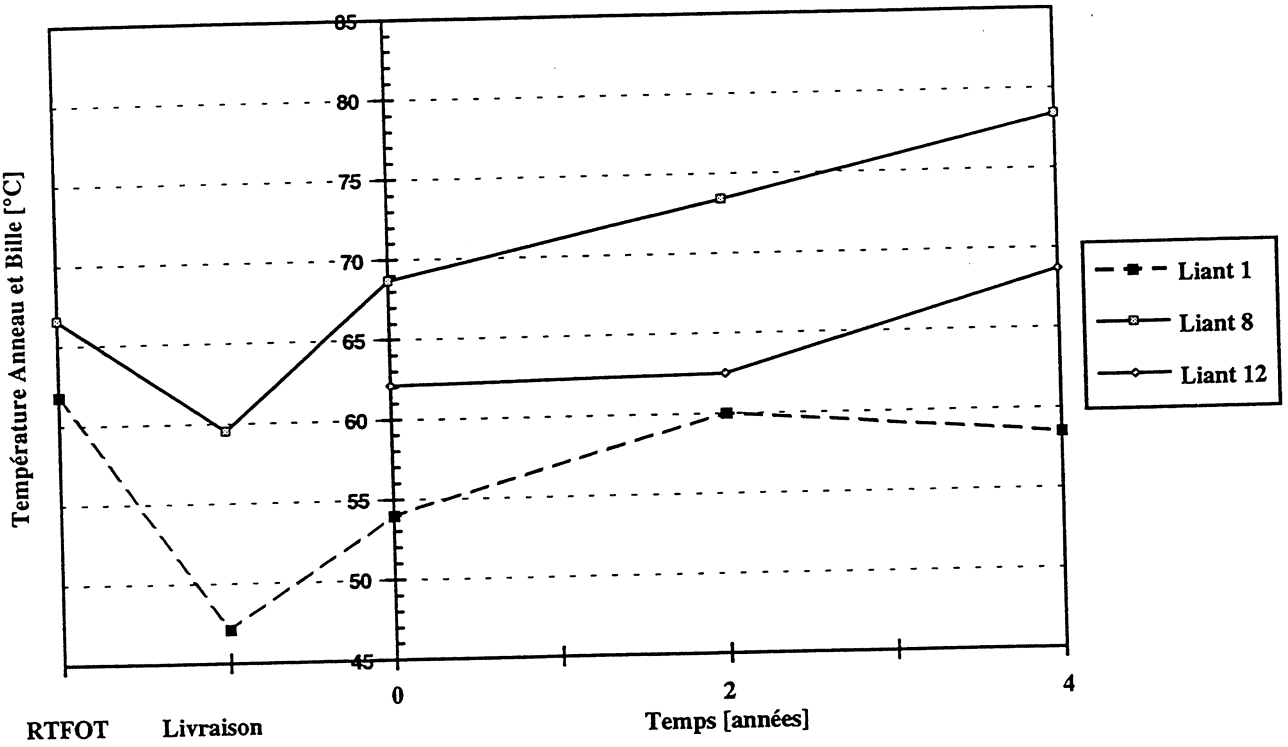


Figure F.26: *Evolution du résultat de la température anneau et bille: Liants avec addition d'E.V.A.*

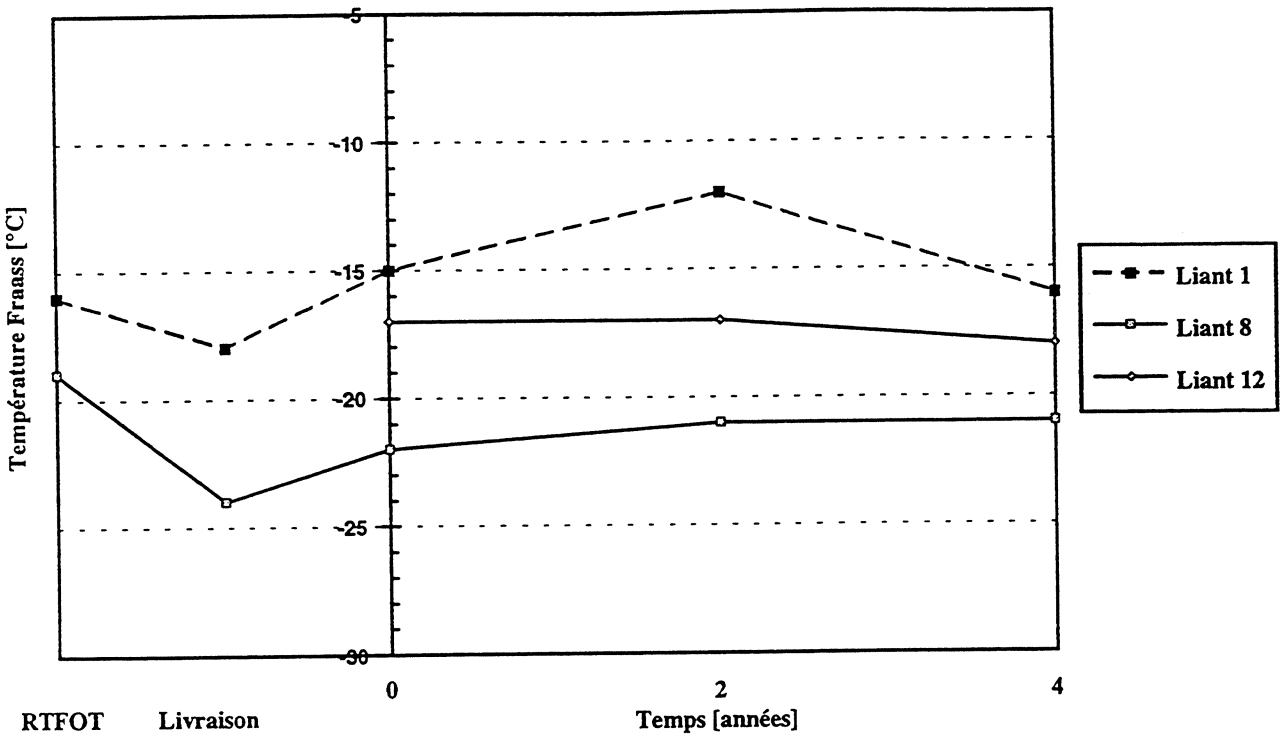


Figure F.27: *Evolution du résultat de température Fraass: Liants avec addition d'E.V.A.*

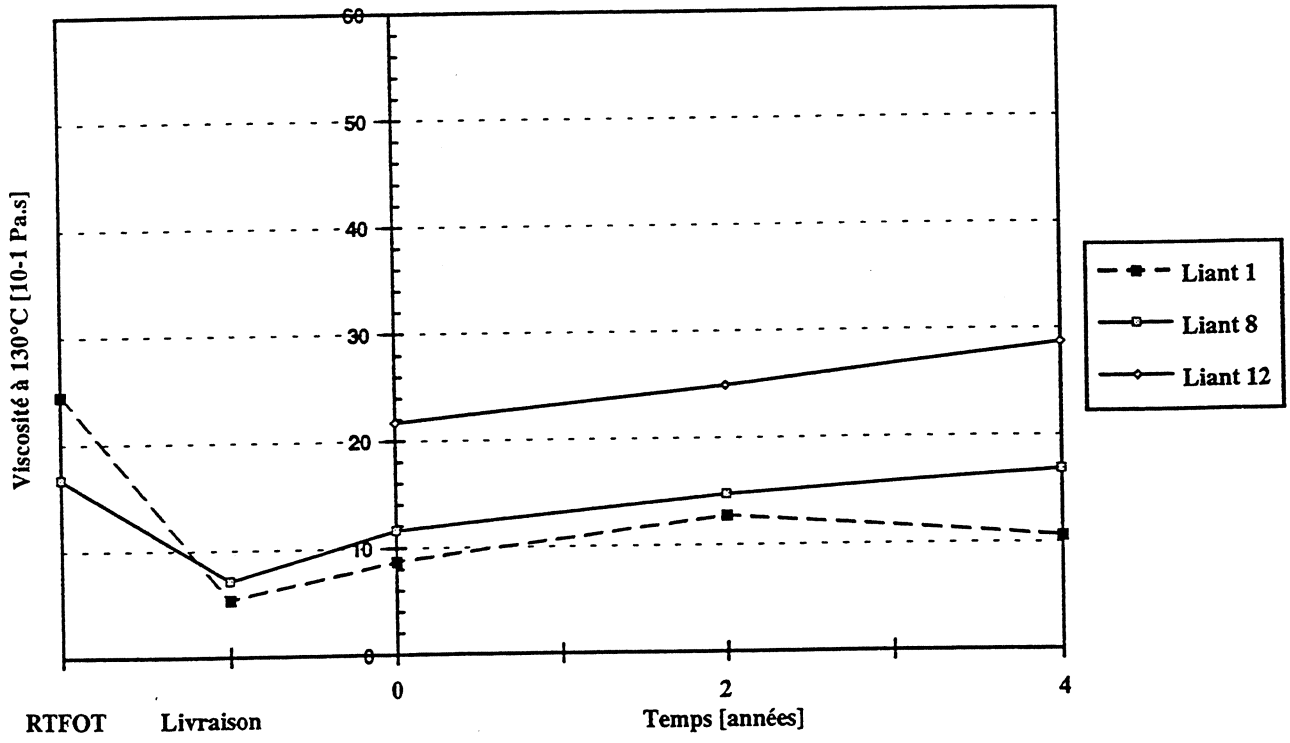


Figure F.28: *Evolution du résultat de la viscosité dynamique à 130 °C: Liants avec addition d'E.V.A.*

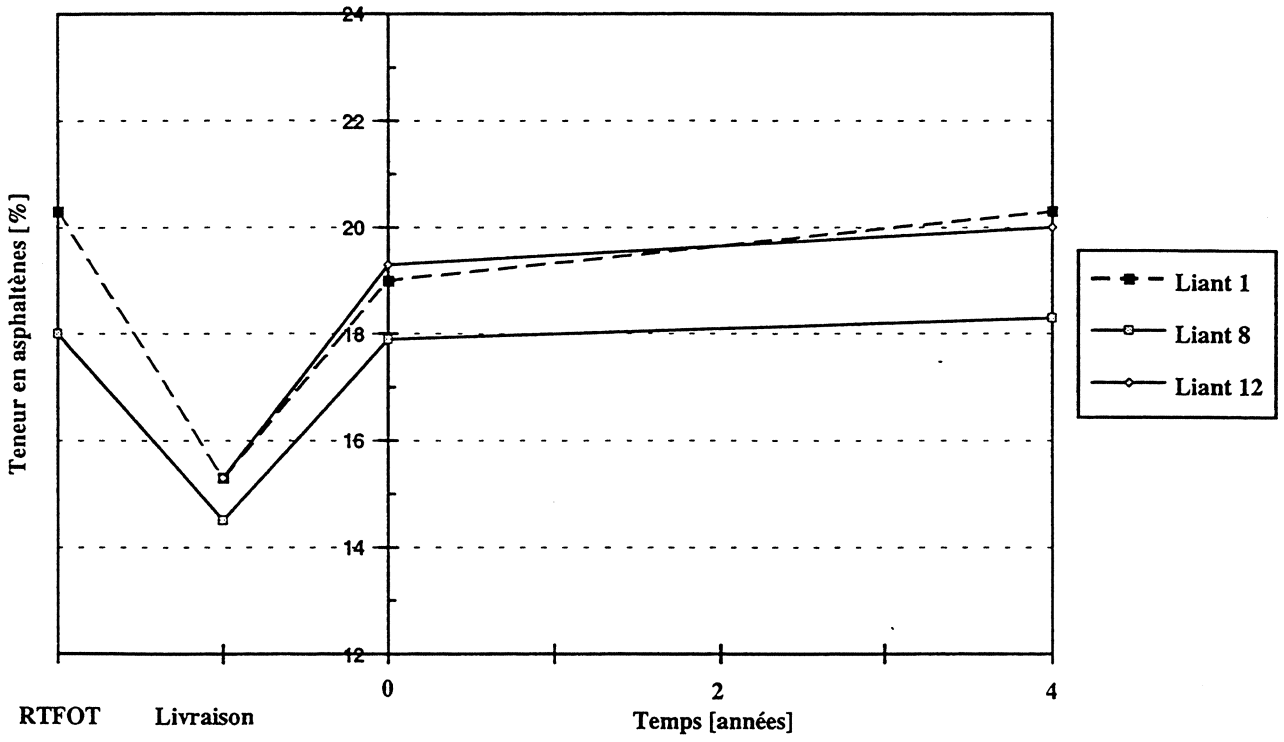


Figure F.29: *Evolution du résultat de la teneur en asphaltènes: Liants avec addition d'E.V.A.*

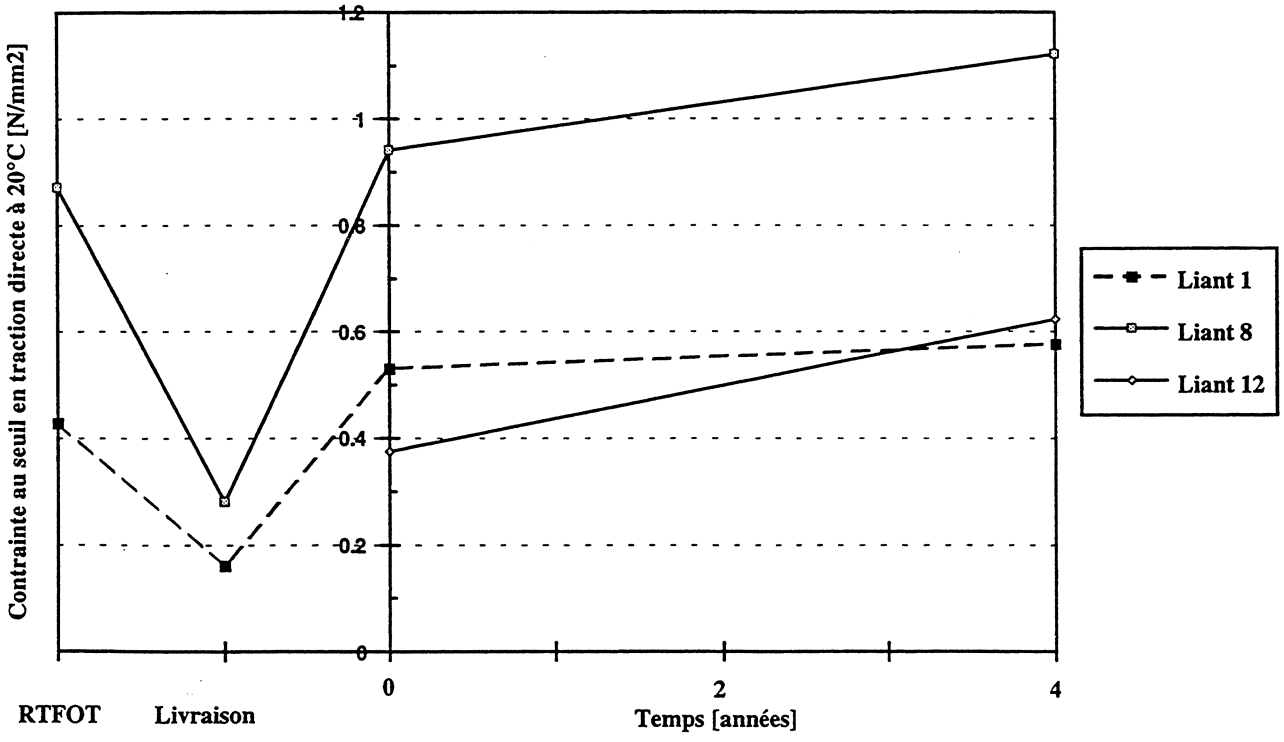


Figure F.30: *Evolution du résultat de la contrainte au seuil en traction directe à +20 °C: Liants avec addition d'E.V.A.*

