EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES INTRINSEQUES DES BITUMES LORS DE LA THERMOREGENERATION IN SITU DES BETONS BITUMINEUX

Verhalten der eigentlichen Charakteristiken der Bitumen durch Thermoregeneration der Asphaltbetons an Ort und Stelle

Bureau d'ingénieurs Ertec S.A., Le Mont-sur-Lausanne

Jean-Claude Turtschy, ingénieur civil diplômé EPFL
Jean-Louis Cuénoud, ingénieur civil diplômé EPFL

Mandat de recherche 4/91 sur proposition de l'Union des professionnels suisses de la route (VSS)

Septembre 1994

TABLE DES MATIERES

		Page
	Symboles et abréviations	iii
	RESUME	v
1.	INTRODUCTION	1
2.	PRINCIPE DE LA THERMOREGENERATION	2
3.	ORGANISATION DE L'ETUDE	4
3.1	But	4
3.2	Déroulement de l'étude	4
4.	PREMIERE ETAPE	6
4.1	Recensement et choix des chantiers de thermorégénération prévus sur RC ou RN en 1991	6
4.2	Organisation des prélèvements	8
4.3	Températures	10
4.5	Exécution des essais	10
5.	RESULTATS, SYNTHESES ET EVALUATION DES EVOLUTIONS OBSERVEES A DIFFERENTS STADES. DETERMINATION DES REGLES POSSIBLES (LOIS DE CORRELATION)	11
5.1	Paramètres de calcul et modèles d'ajustement	11
5.2	Quantités	14
5.3	Première partie	15
	Synthèse des résultats, analyse statistique et détermination des lois d'évolution possibles sur des caractéristiques liées à la viscosité du liant	15
	5.3.1 Pénétration	16
	5.3.2 Viscosité à 60°C et 130°C	36
	5.3.3 Point de ramollissement anneau et bille	55
	5.3.4 Détermination du point de Fraass	63
5.4	Deuxième partie	71
	Synthèse des résultats, analyse statistique et appréciation des autres paramètres ayant fait l'objet d'essais	71

5.4.1 Modification de masse à 163°C 72
5.4.2 Teneur en asphaltènes 75
5.4.3 Teneur en cendres 78
5.4.4 Désenrobage 81
5.4.5 Ductilité 84
5.4.6 Indice de pénétration 87

6. COMMENTAIRES 90

6.1 Lois d'évolution 90
6.2 Autres paramètres mesurés 94

7. CONCLUSIONS 95

ANNEXES
I) Questionnaire au maître d'ouvrage 97
II) Abaques de dosage en liants régénérant 99
III) Abaques sur l'évolution des caractéristiques liées à la viscosité des bitumes 101

Symboles et abréviations

Echantillons :

x	:	Bitume de l'échantillon carotté sur l'enrobé en place avant réchauffage et scarification
A	:	Bitume de l'échantillon de l'enrobé en place après réchauffage et scarification
B	:	Bitume de l'enrobé d'apport avant fabrication
C	:	Bitume de l'enrobé thermorégénéré
D	:	Bitume de l'enrobé d'apport après fabrication
E	:	Liant régénérant
a	:	L'indice (a) se réfère à l'enrobé en place, ou à son bitume
b	:	L'indice (b) se réfère à l'enrobé d'apport, ou à son bitume
e	:	Epaisseur de l'enrobé scarifié
L/E	:	Teneur en liant par rapport à l'enrobé
Régén (C)	:	Teneur en liant régénérant
(1)	:	Valeur théorique du mélange enrobé en place, enrobé d'apport, sans liant régénérant
(2)	:	Valeur théorique du mélange enrobé en place, enrobé d'apport, avec liant régénérant

Résultats d'essais :

P	:	Pénétration
V	:	Viscosité
F	:	Point de Fraass
T	:	Température bille - anneau
R	:	Perte de masse à 163°C
Ce	:	Teneur en cendres
As	:	Teneur en asphaltènes
Du	:	Ductilité
d	:	Désenrobage

Lois d'ajustement :

M	:	Pente de la courbe d'ajustement
H	:	Ordonnée à l'origine de la courbe d'ajustement
c	:	Coefficient de corrélation

RESUME

La thermorégénération in situ est un procédé qui permet de régénérer en place le liant de l'enrobé de surface, de modifier éventuellement, selon les besoins, la composition du matériau traité par ajout de façon à obtenir, après traitement, un matériau aux caractéristiques et propriétés semblables à celles d'un enrobé neuf.

Même si ce procédé possède un avenir certain de par ses avantages économiques et écologiques, il ne fait, à l'heure actuelle encore, l'objet d'aucune norme.

De plus, si de nombreux articles se rapportant à la technique concernée ont été édités, aucune publication, après les recherches bibliographiques effectuées, ne se rapporte au problème de l'évolution des caractéristiques du liant lors de la thermorégénération.

Le but de la recherche proposée est donc d'étudier cette évolution aux différentes étapes de la thermorégénération, soit avant et après :

- le réchauffage et la scarification de l'enrobé en place
- la fabrication de l'enrobé d'apport
- le mélange et la pose de l'enrobé thermorégénéré

en fonction :

- des caractéristiques du matériel de thermorégénération
- des caractéristiques du liant de l'enrobé d'apport et de son dosage
- de la nature du liant régénérant

et ceci pour la régénération d'enrobés avec bitumes purs.

Pour tous les paramètres liés à la viscosité qu'Heukelom a regroupés sur un seul abaque, soit :

- Fraas
- pénétration
- viscosité dynamique
- anneau et bille

et pour autant que les différentes températures soient celles prescrites par les normes, il existe des lois d'évolution et ceci pour chaque étape considérée, excepté pour la température anneau et bille étape c) (mélange et pose de l'enrobé thermorégénéré).