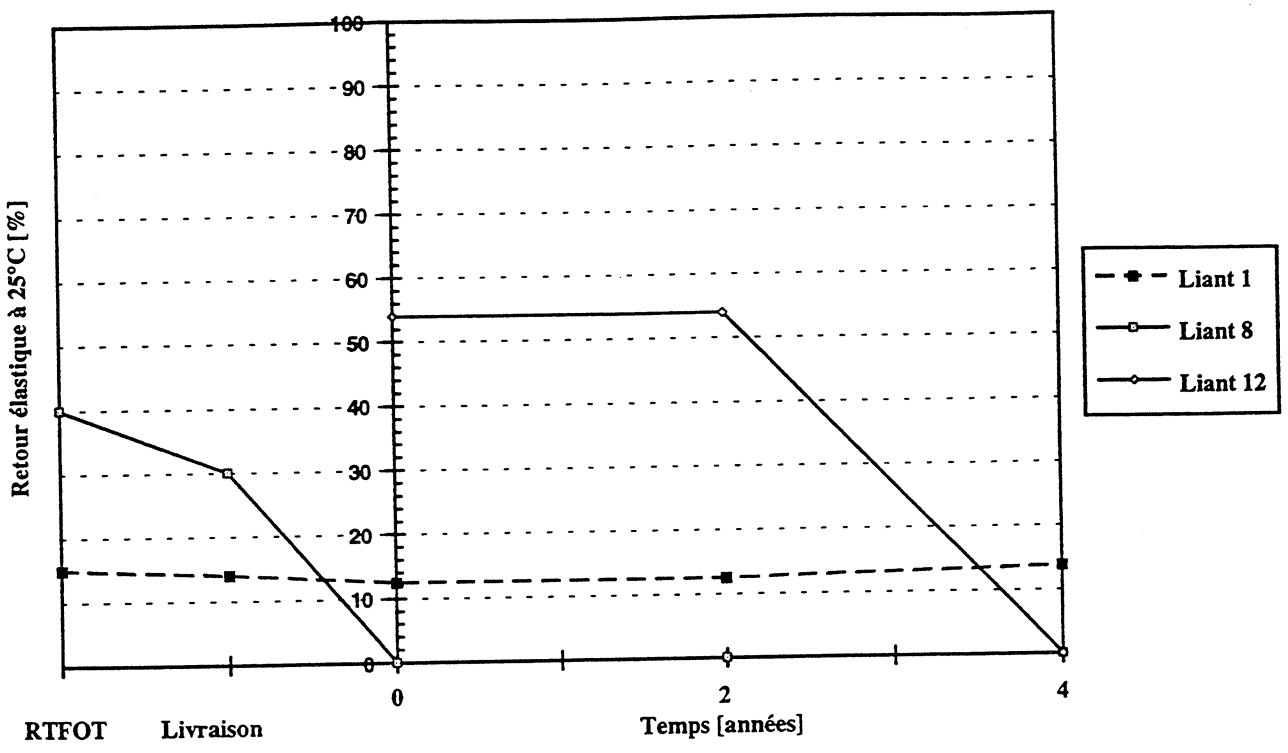


Figure F.31: *Evolution du résultat du retour élastique à 25 °C: Liants avec addition d'E.V.A.*

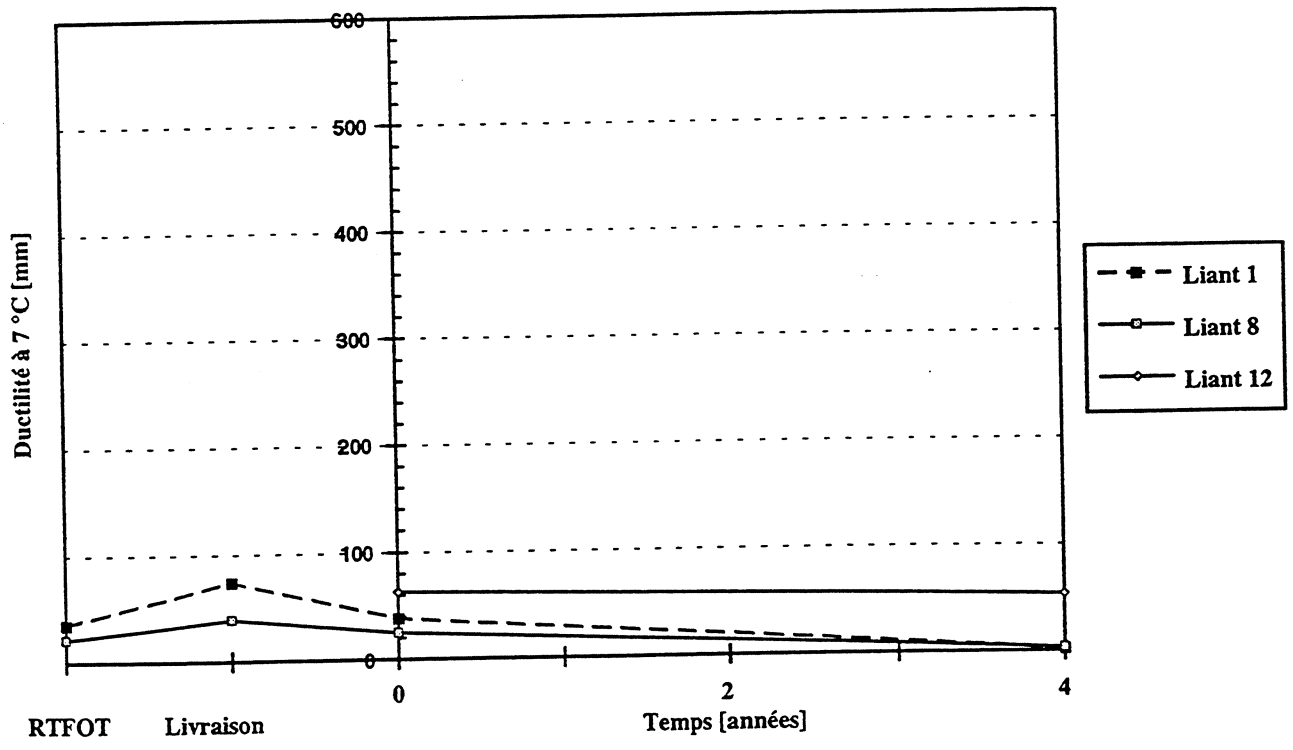


Figure F.32: *Evolution du résultat de la ductilité à 7 °C: Liants avec addition d'E.V.A.*

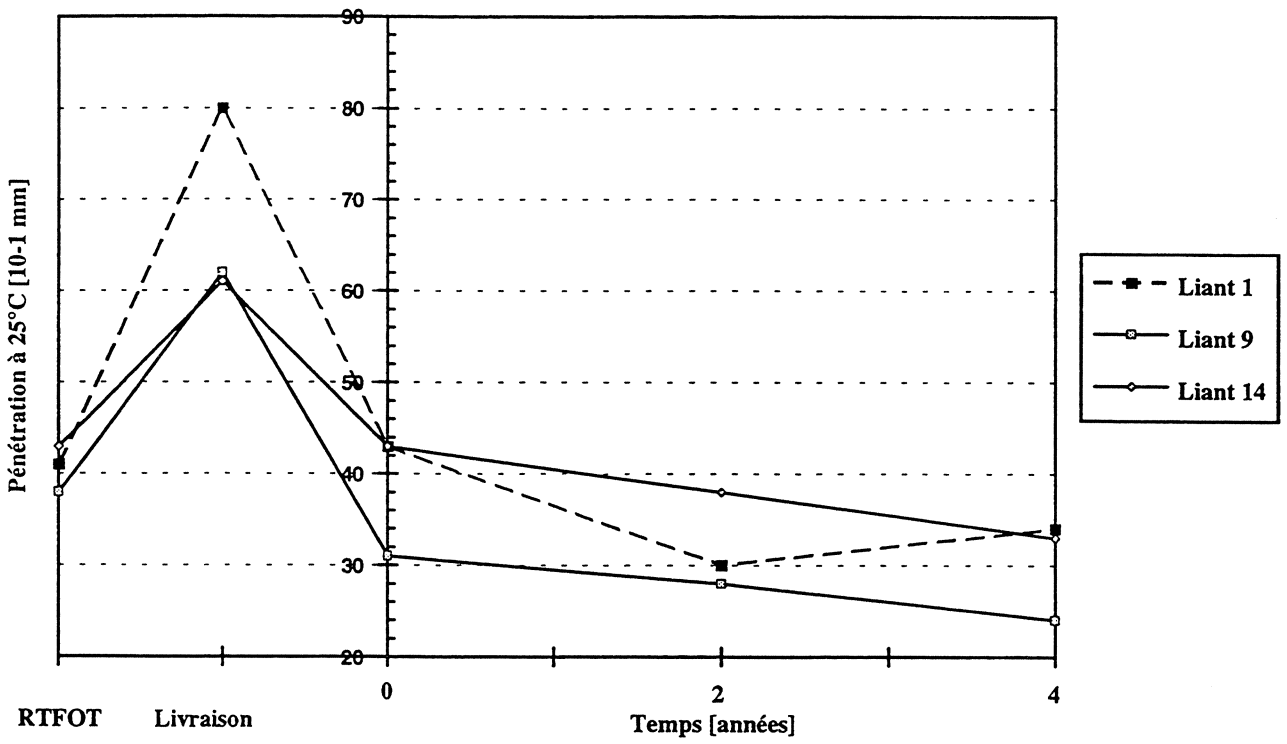


Figure F.33: *Evolution du résultat de la pénétration à 25 °C: Liants modifiés par addition d'E.P.D.M.*

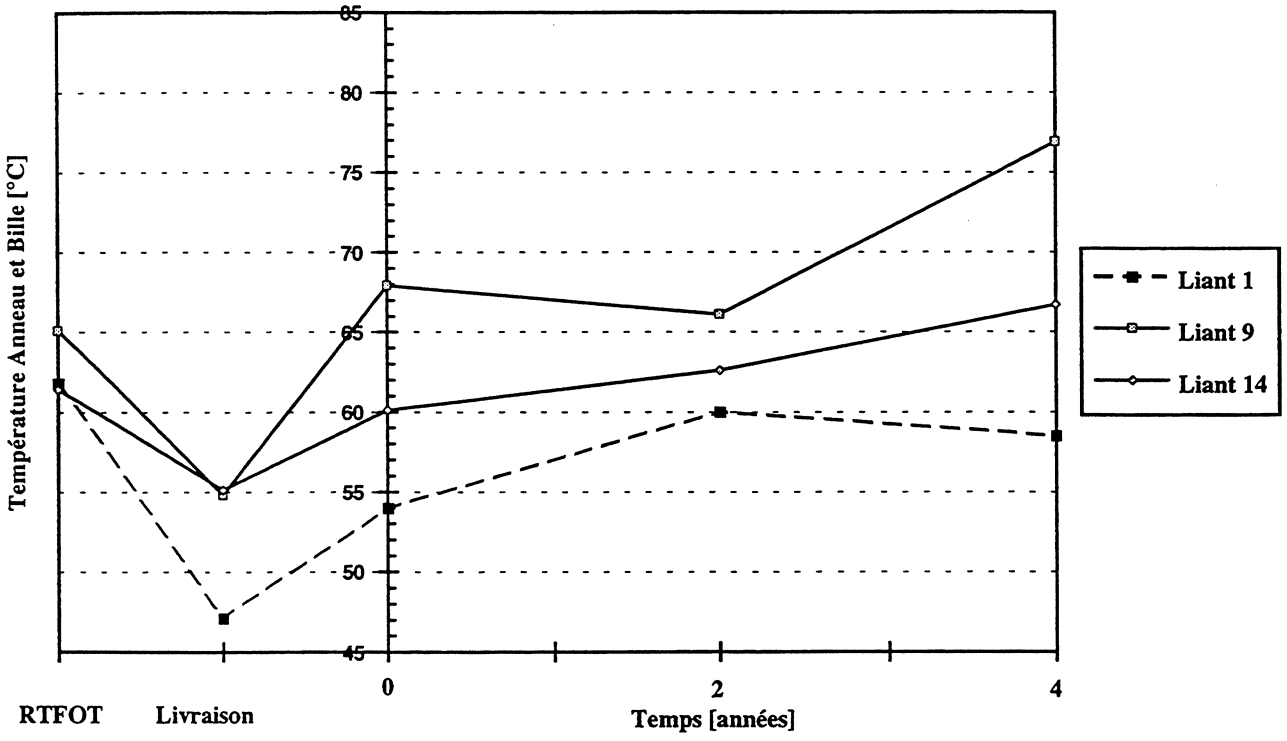


Figure F.34: *Evolution du résultat de la température anneau et bille: Liants modifiés par addition d'E.P.D.M.*

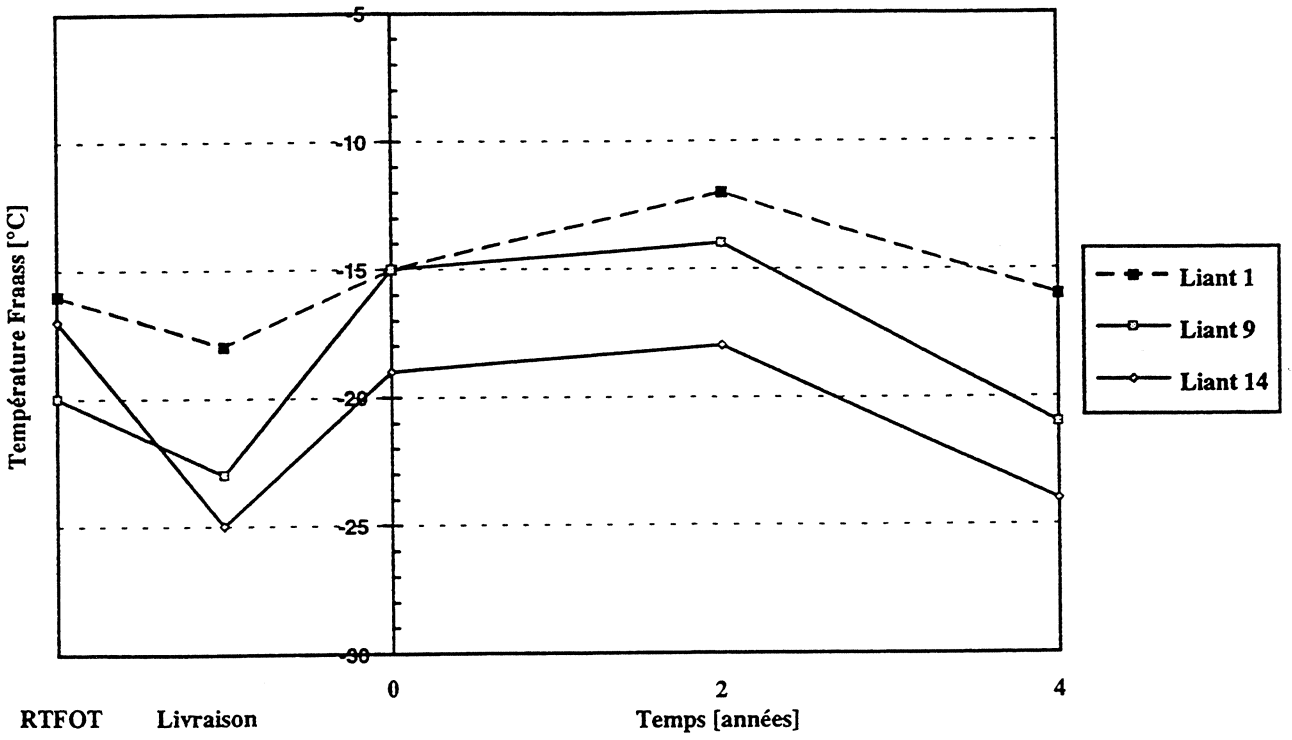


Figure F.35: *Evolution du résultat de température Fraass: Liants modifiés par addition d'E.P.D.M.*

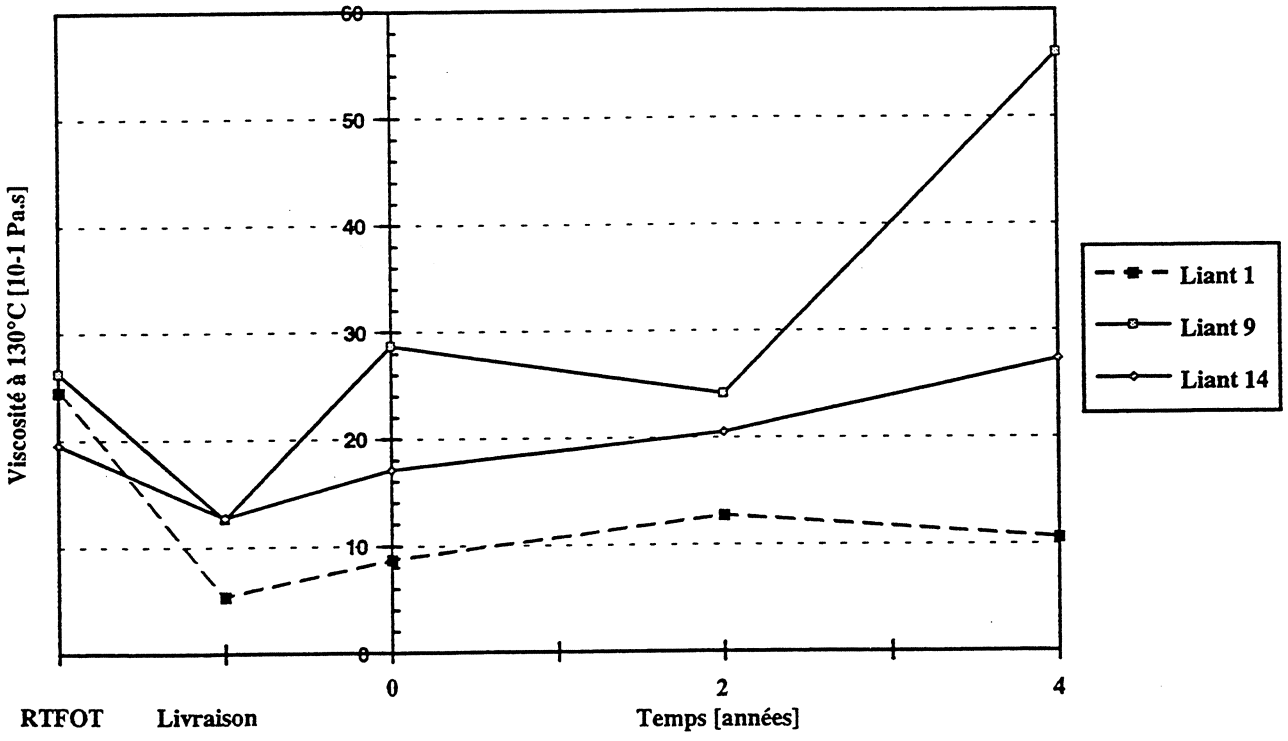


Figure F.36: *Evolution du résultat de la viscosité dynamique à 130 °C: Liants modifiés par addition d'E.P.D.M.*