Si l'on considère les caractéristiques des bitumes avant et après thermorégénération, on constate l'évolution de deux paramètres, à savoir :

- la ductilité (qui augmente)
- l'adhésivité (qui diminue).

En ce qui concerne le solde des caractéristiques mesurées, on ne constate pas d'évolution significative ou systématique.

Sur ce point, cela nous amène à considérer qu'il conviendrait probablement d'ajouter, lors de la thermorégénération, un dope d'adhésivité.

Il faut également noter que 9 chantiers sur les 10 sélectionnés ont été réalisés par la même entreprise et la même machine, ce qui limite le domaine d'application des lois d'évolution trouvées à l'équipement considéré.

1. INTRODUCTION

La thermorégénération in situ est un procédé qui permet de régénérer en place le liant de l'enrobé de surface, de modifier éventuellement, selon les besoins, la composition du matériau traité par ajout de façon à obtenir, après traitement, un matériau aux caractéristiques et propriétés semblables à celles d'un enrobé neuf.

En outre, la thermérégénération in situ permet de restituer à la chaussée son uni, sa rugosité et son imperméabilité.

La préoccupation actuelle en matière d'économie et d'écologie fait que la thermorégénération in situ possède un potentiel de développement certain.

Utilisée depuis de nombreuses années, tant en Suisse qu'à l'étranger, cette technique ne fait cependant l'objet d'aucune norme.

D'autre part, bien que de nombreux articles se rapportant à la technique concernée aient été édités, aucune publication, d'après la recherche bibliographique effectuée, ne se rapporte au problème de l'évolution des caractéristiques du liant lors de la thermorégénération.

Aussi, le but de la recherche proposée était d'étudier cette évolution à divers stades, soit :

- avant traitement,
- après réchauffage,
- après traitement,

en fonction :

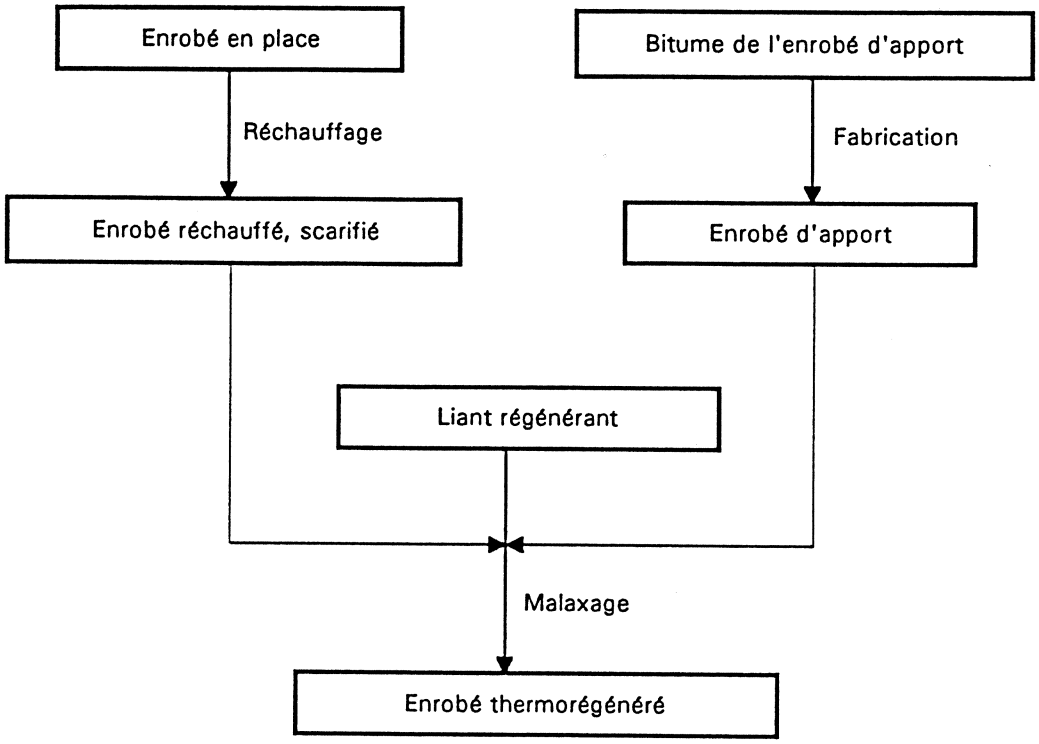
- des caractéristiques du matériel de thermorégénération,
- des caractéristiques du liant de l'enrobé d'apport et de son dosage,
- de la nature du liant régénérant,

dans l'espoir de découvrir des lois d'évolution des caractéristiques du liant aux divers stades de la thermorégénération, permettant de fournir aux professionnels de la route les éléments nécessaires à l'élaboration de règles, voire d'une norme autorisant la réalisation dans les règles de l'art d'une thermorégénération in situ.

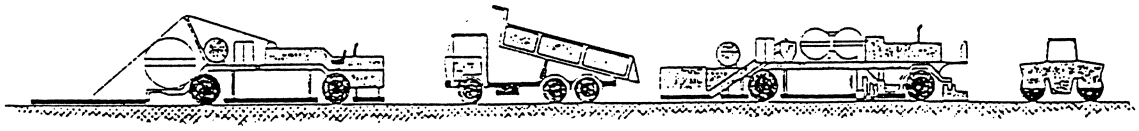
L'étude se limite à la régénération d'enrobés avec des bitumes purs.

2. PRINCIPE DE LA THERMOREGENERATION

Le principe de la thermorégénération peut être décrit par l'organigramme suivant :

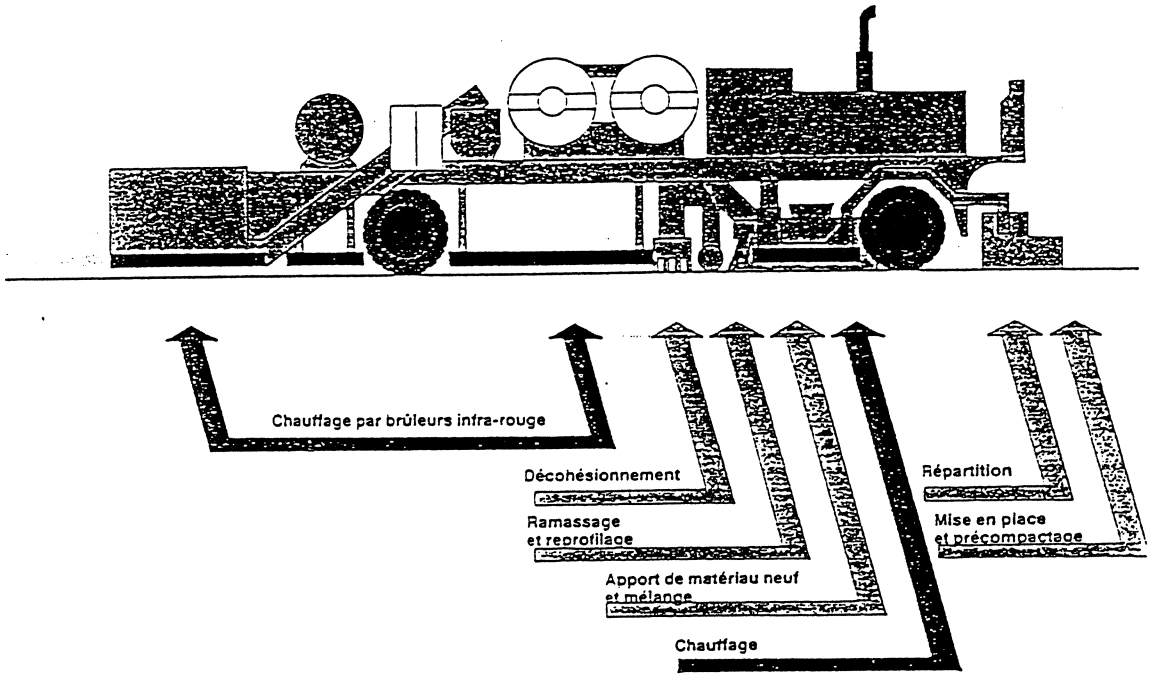


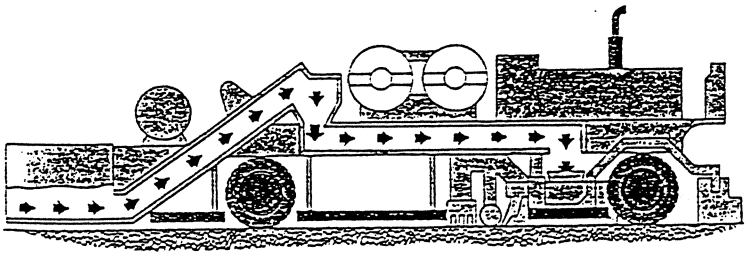
L'équipement utilisé pour ce procédé de réfection des chaussées est représenté ci-après schématiquement.



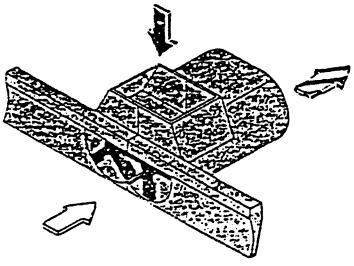
Engins utilisés pour l'application du procédé Remixing

Représentation schématique de la Remixer avec ses différents éléments de travail





Transport de l'enrobé neuf dans le Remixer



Fonctionnement du malaxeur

3. ORGANISATION DE L'ETUDE

3.1 But

Détermination de l'évolution des caractéristiques intrinsèques des bitumes lors de la thermorégénération in situ des bétons bitumineux et recherche des lois d'évolution existantes permettant d'établir des règles, voire une norme autorisant la réalisation dans les règles de l'art d'une thermorégénération in situ.

3.2 Déroulement de l'étude

L'étude s'est déroulée en 3 étapes décrites dans l'ordre chrolonogique ci-dessous :

a) Première étape : (chapitre 4)

- Recensement en début d'année de l'ensemble des chantiers de thermorégénération devant être exécutés sur routes nationales ou cantonales en 1991.

- Choix de 10 chantiers représentatifs du point de vue :

  - géographique
  - de l'importance de la surface traitée
  - de l'équipement utilisé.

- Organisation et réalisation des prélèvements d'échantillons à tous les stades du traitement.

b) Deuxième étape :

- Récupération du bitume sur chacun des échantillons d'enrobé prélevés.

- Analyse de chaque échantillon de bitume.

Les essais et analyses réalisés sont ceux qui définissent les caractéristiques des bitumes purs tels que figurant dans la norme SN 671 110d :

- Mesures de la pénétration à 5, 15 et 25°C
- Point de ramollissement anneau et bille
- Détermination du point de Fraass
- Viscosités dynamiques à 60 et 130°C
- Modification de masse à 163°C
- Teneur en cendres
- Ductilité à 25°C

auxquels nous avons rajouté :

- Teneur en Asphaltènes
- Essai de désenrobage selon le mode opératoire de l'EMPA.

c) Troisième étape : (chapitre 5)

- Résultats et synthèses.

- Analyses statistiques.

- Recherche des lois d'évolution des diverses caractéristiques des liants.