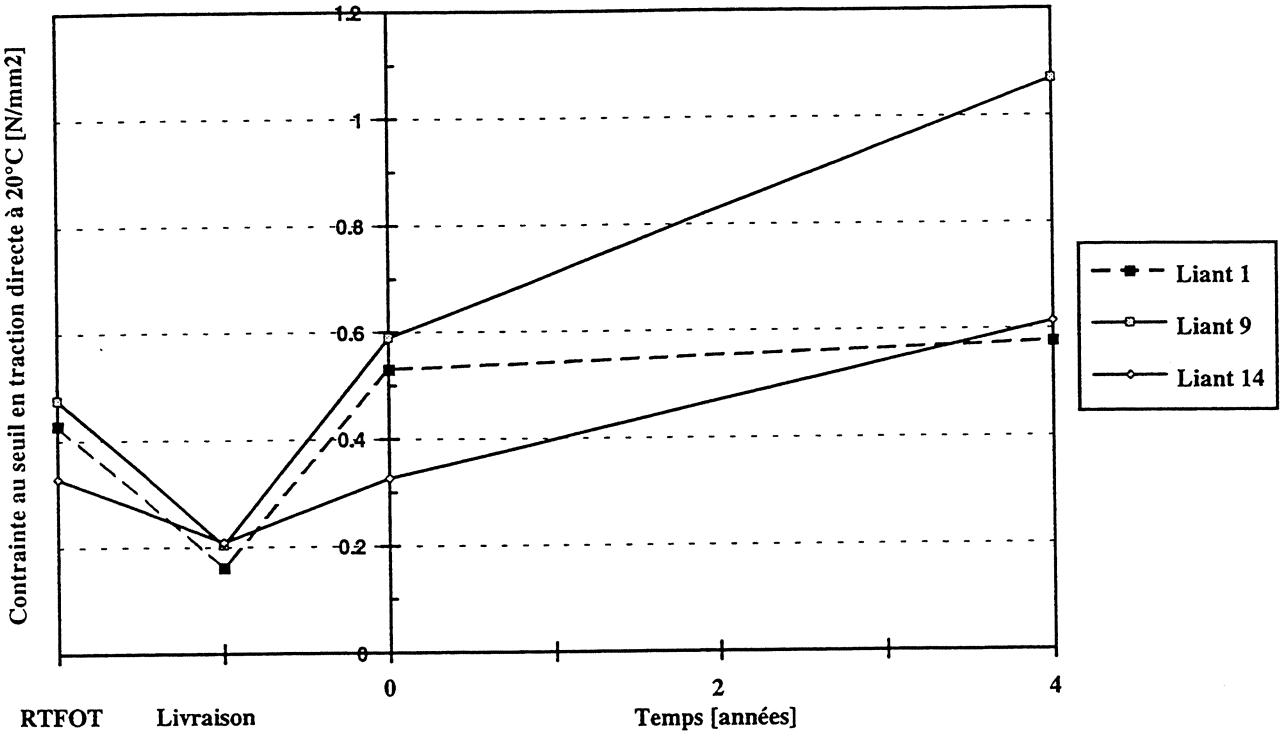


Figure F.37: *Evolution du résultat de la contrainte au seuil en traction directe à +20 °C: Liants modifiés par addition d'E.P.D.M.*

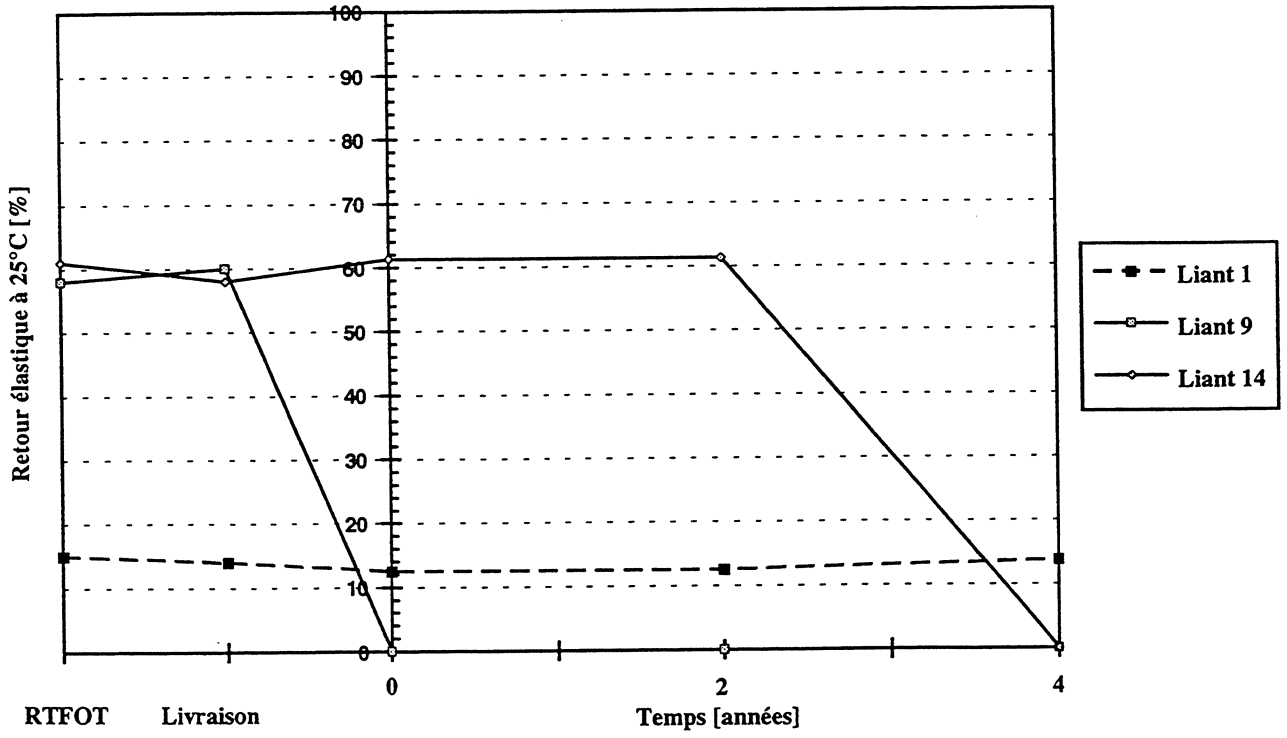


Figure F.38: *Evolution du résultat du retour élastique à 25 °C: Liants modifiés par addition d'E.P.D.M.*

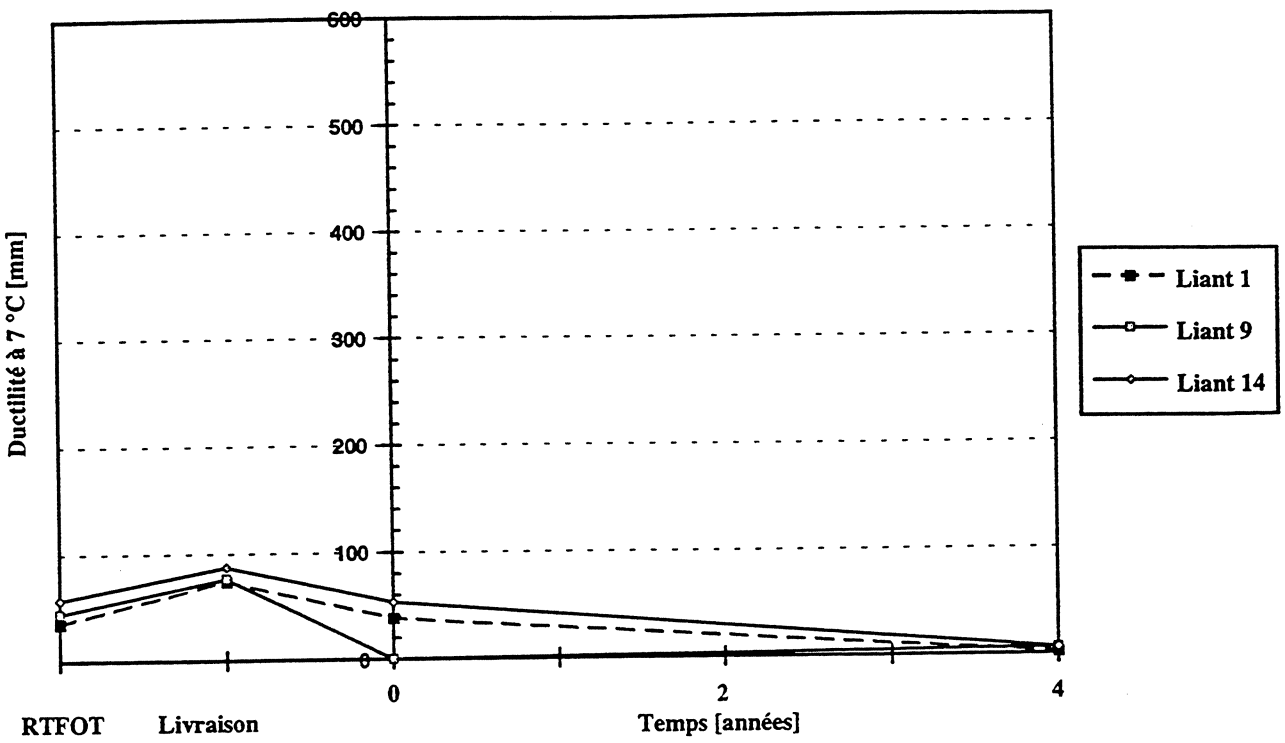


Figure F.39: *Evolution du résultat de la ductilité à 7 °C: Liants modifiés par addition d'E.P.D.M.*

A N N E X E G

Droites de régression entre vieillissement artificiel RTFOT et DIN et vieillissement après passage en centrale et mise en oeuvre

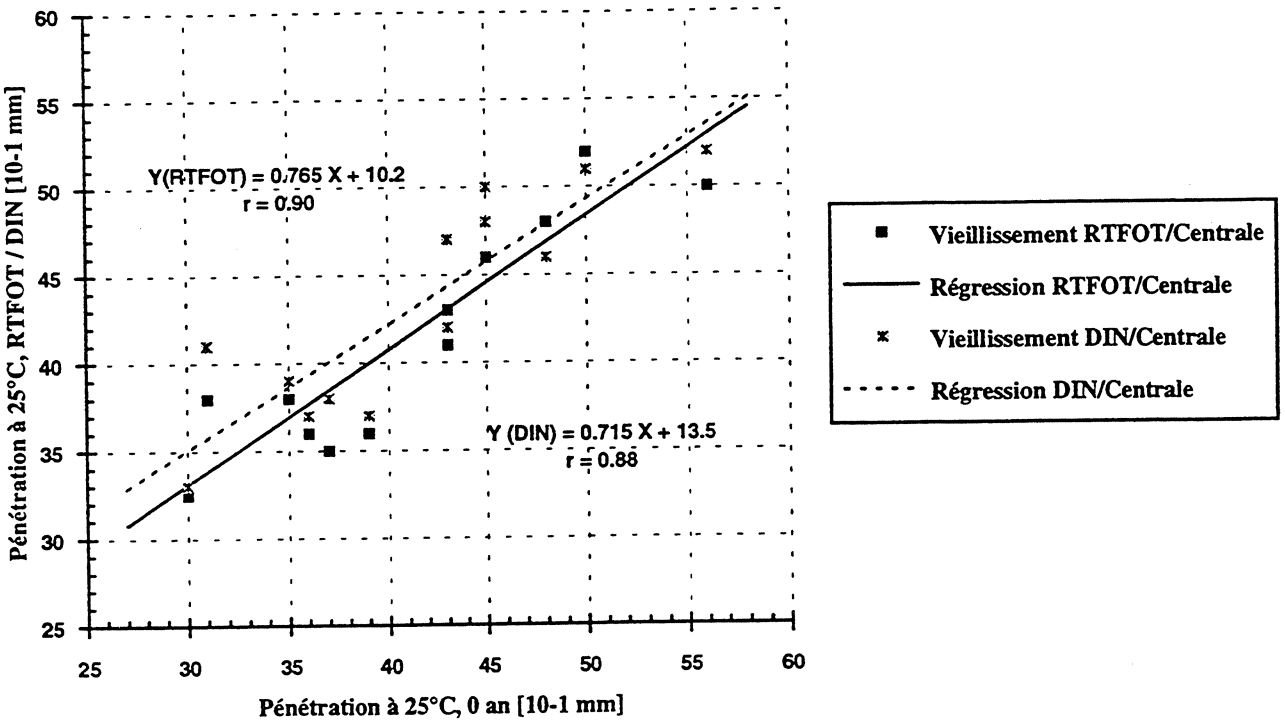


Figure G.1: *Vieillissement comparé entre méthode RTFOT ou DIN et passage en centrale: Effet sur la pénétration à 25 °C*

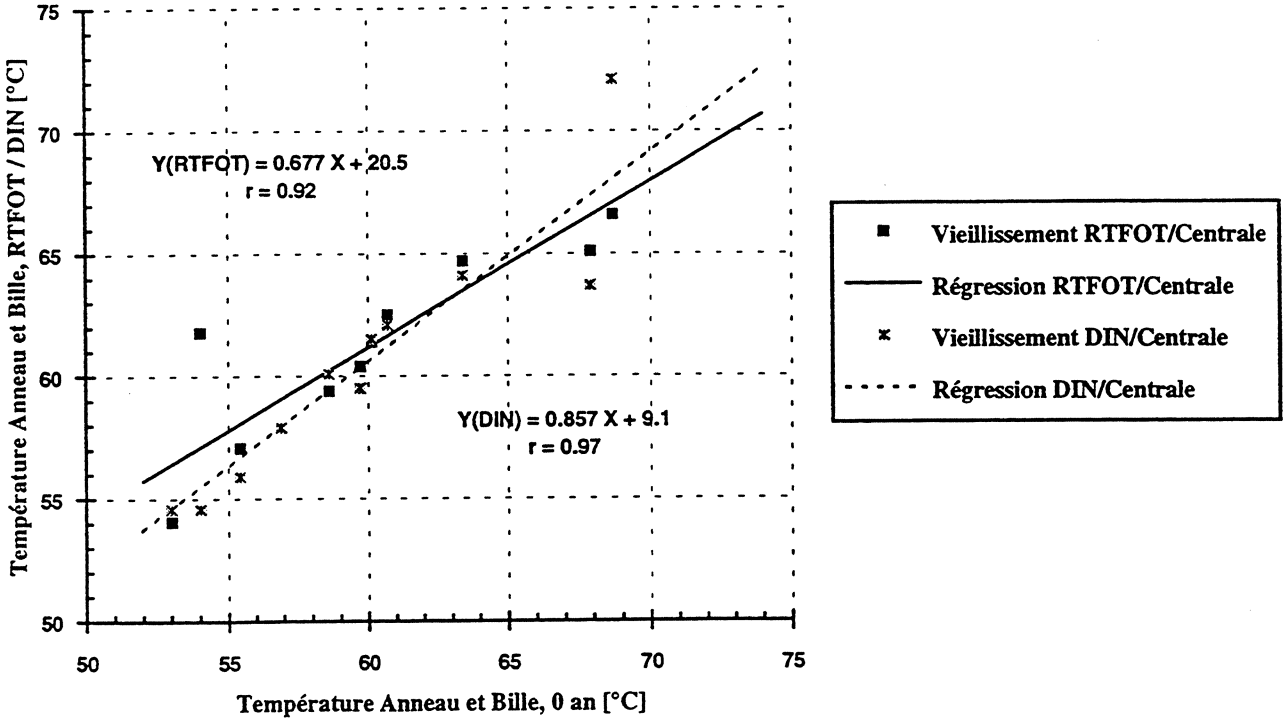


Figure G.2: *Vieillissement comparé entre méthode RTFOT ou DIN et passage en centrale: Effet sur la température anneau et bille*

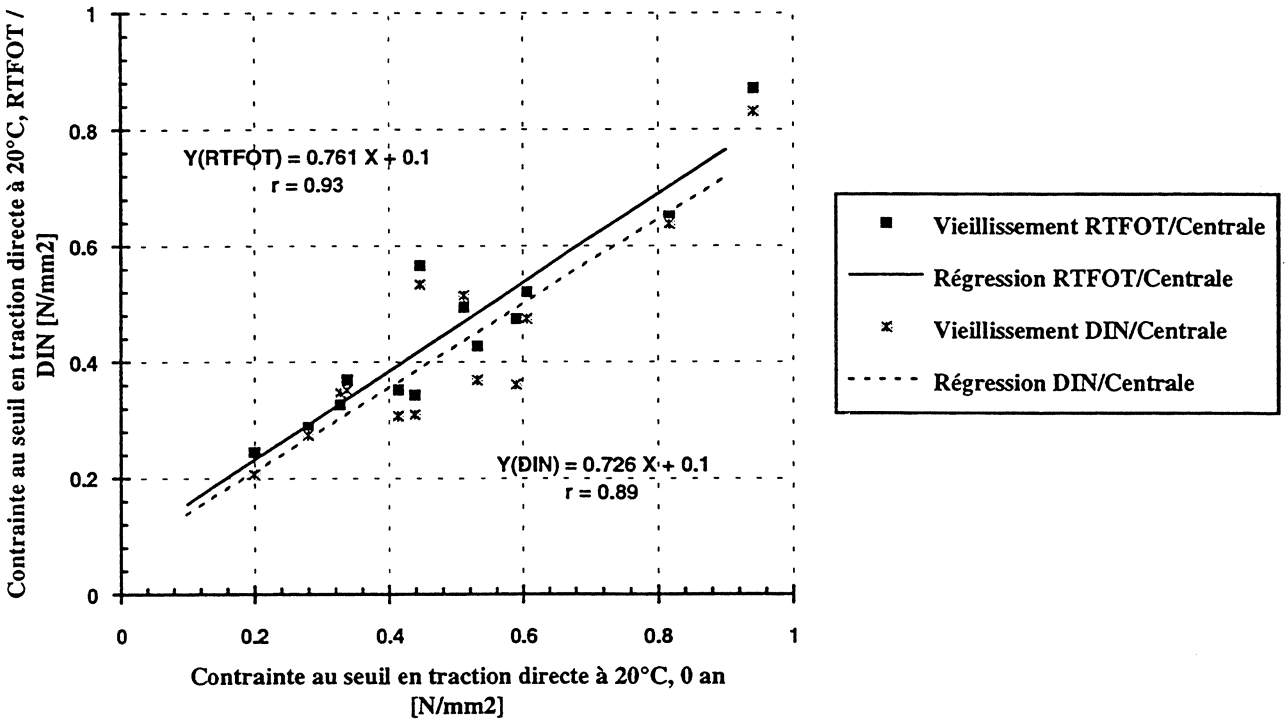


Figure G.3: *Vieillissement comparé entre méthode RTFOT ou DIN et passage en centrale: Effet sur la contrainte au seuil en traction directe à 20 °C*

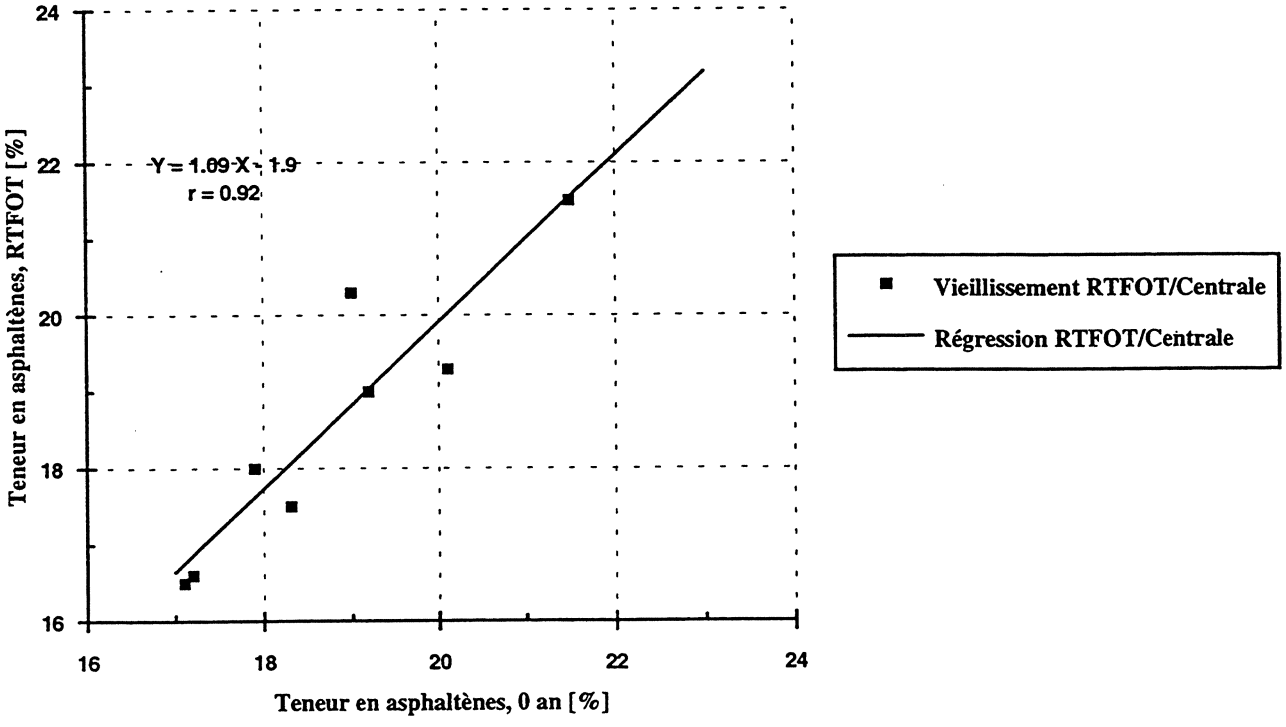


Figure G.4: *Vieillissement comparé entre méthode RTFOT et passage en centrale: Effet sur la teneur en asphaltènes*

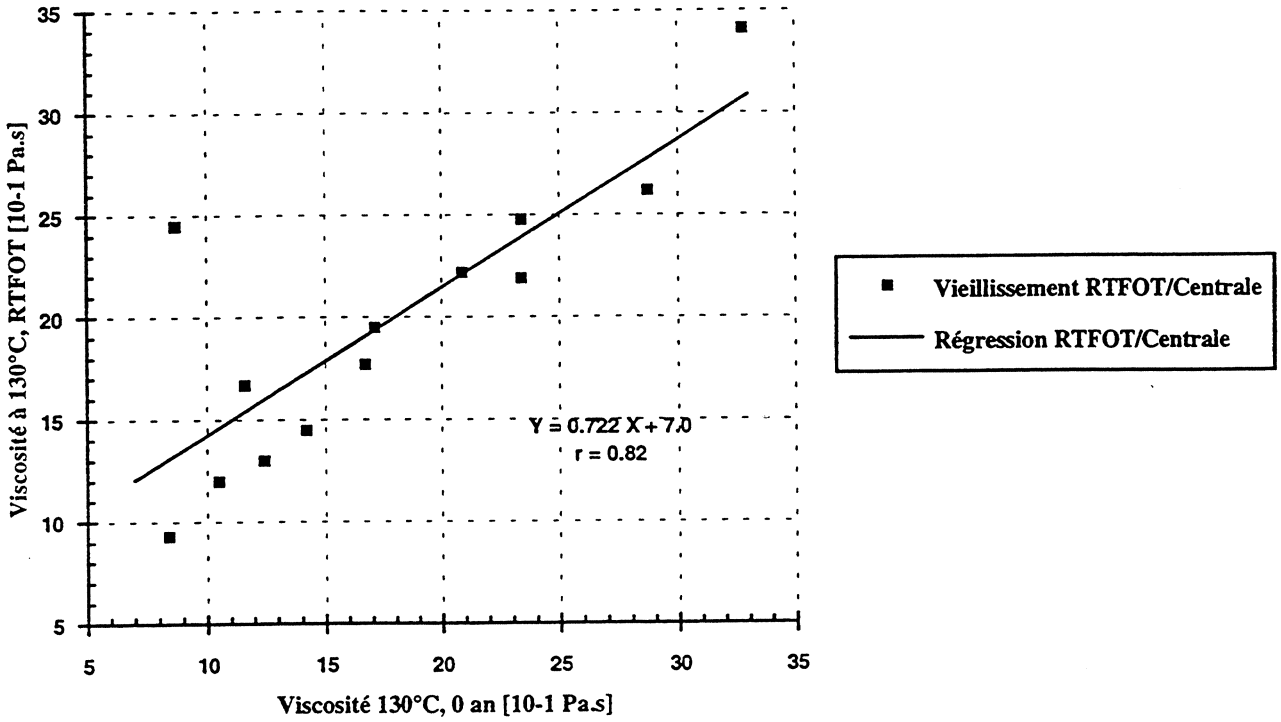


Figure G.5: *Vieillissement comparé entre méthode RTFOT et passage en centrale: Effet sur la viscosité à 130 °C*

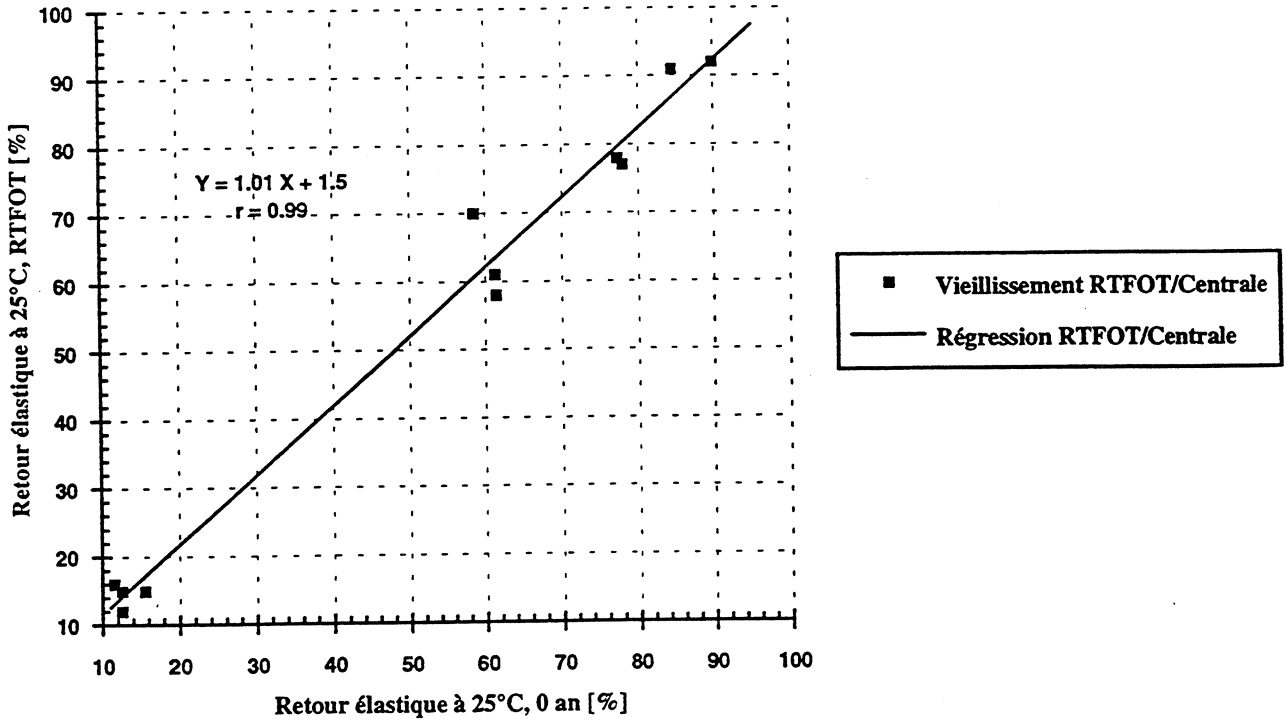


Figure G.6: *Vieillissement comparé entre méthode RTFOT et passage en centrale: Effet sur le retour élastique*

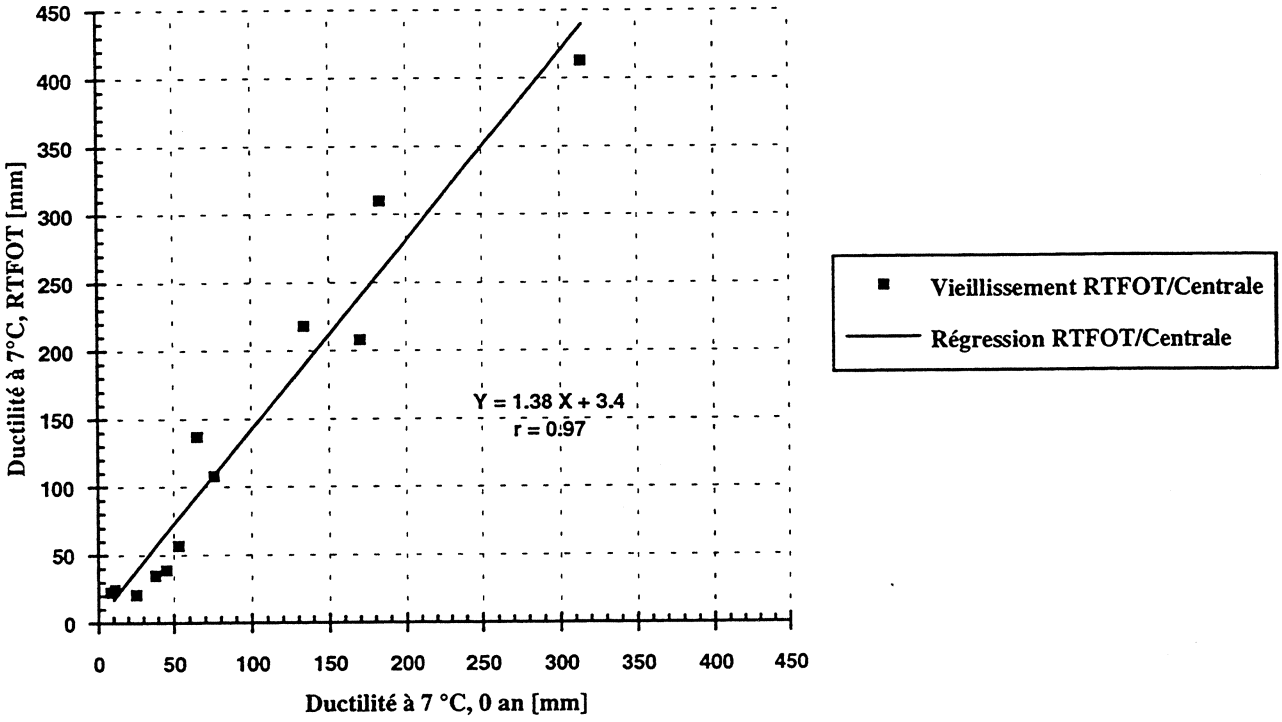


Figure G.7: *Vieillissement comparé entre méthode RTFOT et passage en centrale: Effet sur la ductilité à 7 °C*

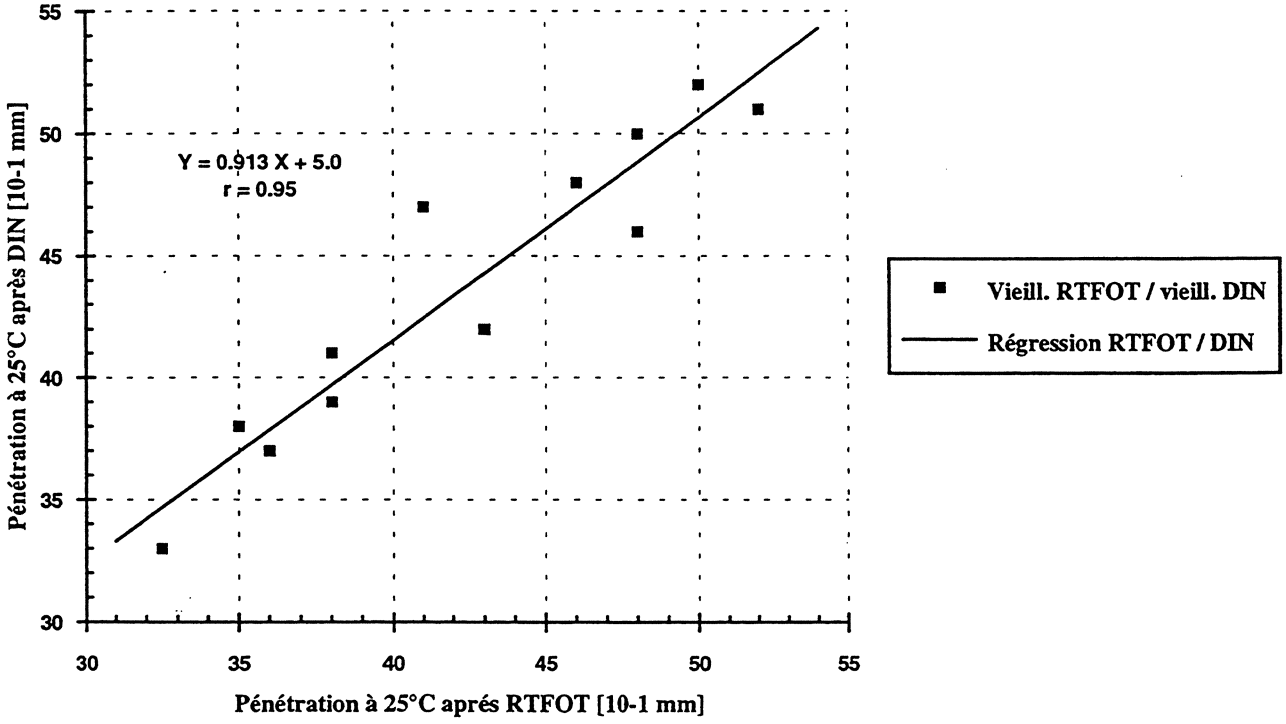


Figure G.8: *Vieillissement comparé entre méthode RTFOT et DIN: Effet sur la pénétration à 25 °C*