4. PREMIERE ETAPE

4.1 Recensement et choix des chantiers de thermorégénération prévus sur RC ou RN en 1991

Un questionnaire, dont un exemple type est présenté en annexe (I), a été envoyé aux ingénieurs cantonaux. La liste des chantiers de thermorégénération in situ devant être réalisés durant la saison 1991 au niveau cantonal est la suivante :

N°	CANT	LIEU	MAÎTRE D'OUVRAGE	SERVICE
RC 763 d	VD	Bellevue - Chenaux	DTP / VD	Routes & autoroutes
RC 701 c	VD	Oron le Châtel - Limite VD	DTP / VD	Routes & autoroutes
RD 749 c	VD	Palézieux - Limite VD	DTP / VD	Routes & autoroutes
RC 37	GE	Route Etraz - Chavannes	DTP / GE	Entretien
AE CARTAGNY	GE	Rte de Chancy - Moulin Ratte	DTP / GE	Entretien
N 13	SG	Widnau - Kiessern	Kant. Strasseninspektorat	Unterhalt
	TG	Balterswil - Bichelsee	Tiefbauamt	Unterhalt R.N.
N 2	NW		Kantoningenieursbüro	Bauleiter
RC 18 a	JU	Saignelégier - les Emibois	Service Ponts & Chaussées	Routes cantonales
	FR	Mottet - Frasses	DTP / FR	Routes cantonales
	FR	Broc - Bulle	DTP / FR	Routes cantonales
	FR	Tour de Trême - Gruyère	DTP / FR	Routes cantonales
	FR	La Roche - Hauteville	DTP / FR	Routes cantonales
9116	NE	Fleurier - Boveresse	Service Ponts & Chaussées	Office rtes cant.
N 1	BE	Wankdorf	Tiefbauamt	

De cette liste, les chantiers suivants ont été retenus :

N°	CANT	LIEU	MAÎTRE D'OUVRAGE	SERVICE	ENTREPRISES	SOUS-TRAITANT	DATE
008	VD	Oron - St-Martin	DTP / VD	Routes & autoroutes	SATEG	REMIX AG	2.9.91
009	GE	Route Sauvergny - Frontière	DTP / GE	Entretien	SIMOND	—	7.10.91
001	SG	Widnau - Kiessern	Kant. Strasseninspektorat	Unterhalt	STUAG AG	REMIX AG	25.6-1.7.91
007	TG	Balterswil - Bichelsee	Tiefbauamt	Unterhalt R.N.	HUEPPI	REMIX AG	5 & 6.8.91
001	FR	Mottet - Frasses	DTP / FR	Routes cantonales	STUAG AG	REMIX AG	8 & 9.7.91
004	FR	Broc - Bulle	DTP / FR	Routes cantonales	STUAG AG	REMIX AG	11 & 12.7.91
005	FR	Tour de Trême - Gruyère	DTP / FR	Routes cantonales	STUAG AG	REMIX AG	23 & 24.7.91
006	FR	La Roche - Hauteville	DTP / FR	Routes cantonales	STUAG AG	REMIX AG	30 & 31.7.91
010	NE	Fleurier - Boveresse	Service Ponts & Chaussées	Office rtes cant.	STUAG NE	REMIX AG	17 & 18.9.91
003	BE	Wankdorf	Tiefbauamt		KOENIG	REMIX AG	9 & 10.7.91

4.2 Organisation des prélèvements

En fonction des quantités nécessaires à la réalisation des essais retenus et compte tenu d'une réserve permettant de refaire des essais dont les résultats seraient douteux ou erronés, les quantités de matériaux suivantes ont été prélevées :

Matériau	Echant.	Lieu	Mode prél.	Quantité	Masse bit.	Masse enrobé kg
Enrobé avant réchauffage	x	Chantier	Carottage	30 pièces	---	25
Enrobé en place après réchauffage	A	Chantier	Pelle ,avant dégrappage	25 kg	---	25
Enrobé d'apport	B	Chantier	Pelle, sur camion	25 kg	---	25
Enrobé traité avant compactage	C	Chantier	Pelle, dans la vis	25 jg	---	25
Bitume enrobé d'apport	D	Poste, dans cuve	Louche	1 kg	1 kg	---
Liant régénérant	E	Chantier	Louche	1 kg	1 kg	---
				TOTAL :	2 kg	100

Remarque :

Tous les échantillons prélevés in situ doivent concerner une zone particulière définie préalablement, surtout pour les échantillons x, A et C.

La zone doit être suffisamment grande pour que la quantité de matériaux à prélever n'ait pas d'influence notable sur le fini de la chaussée et suffisamment petite pour éviter les variations de qualité des différents matériaux.

Au total, il faut prélever 75 kg (3 x 25) d'enrobé en place, dégrappé et mis en oeuvre. En admettant un traitement sur 3,5 cm et une influence négligeable lorsque la masse prélevée représente moins de 1 % de l'enrobé, la surface nécessaire est de :