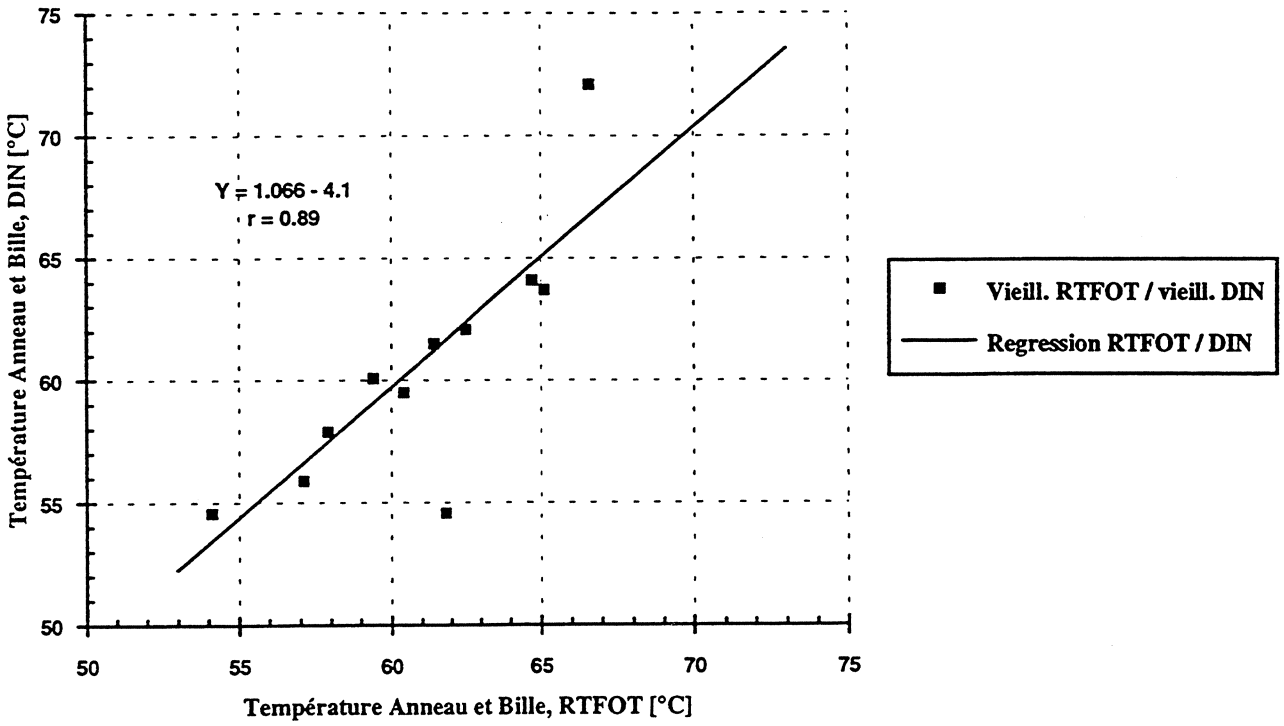


Figure G.9: *Vieillissement comparé entre méthode RTFOT et DIN: Effet sur la température anneau et bille*

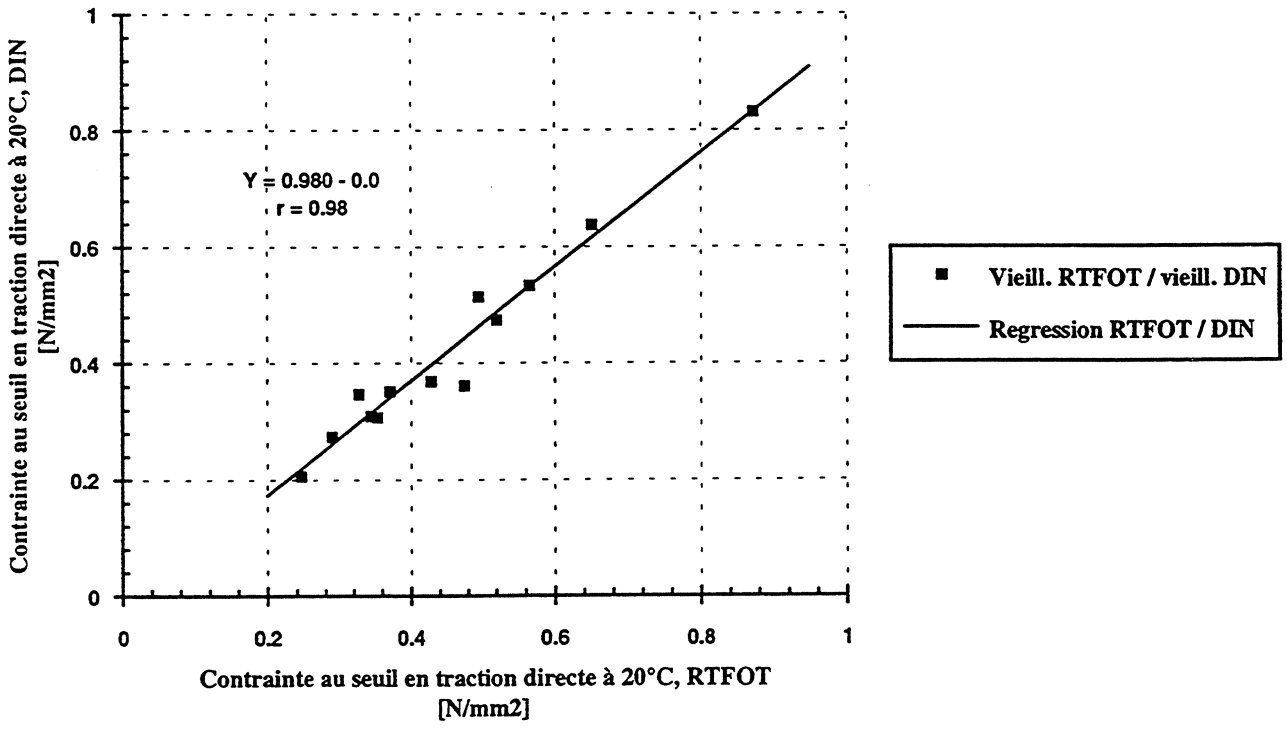


Figure G.10: *Vieillissement comparé entre méthode RTFOT et DIN: Effet sur la contrainte au seuil en traction directe*

A N N E X E H

Diagrammes d'Heukelom

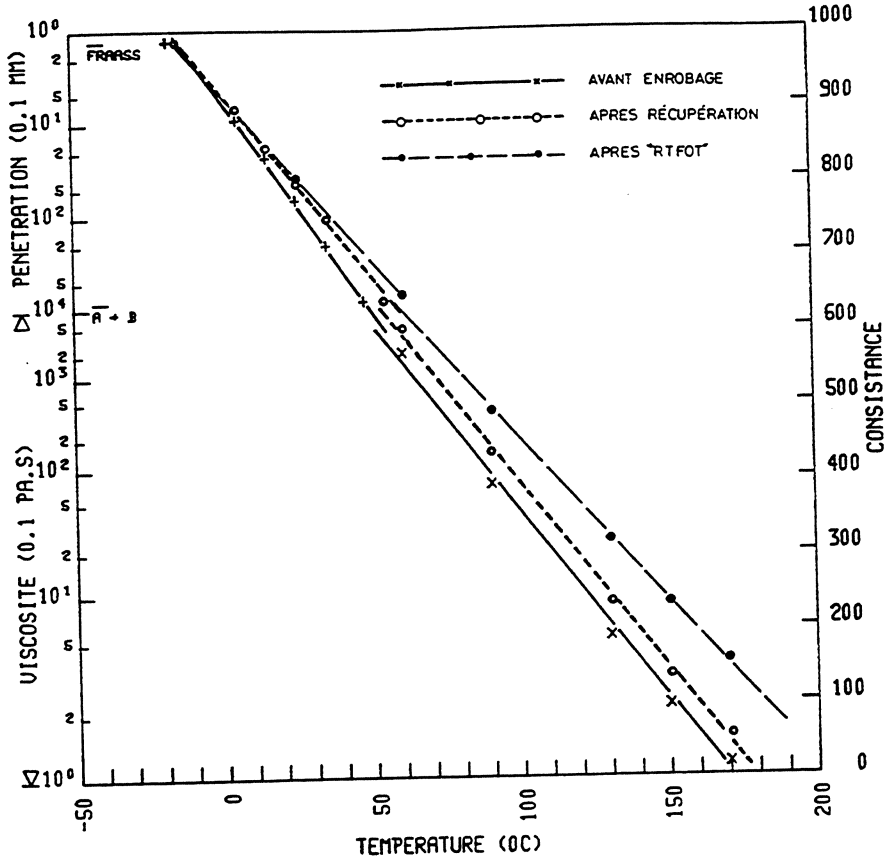


Figure H.1: *Diagrammes d'Heukelom du bitume 1: A la livraison, après récupération au temps 0 et après vieillissement artificiel RTFOT*

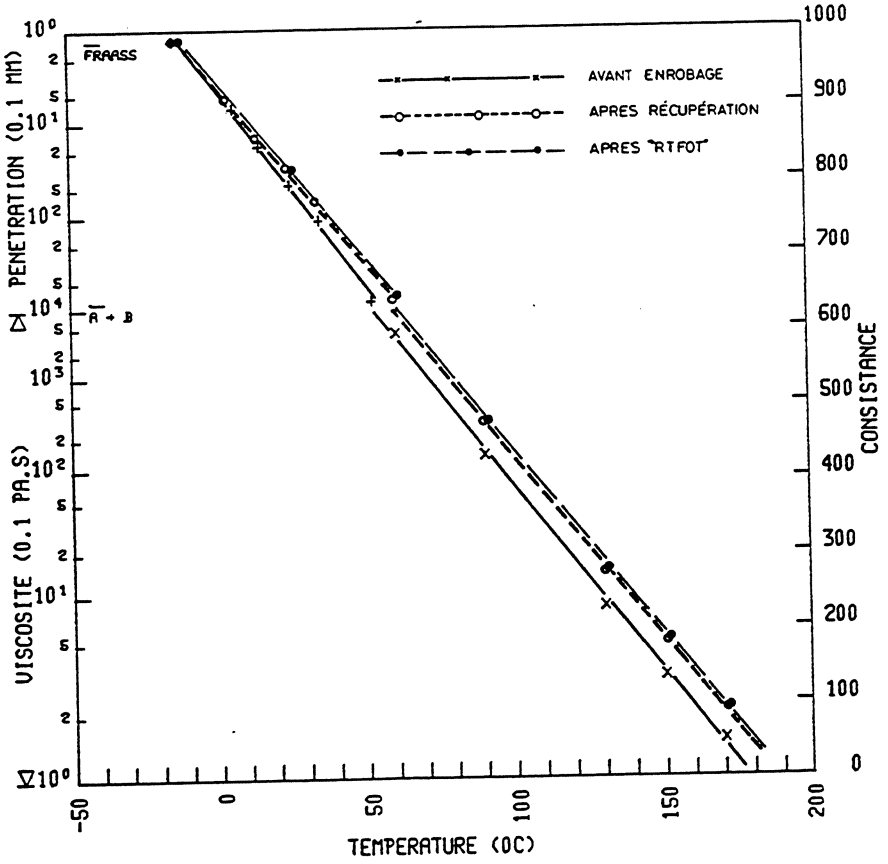


Figure H.2: *Diagrammes d'Heukelom du bitume 2: A la livraison, après récupération au temps 0 et après vieillissement artificiel RTFOT*

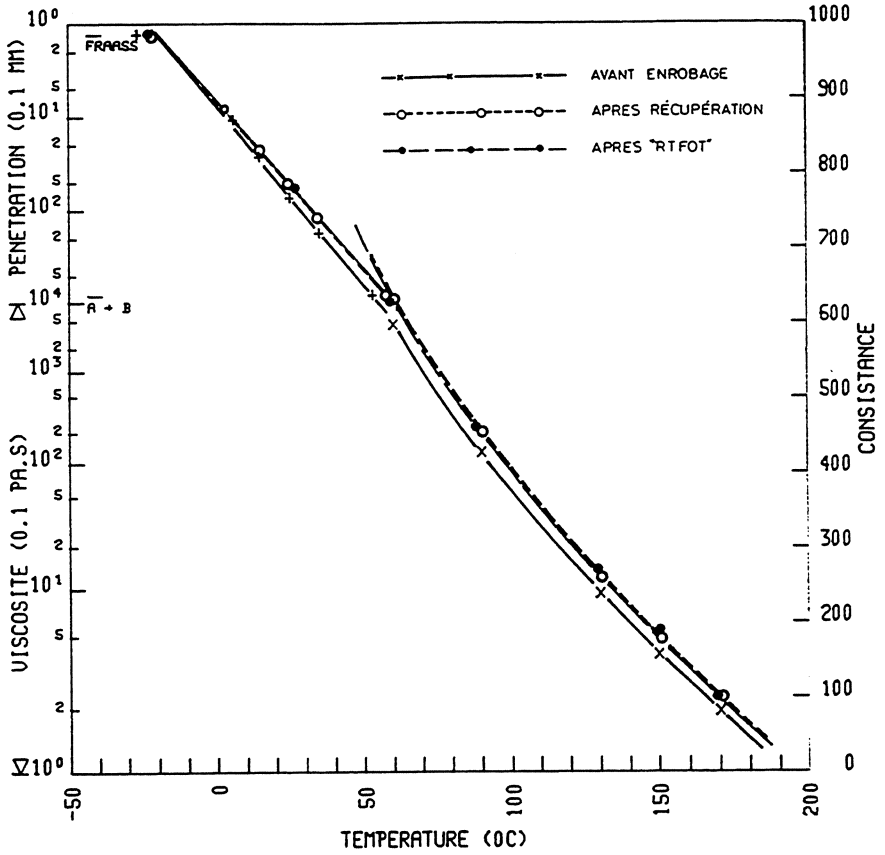


Figure H.3: *Diagrammes d'Heukelom du liant 3: A la livraison, après récupération au temps 0 et après vieillissement artificiel RTFOT*

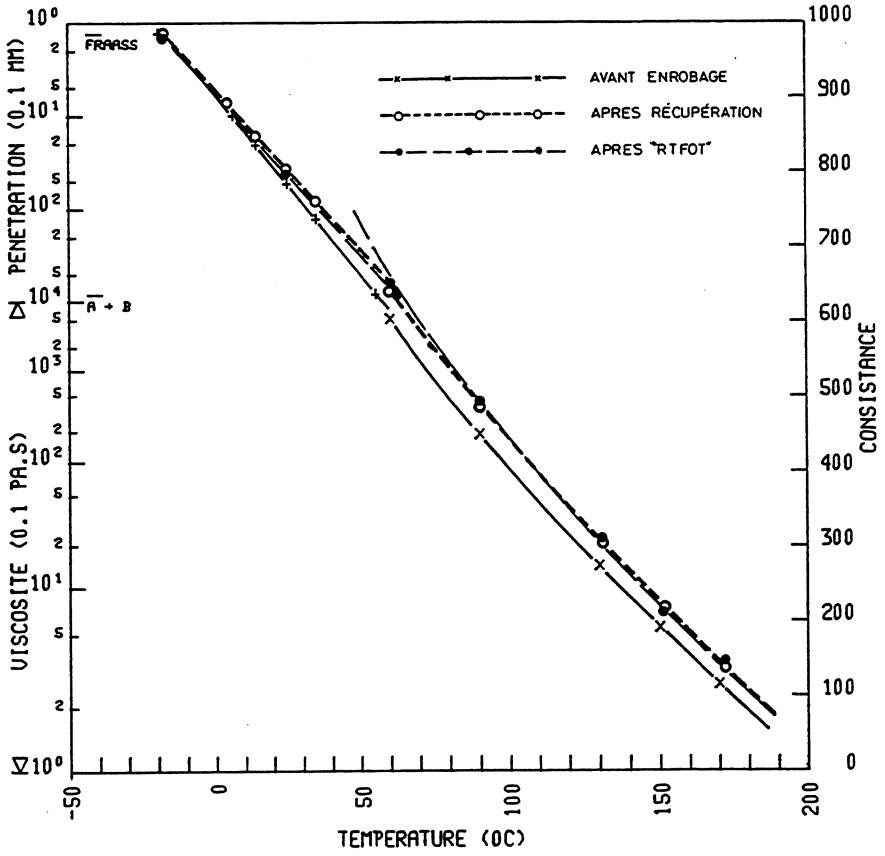


Figure H.4: *Diagrammes d'Heukelom du liant 4: A la livraison, après récupération au temps 0 et après vieillissement artificiel RTFOT*

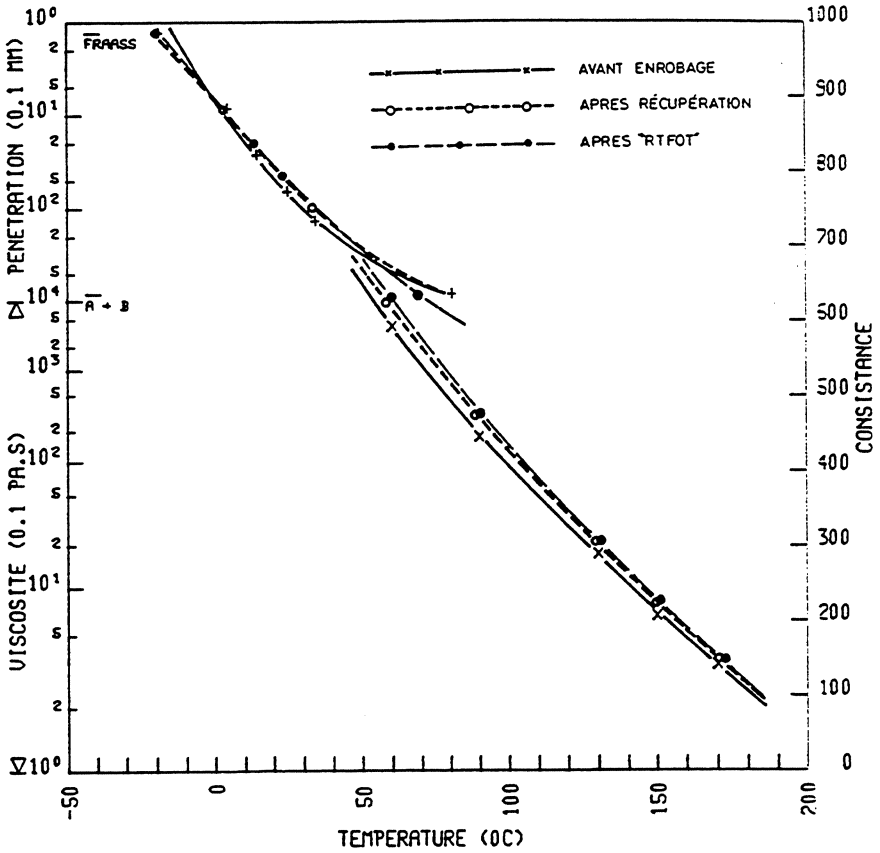


Figure H.5: *Diagrammes d'Heukelom du liant 5: A la livraison, après récupération au temps 0 et après vieillissement artificiel RTFOT*

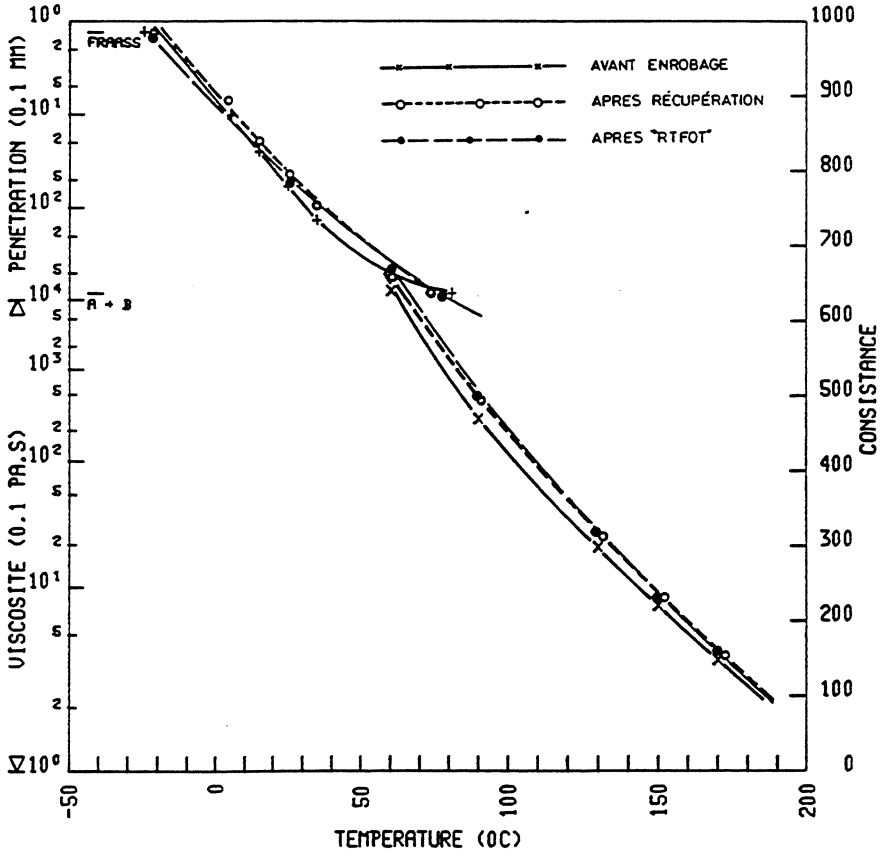


Figure H.6: *Diagrammes d'Heukelom du liant 6: A la livraison, après récupération au temps 0 et après vieillissement artificiel RTFOT*

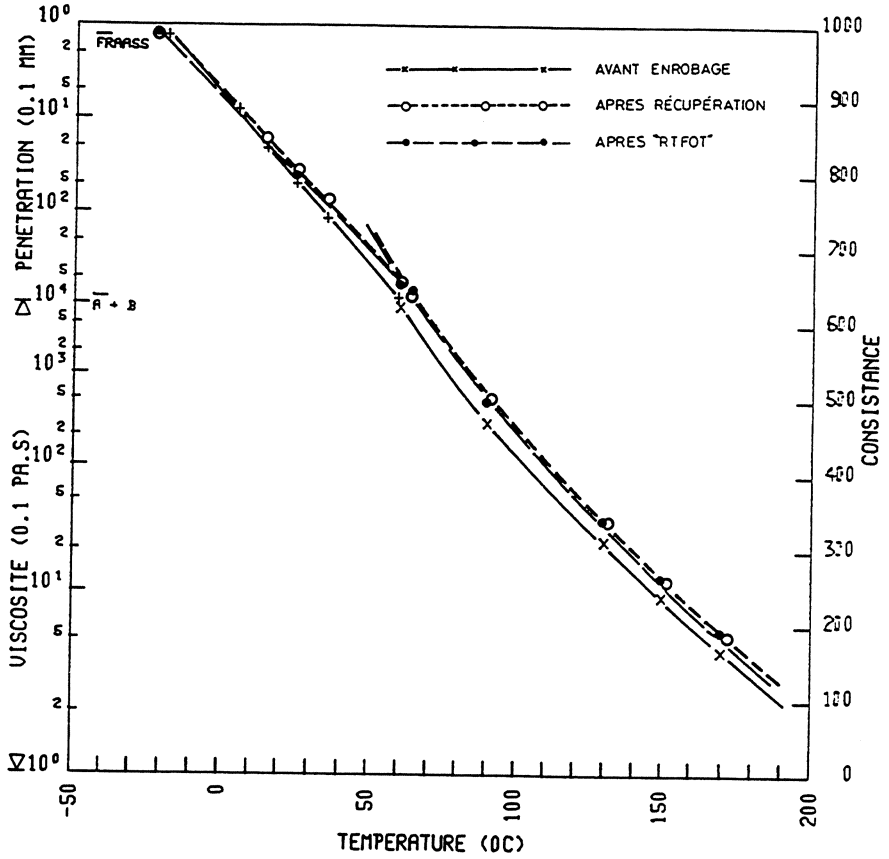


Figure H.7: *Diagrammes d'Heukelom du liant 7: A la livraison, après récupération au temps 0 et après vieillissement artificiel RTFOT*

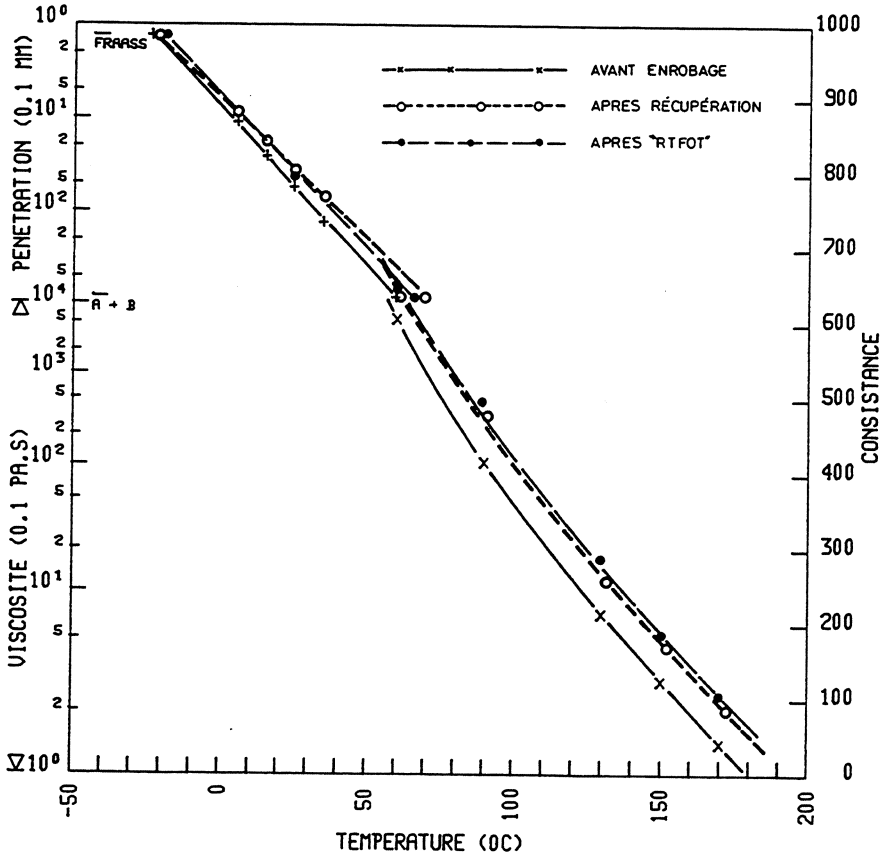


Figure H.8: *Diagrammes d'Heukelom du liant 8: A la livraison, après récupération au temps 0 et après vieillissement artificiel RTFOT*

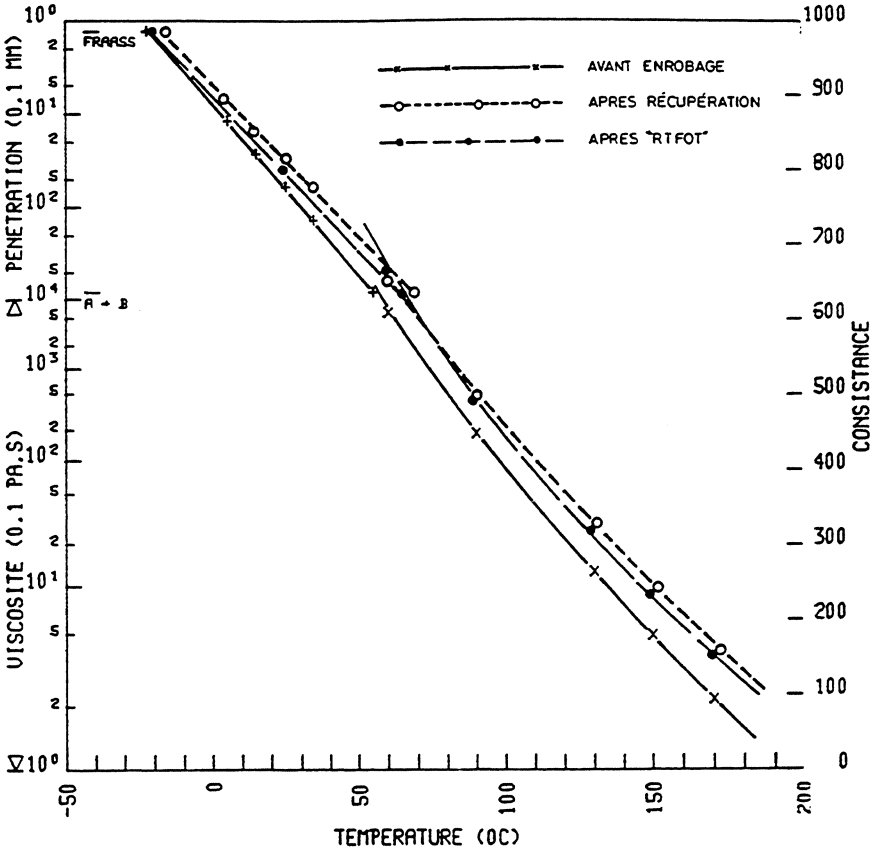


Figure H.9: *Diagrammes d'Heukelom du liant 9: A la livraison, après récupération au temps 0 et après vieillissement artificiel RTFOT*

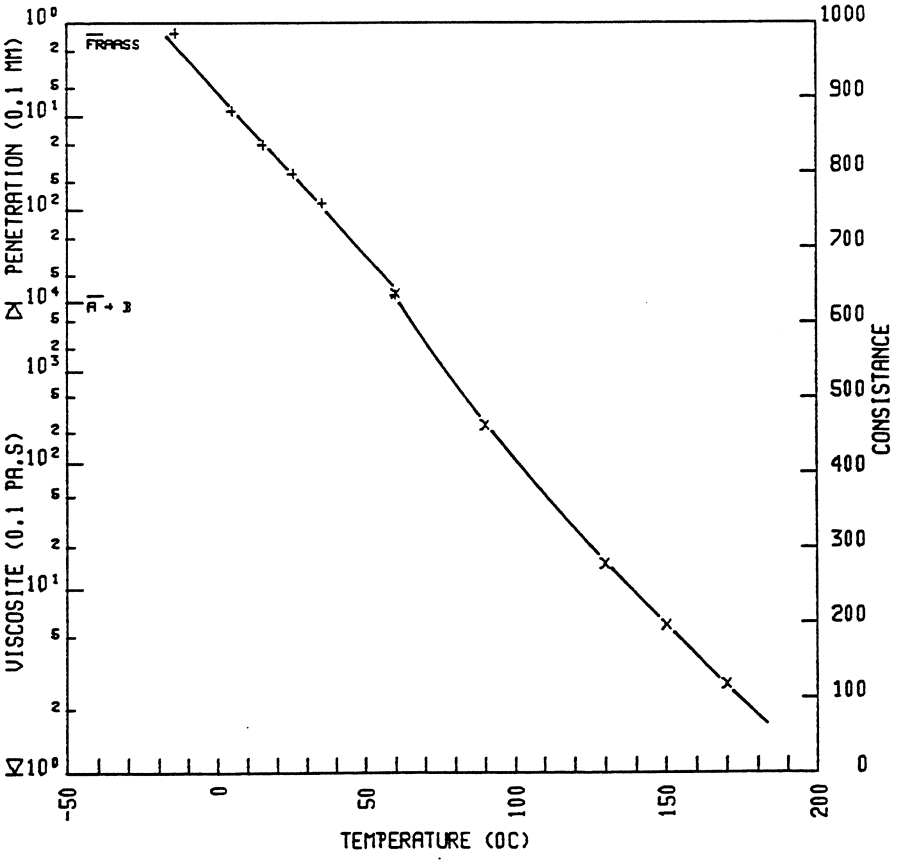


Figure H.10: *Diagrammes d'Heukelom du liant 10 après récupération au temps 0 et après vieillissement artificiel RTFOT*

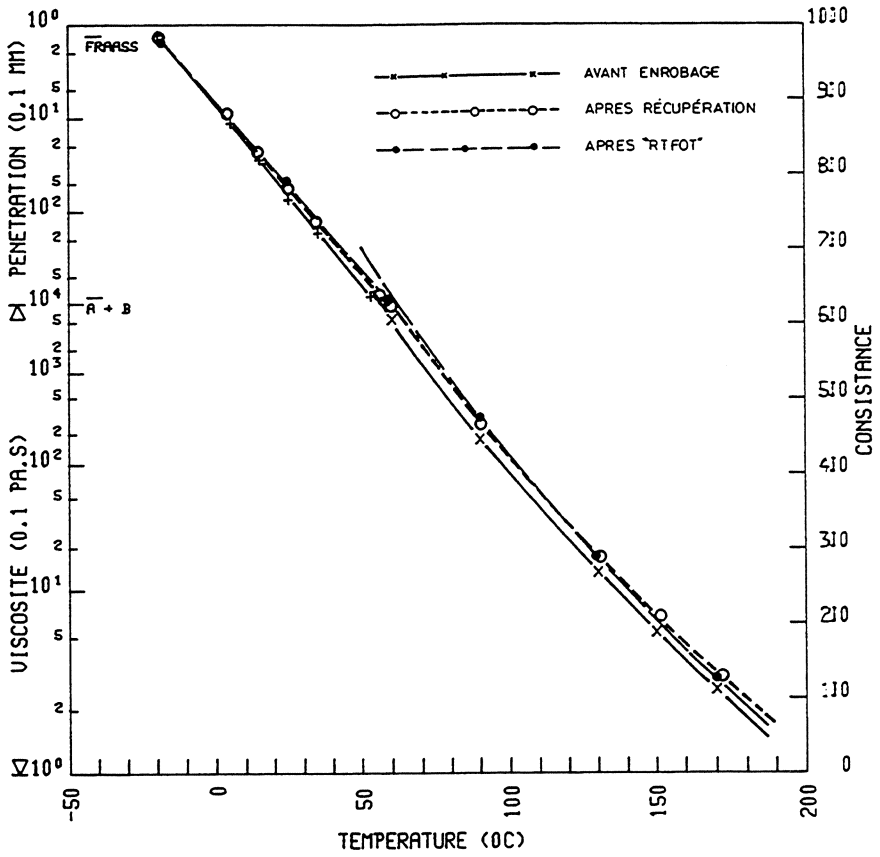


Figure H.11: *Diagrammes d'Heukelom du liant 11: A la livraison, après récupération au temps 0 et après vieillissement artificiel RTFOT*