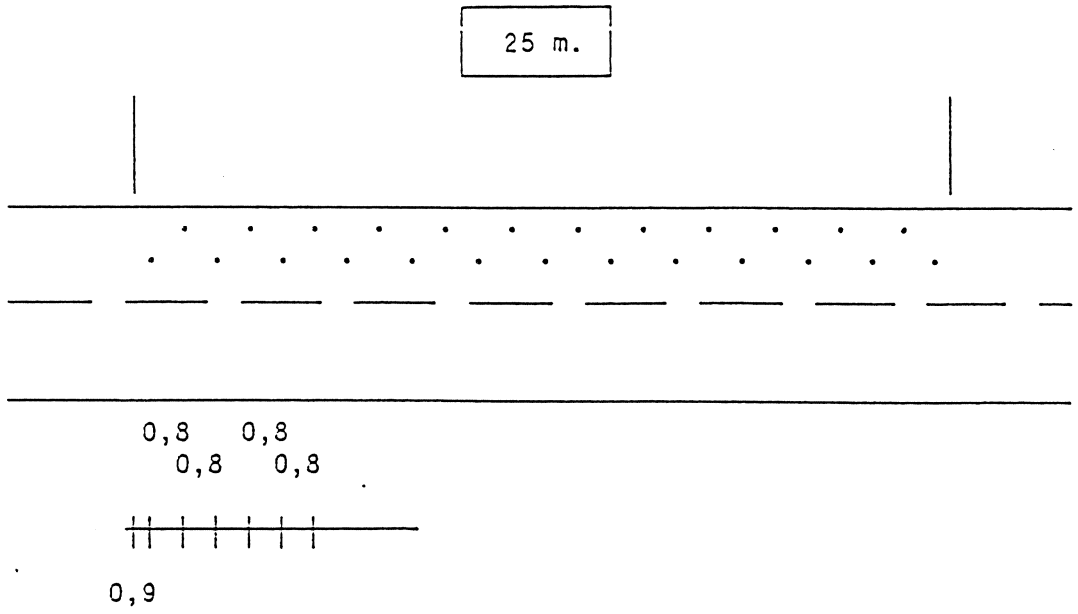
$$\frac{75}{3{,}5 \cdot 24} \cdot 100 \cong \underline{\underline{89\,\mathrm{m}^2}}$$

ce qui représente pour une largeur de 3,5 m, une zone de 25 m de long environ.

Pour chaque chantier, une zone de 25 m a été définie préalablement, en tenant compte de la longueur du chantier, de l'aspect de surface (zone homogène) et de la vitesse des machines.

Les opérations suivantes ont toujours été effectuées dans l'ordre, soit :

a) Carottage avant traitement de la zone repérée, comme suit :



b) Mise en place, après réchauffage mais avant fraisage, de billes d'acier dans l'enrobé, au début de la zone sélectionnée. Ces billes permettent de repérer la translation que subit l'enrobé par le passage en machine, de manière à prélever l'enrobé régénéré issu de la zone de prélèvement des carottes.

   Les billes, après passage en machine, sont repérées avec un détecteur à métaux.

c) Prélèvement de l'enrobé d'apport dans la trémie et du liant régénérant dans la cuve sur la machine 10 à 20 mètres avant la zone repérée.

d) Prélèvement de l'enrobé en place après réchauffage, juste avant la scarification, à raison d'environ 1 kg à chaque mètre dans la zone repérée.

e) Prélèvement de l'enrobé régénéré dans la vis du finisher (env. 1 kg à chaque mètre d'avancement) après repérage des billes d'acier.

f) Prélèvement du bitume servant à la fabrication de l'enrobé d'apport au poste d'enrobage le même jour.

4.3 Températures

		Enrobé d'apport				
n° chantier	avant scarification	bitume avant enrobage	bitume après enrobage	Mélange dans la trémie	Liant régénérant avant injection	Mélange final à la vis
001	pas renseigné					
002	157.0 °C	155.0 °C	155.0 °C	153.0 °C	pas de régénérant	136.0 °C
003	164.5 °C	155.0 °C	155.0 °C	155.0 °C	pas de régénérant	147.0 °C
004	180.0 °C	155.0 °C	160.0 °C	155.0 °C	30.0 °C	119.0 °C
005	167.0 °C	155.0 °C	160.0 °C	143.0 °C	25.0 °C	122.0 °C
006	185.0 °C	155.0 °C	160.0 °C	148.0 °C	30.0 °C	128.0 °C
007	172.0 °C	155.0 °C	150.0 °C	160.0 °C	130 °C (*)	120.0 °C
008	175.0 °C	155.0 °C	155.0 °C	135.0 °C	30.0 °C	125.0 °C
009	184.0 °C	160.0 °C	160.0 °C	160.0 °C	27.0 °C	124.0 °C
010	180.0 °C	162.0 °C	160.0 °C	165.0 °C	25.0 °C	130.0 °C

(*) : Pour le chantier 007, le régénérant est composé de 90 % de bitume B 180/220 et de 10 % d' Enerflex 81.

4.4 Récupération du liant

La récupération du liant a été effectuée selon la norme SN 671 860 "Liants bitumineux, prescriptions d'essai - Récupération du liant résiduel de solutions provenant d'extractions".

4.5 Exécution des essais

Les essais normalisés ont été réalisés conformément aux modes opératoires ad hoc figurant dans les normes concernées.

L'essai de désenrobage a été réalisé selon le mode opératoire mis au point par l'EMPA. (granulats STAMM). Quant à la détermination de la teneur en asphaltène, elle a été réalisée en sous-traitance par la STIA, selon leur mode opératoire et méthode.

5. RESULTATS, SYNTHESES ET EVALUATION DES EVOLUTIONS OBSERVEES A DIFFERENTS STADES. DETERMINATION DES REGLES POSSIBLES (LOIS DE CORRELATION)

Dans ce chapitre, nous aborderons successivement les points suivants :

- Paramètres de calculs et modèles d'ajustement sélectionnés.

- Synthèses des quantités des différents chantiers (chapitre 5.2).

- Synthèse des résultats, analyse statistique, recherche de toutes les lois d'ajustement en fonction des paramètres et modèles choisis par essai et par étape de la thermorégénération, à savoir :

  étape a) : réchauffage et scarification de l'enrobé en place

  étape b) : fabrication de l'enrobé d'apport

  étape c) : mélange des enrobés, ajout du liant régénérant et pose de l'enrobé thermorégénéré.

- Evaluation des corrélations obtenues et sélection des lois pour les diverses caractéristiques.

- Appréciation des lois retenues et de leurs paramètres (ordonnée à l'origine et pente) (chapitre 5.4).