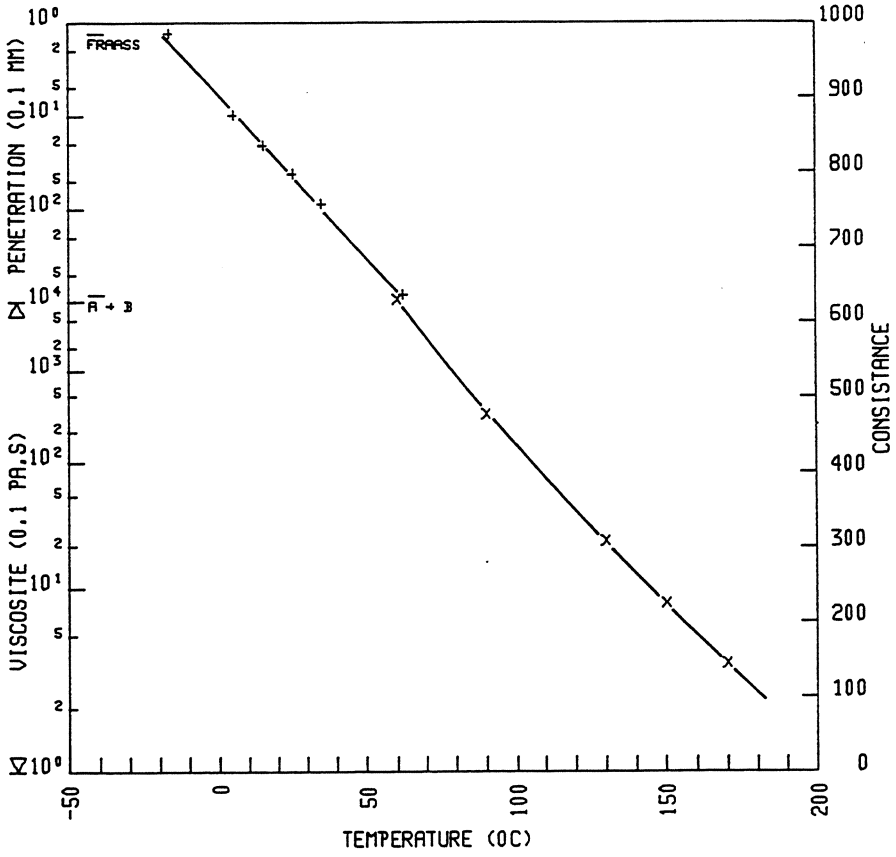


Figure H.12: *Diagrammes d'Heukelom du liant 12: A la livraison, après récupération au temps 0 et après vieillissement artificiel RTFOT*

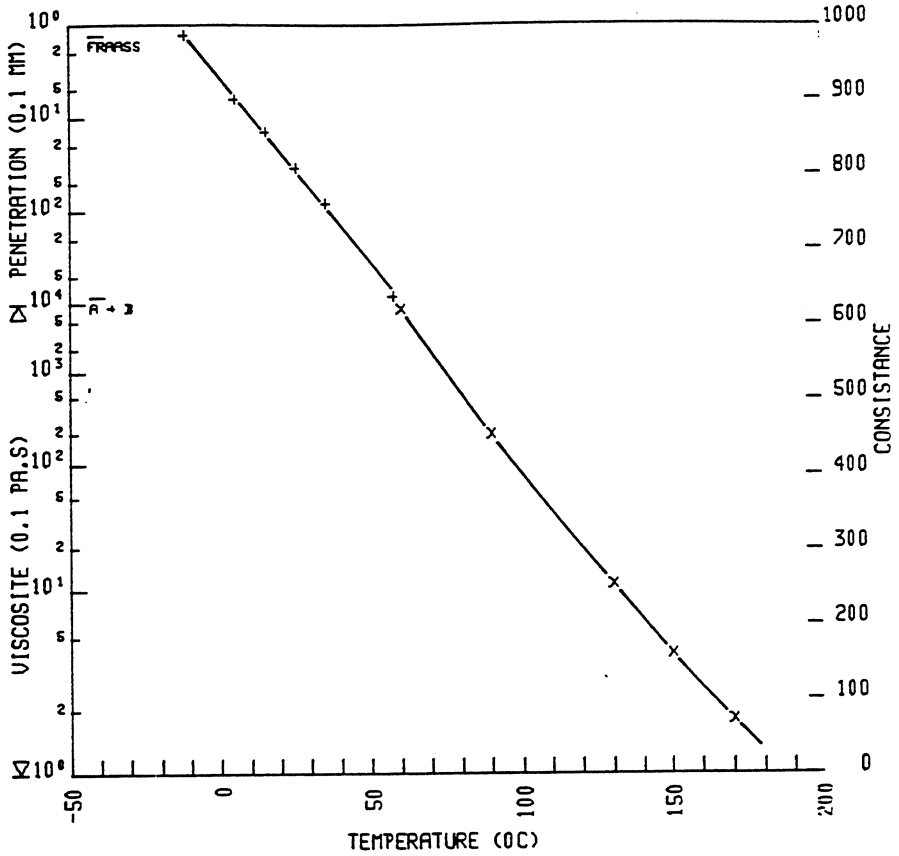


Figure H.13: *Diagrammes d'Heukelom du bitume 13 après récupération au temps 0 et après vieillissement artificiel RTFOT*

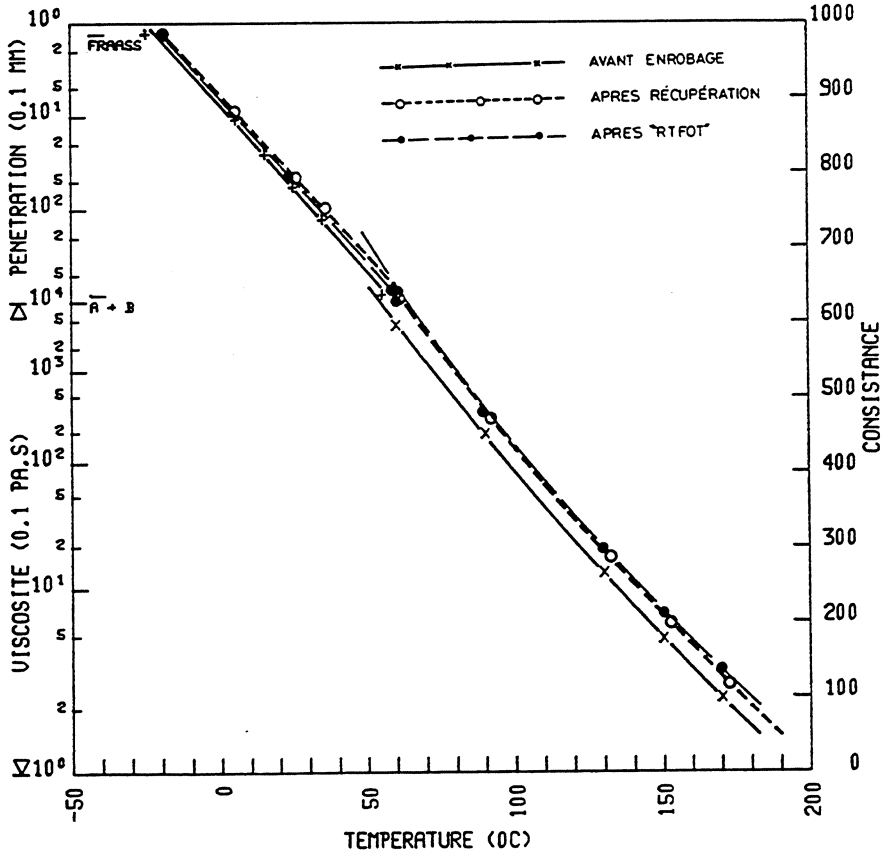


Figure H.14: *Diagrammes d'Heukelom du liant 14: A la livraison, après récupération au temps 0 et après vieillissement artificiel RTFOT*

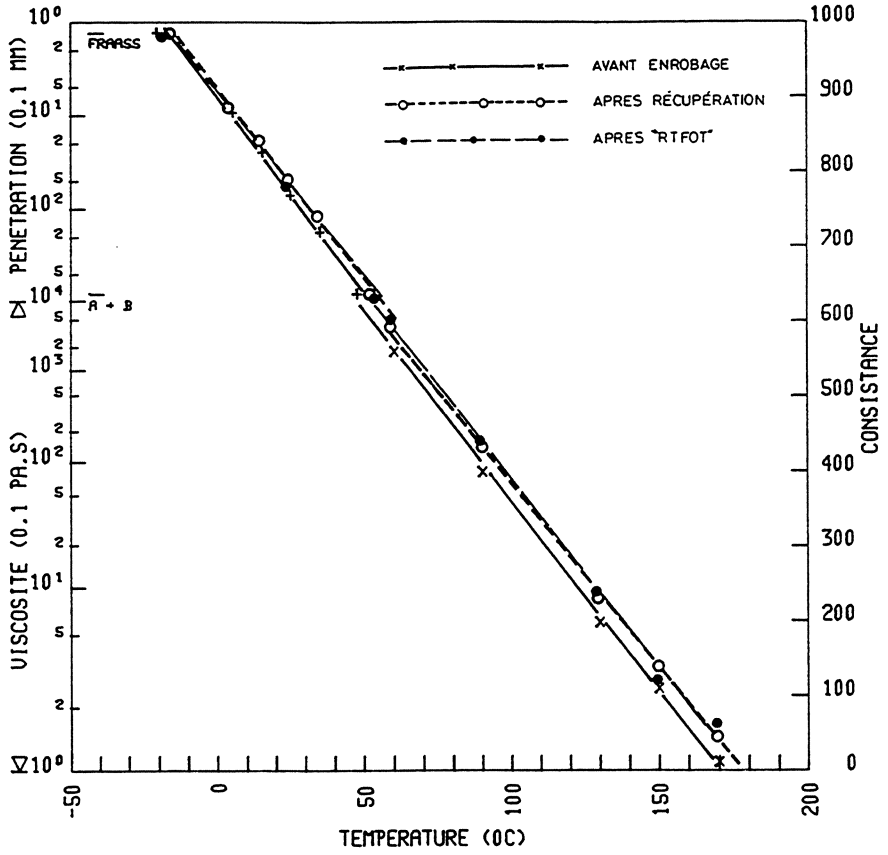


Figure H.15: *Diagrammes d'Heukelom du bitume 15: A la livraison, après récupération au temps 0 et après vieillissement artificiel RTFOT*

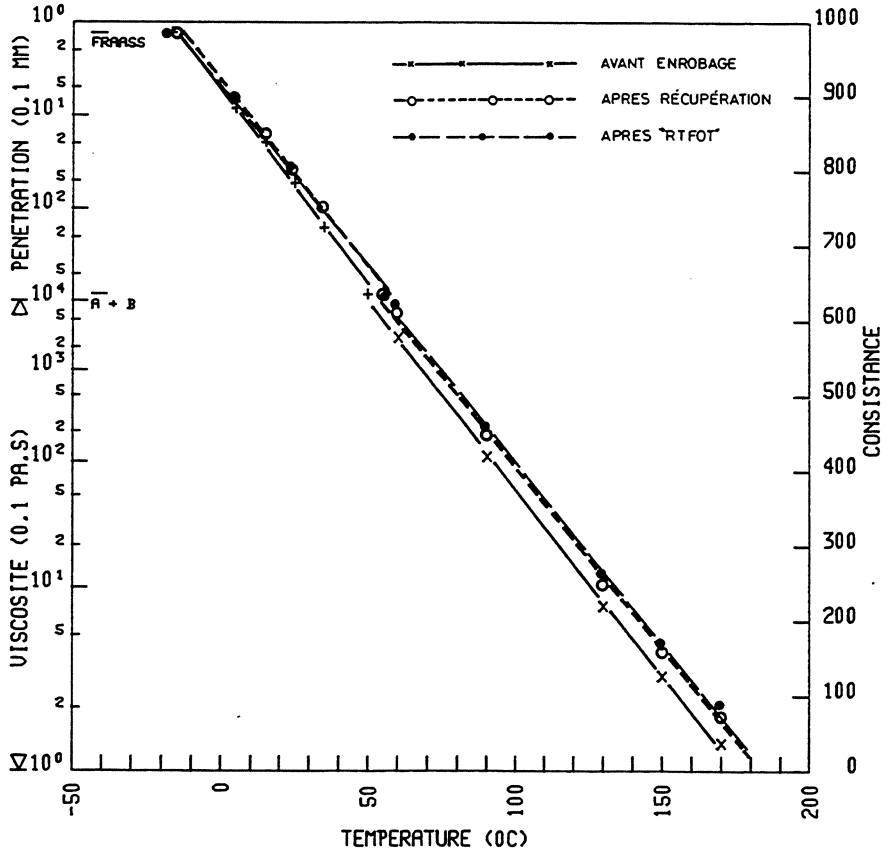


Figure H.16: *Diagrammes d'Heukelom du bitume 16: A la livraison. après récupération au temps 0 et après vieillissement artificiel RTFOT*

ANNEXE I

Droites de régression entre le taux d'évolution global des caractéristiques des liants extraits et l'indice de dégradation apparente de la chaussée

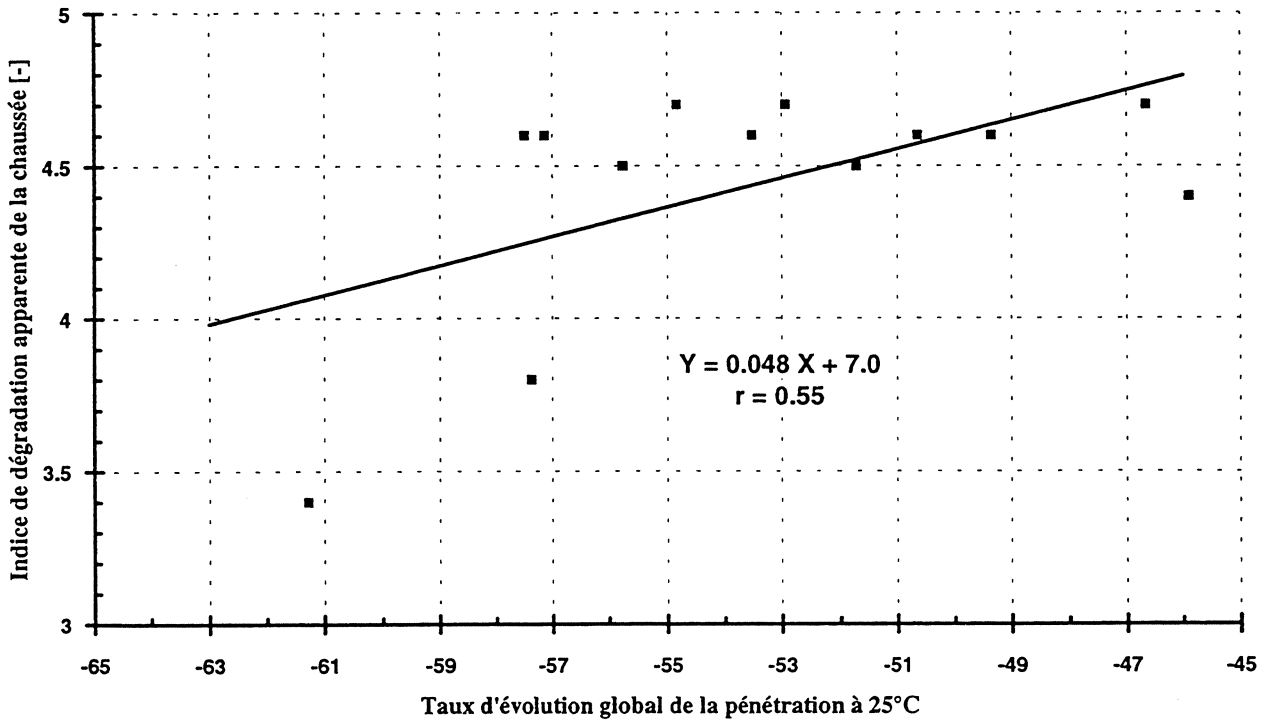


Figure I.1: *Droite de régression entre le taux d'évolution global de la pénétration à 25 °C et l'indice de dégradation apparente de la chaussée*

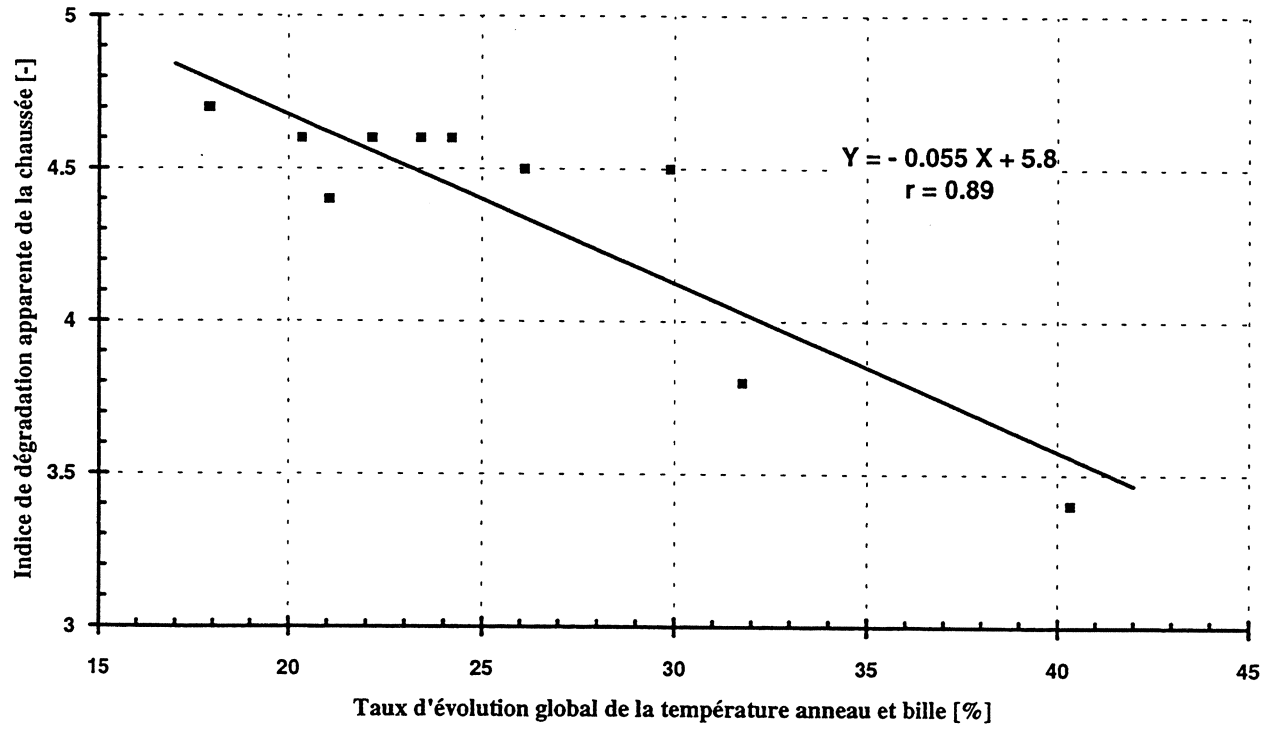


Figure I.2: *Droite de régression entre le taux d'évolution global de la température anneau et bille et l'indice de dégradation apparente de la chaussée*

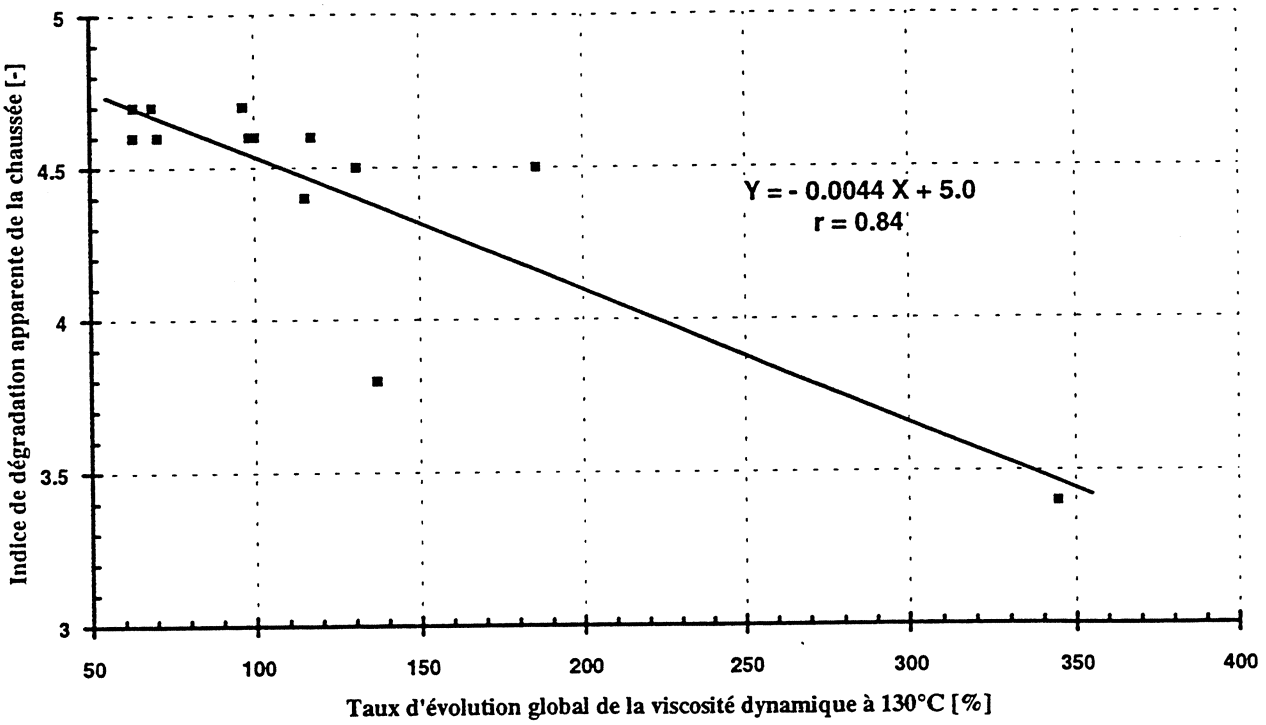


Figure I.3: *Droite de régression entre le taux d'évolution global de la viscosité dynamique à 130 °C et l'indice de dégradation apparente de la chaussée*

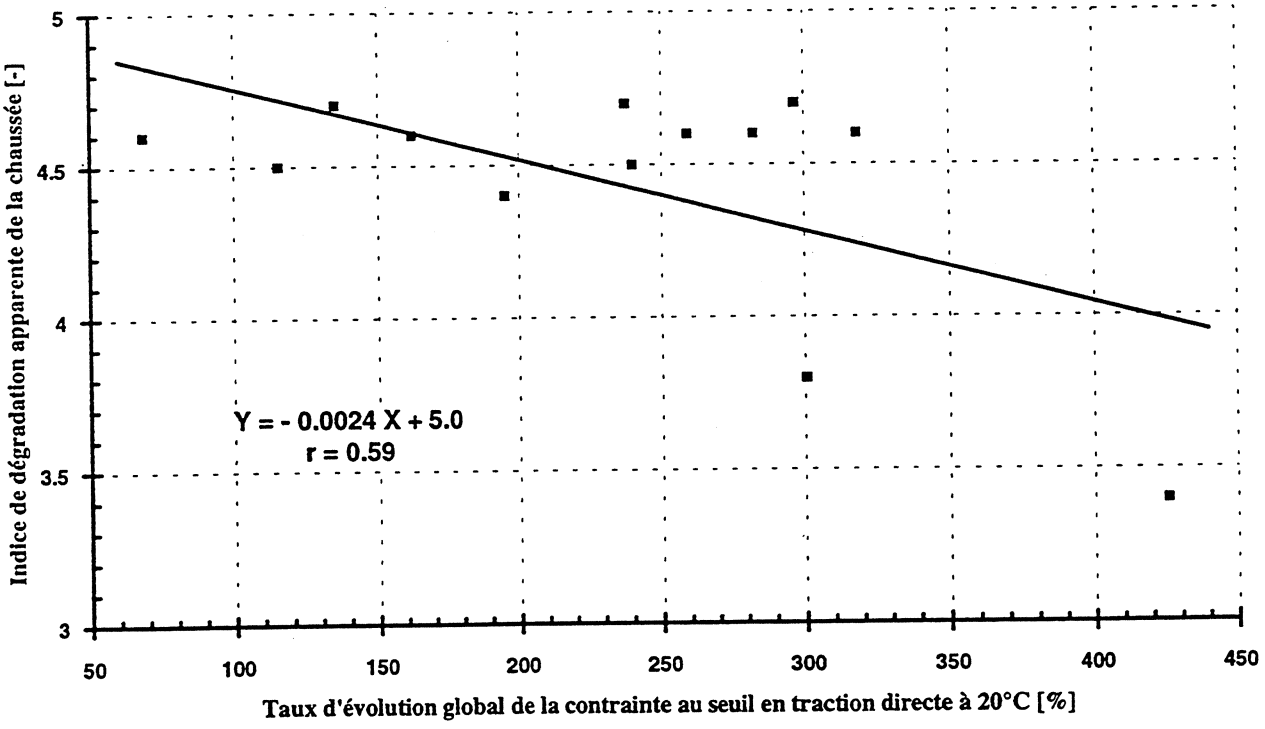


Figure I.4: *Droite de régression entre le taux d'évolution global de la contrainte au seuil en traction directe à 20 °C et l'indice de dégradation apparente de la chaussée*

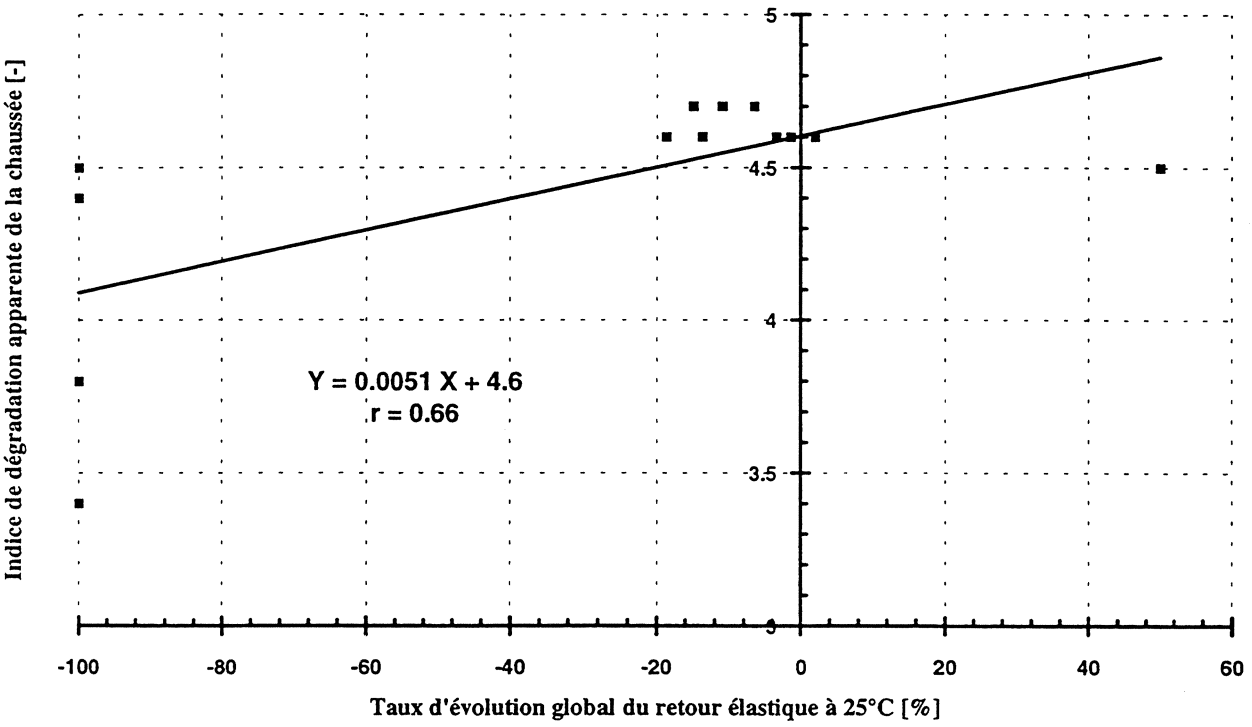


Figure I.5: *Droite de régression entre le taux d'évolution global du retour élastique à 25 °C et l'indice de dégradation apparente de la chaussée*

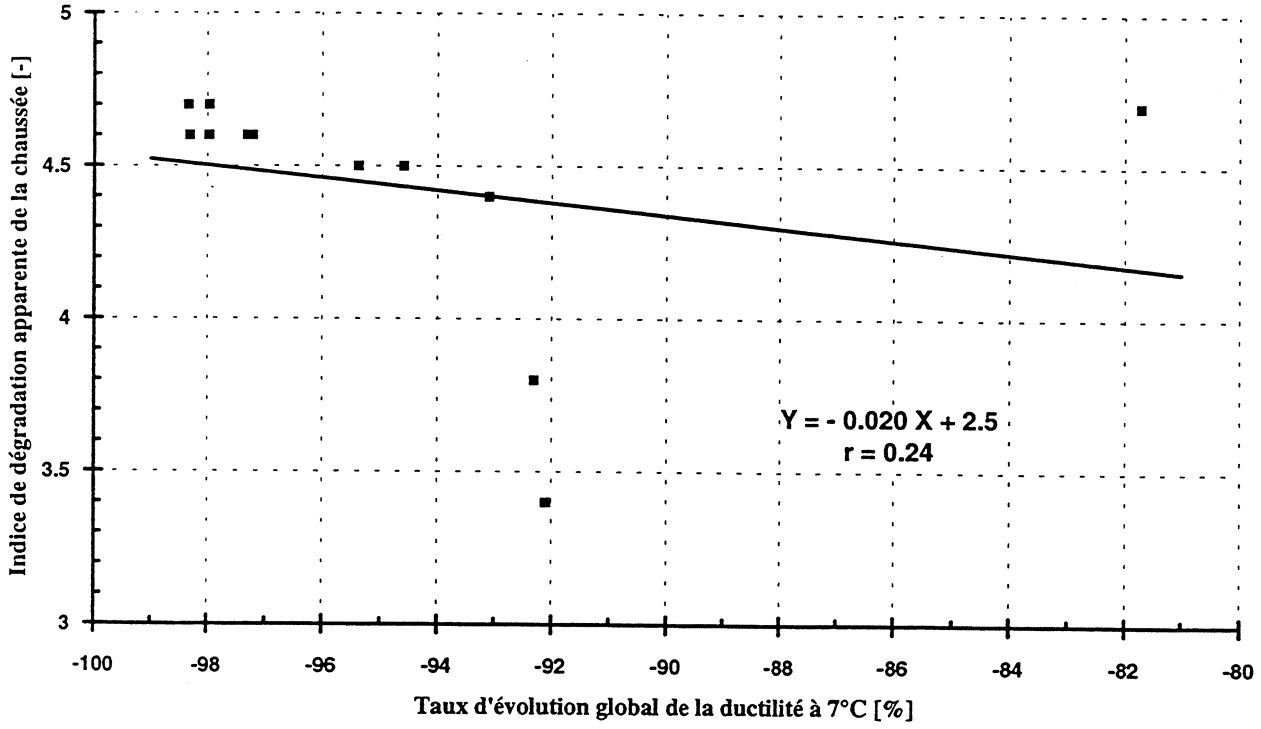


Figure I.6: *Droite de régression entre le taux d'évolution globale de la ductilité à 7°C et l'indice de dégradation apparente de la chaussée*

ANNEXE J

Principe de l'essai de teneur en asphaltènes

TENEUR EN ASPHALTENES (AFNOR P 60115)

L'essai consiste, dans des conditions opératoires données et avec un appareillage normalisé, à précipiter les fractions du bitume insolubles dans l'heptane normal: les asphaltènes, puis après les avoir lavées et séchées, à en déterminer le poids que l'on rapporte à celui de la prise d'essai pour en calculer la teneur.

L'heptane est un solvant sélectif qui permet de fractionner le bitume en deux parties:

- la fraction dissoute, les maltènes, a l'aspect d'une huile visqueuse présentant un caractère newtonien,

- la fraction précipitée, les asphaltènes, est constituée par des corps de haut poids moléculaire ayant l'aspect d'une substance solide et noirâtre qui confère au bitume des propriétés caractéristiques de l'état colloïdal.

Les asphaltènes ont tendance à absorber la fraction la plus lourde des maltènes en formant des micelles en suspension dans les maltènes. La répartition des deux fractions dépend notamment de l'origine du brut, du mode de fabrication en raffinerie, mais aussi de l'histoire thermique du liant.

Ainsi, le vieillissement se traduit par une augmentation importante de la teneur en asphaltènes par rapport à la phase maltènes.

La répartition des deux phases conduit à des caractéristiques rhéologiques pouvant couvrir le domaine du comportement newtonien (sol) à celui du comportement non newtonien (gel).

Différentes études sur la fissuration thermique ont mis en évidence un facteur de risque lié à un dosage important en asphaltènes situé au-delà de 20 %.