5.1 Paramètres de calcul et modèles d'ajustement

Préambule

Excepté pour le chantier 001 où nous n'avons pas eu de renseignement, les températures observées sont toutes dans les exigences de la norme et à peu près identiques entre les différents chantiers. C'est pourquoi, nous n'en tenons pas compte dans la suite de l'étude.

Les paramètres pris en compte pour l'établissement des lois de corrélation sont, par étape :

• réchauffage et scarification	:	épaisseur de l'enrobé scarifié	:	e
		teneur en liant de l'enrobé scarifié	:	L/E (a)
• fabrication enrobé d'apport	:	teneur en liant de l'enrobé d'apport	:	L/E (b)
• mélange enrobés + régénérant	:	pourcentage des composants du mélange	:	a; b
		teneur en liant régénérant	:	Régén (C).

Le choix de ces paramètres a été fait dans le but de déterminer si :

- l'épaisseur d'enrobé scarifié et sa teneur en liant influencent l'évolution des caractéristiques intrinsèques du bitume

- la teneur en liant peut faire varier l'évolution des caractéristiques de l'enrobé d'apport

- sur quelles caractéristiques et de quelle manière le liant régénérant agit-il ?

On tentera d'apporter les réponses à ces questions dans les chapitres suivants.

Ces paramètres amènent à étudier les cas suivants :

- étape a) : $A = f(x)$
  $A = f(x; e)$
  $A = f(x; L/E\ (a))$
  $A = f(x; L/E\ (a); e)$

- étape b) $B = f(D)$
  $B = f(D; L/E\ (b))$

- étape c) $C = f(a; b; Régén\ (C))$

Remarques :

- Pour la 1ère étape, soit réchauffage et scarification, il n'a pas été possible de tenir compte de la puissance de chauffe ou la vitesse d'avancement, puisque pour 9 chantiers, ces paramètres ont été identiques.

- Pour la 3ème phase des essais de pénétration, le cas étudié est le suivant :

$$P\ (C) = f\ (P2)$$

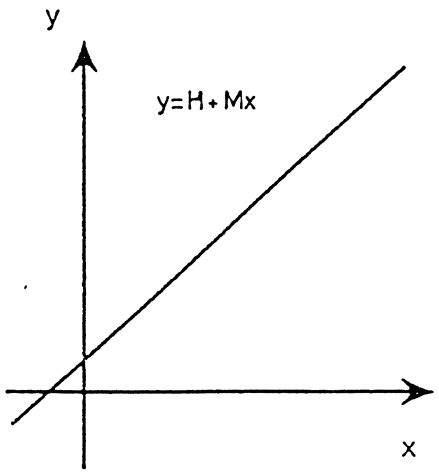
où P (2) est la valeur théorique de la pénétration avec liant régénérant déterminée par abaque (voir tableau de résultats).

- Pour éviter que ce rapport soit trop volumineux, seules les corrélations supérieures à 0,80 sont représentées.

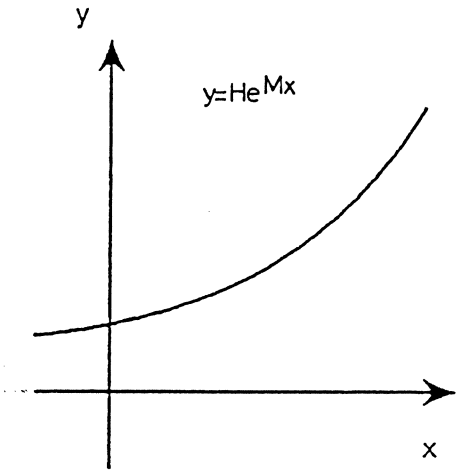
Les corrélations possibles ont été évaluées avec 4 modèles (voir ci-dessous) et sont jugées satisfaisantes lorsque le coefficient de régression c équivaut à :

$$\boxed{c \geq 0{,}80}$$

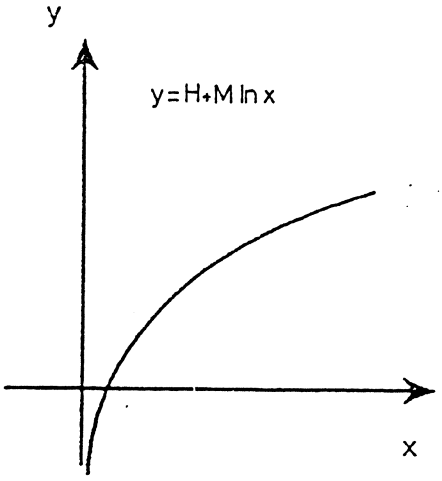
I) Régression linéaire



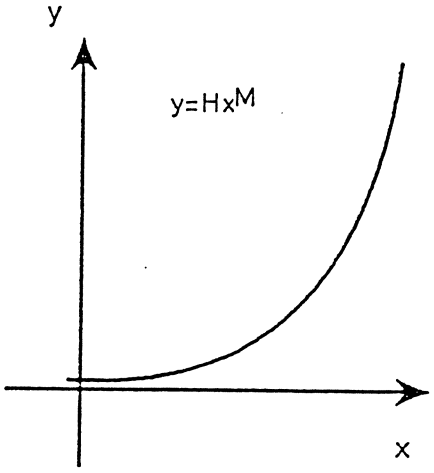
II) Régression exponentielle



III) Régression logarithmique



IV) Régression de puissance



avec : M = pente de la courbe d'ajustement
H = ordonnée à l'origine de la courbe d'ajustement

5.2 Quantités

Les différentes quantités auxquelles il est fait référence tout au long de ce rapport sont répertoriées dans le tableau ci-dessous :

Synthèse des paramètres des différents chantiers

	ENROBE SCARIFIE (a)				ENROBE D'APPORT (b)			MELANGE (a)/(b)		LIANT REGENERANT			BITUME AJOUT		FINAL
n° chant	e [cm]	L/E (a) [%]	B (a) [kg/m²]	M (a) [kg/m²]	L/E (b) [%]	B (b) [kg/m²]	M (b) [kg/m²]	a [%]	b [%]	Type [-]	Ajout [g/m²]	Ajout [%]	Ajout [g/m²]	Ajout [%]	B (tot) [kg/m²]
001	4.0	5.20%	4.972	95.618	2.00%	0.200	10	96.10%	3.90%	Ener 81	280	5.14%	0	0.00%	5.452
002	3.0	5.77%	4.103	71.108	4.20%	1.260	30	76.50%	23.50%	-	0	0.00%	0	0.00%	5.363
003	3.0	5.73%	4.077	71.150	5.30%	1.272	24	76.20%	23.80%	-	0	0.00%	0	0.00%	5.349
004	3.0	5.01%	3.603	71.918	5.40%	1.944	36	65.00%	35.00%	Ener 81	300	5.13%	0	0.00%	5.847
005	3.5	5.27%	4.405	83.579	5.00%	1.800	36	71.00%	29.00%	Ener 81	300	4.61%	0	0.00%	6.505
006	3.0	6.41%	4.515	70.439	5.20%	1.248	24	78.30%	21.70%	Ener 81	150	2.54%	0	0.00%	5.913
007	3.0	6.35%	4.477	70.501	4.30%	2.064	48	68.40%	31.60%	Ener 81	36	0.52%	324	4.72%	6.577
008	2.5	6.21%	3.656	58.872	5.40%	1.944	36	65.30%	34.70%	Ener 81	100	1.75%	0	0.00%	5.700
009	3.5	5.80%	4.809	82.922	4.90%	0.882	18	84.50%	15.50%	Ener 81	450	7.33%	0	0.00%	6.141
010	2.5	6.47%	3.795	58.648	3.80%	1.368	36	73.50%	26.50%	Ener 81	90	1.71%	0	0.00%	5.253

Légendes:

a: l'indice (a) se réfère à l'enrobé scarifié ou à son bitume
b: l'indice (b) se réfère à l'enrobé d'apport ou à son bitume

e: épaisseur du matériau scarifié
M(a): quantité d'enrobé scarifié par m^2
M(b): quantité d'enrobé d'apport introduite par m^2
B(a): quantité de bitume dans l'enrobé scarifié
B(b): quantité de bitume dans l'enrobé d'apport
B(tot): masse totale de bitume par m^2

Remarques:

- Seuls les chantiers 002 et 003 n'ont pas reçu de liant régénérant
- Le chantier 007 a reçu un mélange de liant (B 180/220) à 90 % + Enerflex 81 à 10 %
- Dans tous les autres cas, le liant régénérant est Enerflex 81 (abrégé Ener 81).

5.3 Première partie

Synthèse des résultats, analyse statistique et détermination des lois d'évolution possibles sur des caractéristiques liées à la viscosité du liant

Préambule

Les paramètres que l'on considère liés à la viscosité d'un liant bitumineux et qu'Heukelom a réussi à intégrer dans un abaque de telle manière que les résultats obtenus sur 1 échantillon de bitume non modifié soient tous sur une droite, sont :

- la pénétration
- la viscosité dynamique
- la température anneau et bille
- le point de Fraass.

En première partie, il nous a paru dès lors intéressant d'analyser l'évolution de ces paramètres qui font, dans la pratique, l'objet d'analyses fréquentes dans les diverses phases de la thermorégénération et de découvrir les liens d'évolution éventuels.

5.3.1 Pénétration

i) Pénétration à 5°C

Essai: PENETRATION A 5°C

Etape a): RECHAUFFAGE ET SCARIFICATION DE L'ENROBE EN PLACE

	PARAMETRES			RESULTATS					
n° chant	e [cm]	L/E(a) [%]	e * L/E [-]	P(x) [1/10 mm]	P(A) [1/10 mm]	Diff [%]	P'(x) [-]	P''(x) [-]	P'''(x) [-]
001	4.0	5.20%	0.21	5	6	20.0%	20.0	0.26	1.04
002	3.0	5.77%	0.17	5	6	20.0%	15.0	0.29	0.87
003	3.0	5.73%	0.17	7	7	0.0%	21.0	0.40	1.20
004	3.0	5.01%	0.15	4	3	-25.0%	12.0	0.20	0.60
005	3.5	5.27%	0.18	4	2	-50.0%	14.0	0.21	0.74
006	3.0	6.41%	0.19	11	6	-45.5%	33.0	0.71	2.12
007	3.0	6.35%	0.19	8	6	-25.0%	24.0	0.51	1.52
008	2.5	6.21%	0.16	6	5	-16.7%	15.0	0.37	0.93
009	3.5	5.80%	0.20	4	2	-50.0%	14.0	0.23	0.81
010..	2.5	6.47%	0.16	7	6	-14.3%	17.5	0.45	1.13

STATISTIQUES

Minimum:	4	2	-50.0%	12.0	0.20	0.60
Maximum:	11	7	20.0%	33.0	0.71	2.12
Moyenne:	6	5	-18.6%	18.6	0.36	1.10
Ecart-type:	2.234	1.853	0.261	6.300	0.160	0.444

Légendes:

e..... épaisseur de l'enrobé scarifié.
L/E(a)..... teneur en liant de l'enrobé scarifié.
x..... échantillon carotté sur l'enrobé en place, avant réchauffage.
A..... échantillon prélevé sur l'enrobé en place, après réchauffage.
P..... résultat de l'essai de pénétration à 5 °C.

P'(x).... = P(x) * e
P''(x)... = P(x) * L/E(a)
P'''(x).. = P(x) * L/E(a) * e
Diff..... = (P(A) - P(x)) / P(x) * 100

LOI D'AJUSTEMENT:

Aucune corrélation satisfaisante n'a pu être trouvée.

Essai: PENETRATION A 5°C

Etape b): FABRICATION DE L'ENROBE D'APPORT

n° chant	PARAMETRES L/E(b) [%]	RESULTATS P(D) [1/10 mm]	P(B) [1/10 mm]	Diff [%]	P'(D) [-]
001	2.02%	11	7	-36.4%	0.22
002	4.23%	18	13	-27.8%	0.76
003	5.28%	14	9	-35.7%	0.74
004	5.40%	17	11	-35.3%	0.92
005	5.06%	15	10	-33.3%	0.76
006	5.21%	17	11	-35.3%	0.89
007	4.32%	13	9	-30.8%	0.56
008	5.38%	-	11		-
009	4.88%	16	11	-31.3%	0.78
010	3.79%	16	10	-37.5%	0.61

STATISTIQUES

Minimum:	11	7	-37.5%	0.22
Maximum:	18	13	-27.8%	0.92
Moyenne:	15	10	-33.7%	0.69
Ecart-type:	2.224	1.691	0.032	0.210

Légendes:

D..... échantillon de bitume de l'enrobé d'apport, avant fabrication.
B..... échantillon de bitume de l'enrobé d'apport, après fabrication.
L/E(b)..... teneur en liant de l'enrobé d'apport.
P..... résultat de l'essai de pénétration à 5 °C.

P'(D)..... = P(D) * L/E(b)

Diff..... = (P(B) - P(D)) / P(D) * 100

Remarque:
Les valeurs du chantier 008 ont été supprimée à cause de l'absence de prélévement de l'échantillon D.

LOI D'AJUSTEMENT:

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
P(D) P(B)	0.919	P(B) = H + M * P(D)	H = -0.3342 M = 0.6763	lin.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
P(D) P(B)	0.913	P(B) = H + M * ln(P(D))	H = -16.0483 M = 9.5951	log.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
P(D) P(B)	0.936	P(B) = H * exp(M * P(D))	H = 3.3123 M = 0.0714	exp.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.
P'(D) P(B)	0.800	P(B) = H * exp[M * P(D) * L/E(b)]	H = 6.3420 M = 0.6435	exp.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
P(D) P(B)	0.937	P(B) = H * P(D)^M	H = 0.6183 M = 1.0202	puiss.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.
P'(D) P(B)	0.822	P(B) = H * [P(D) * L/E(b)]^M	H = 11.4301 M = 0.3248	puiss.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.

Essai: PENETRATION A 5°C

Etape c): MELANGE ET POSE DE L'ENROBE THERMOREGENERE

	MELANGE			ENROBE THERMOREGENERE				
n° chant	a [%]	b [%]	P(1) [1/10mm]	Régén (C) [%]	P(2) [1/10 mm]	P(C) [1/10 mm]	Diff *)	Diff ' [%]
001	96.10%	3.90%	6	5.14%	10	8	-2	-20.0%
002	76.50%	23.50%	7	0.00%	7	7	0	0.0%
003	76.20%	23.80%	7	0.00%	7	8	1	14.3%
004	65.00%	35.00%	5	5.13%	8	10	2	25.0%
005	71.00%	29.00%	3	4.61%	5	9	4	80.0%
006	78.30%	21.70%	7	2.54%	12	13	1	8.3%
007	68.40%	31.60%	7	0.52%	8	8	0	0.0%
008	65.30%	34.70%	7	1.75%	9	8	-1	-11.1%
009	84.50%	15.50%	3	7.33%	5	5	0	0.0%
010	73.50%	26.50%	7	1.71%	9	9	0	0.0%

STATISTIQUES

Minimum:	3	0.0%	5	5	-2	-20.0%
Maximum:	7	7.3%	12	13	4	80.0%
Moyenne:	6	2.9%	8	9	1	9.7%
Ecart-type:	0.029	0.029	2.160	2.068	1.650	0.277

*) = [1/10 mm]

Légendes:

C..... échantillon de l'enrobé thermorégénéré.
P(1)..... valeurs théoriques du mélange (a)-(b) sans liant régénérant.
Ces valeurs sont calculées avec la formule suivante: 100 * log(P(1)) = a*log(P(A)) + b*log(P(B))
P(A) et P(B) étant les pénétrations à 5 °C des échantillons A et B.
P(2)..... valeur théorique calculée à partir de P(1) avec les abaques de dosage en liant de recyclage avec échelle modifiée pour pénétration à 5 °C (voir annexe II).
Diff..... = P(C) - P(2)
Diff'..... = (P(C) - P(2)) / P(2) * 100

Remarques:
Pour le chantier 007, la valeur de P(1) est calculée en tenant compte du bitume d'ajout (B 180/220) Celui-ci n'ayant pas fait l'objet d'un prélévement, la pénétration à 25°C a été choisie arbitrairement à 200 [1/10 mm] et la valeur à 5 °C calculée en conséquance.

LOI D'AJUSTEMENT:

Aucune corrélation n'a pu être trouvée.

Aucune loi d'ajustement n'est suffisamment fiable pour décrire l'évolution de la pénétration lors des étapes a) (réchauffage et scarification) et c) (mélange des enrobés et ajout régénérant). Il semblerait toutefois que cela résulte du degré de précision des valeurs qui sont faibles et arrondies à l'unité. Les résultats obtenus à 15° C et 25° C abondent dans ce sens.

On remarque que l'évolution de la pénétration à 5°C lors de la fabrication de l'enrobé d'apport est moins bonne lorsque l'on tient compte de le teneur en liant de l'enrobé.

Pour cette étape, la meilleure loi d'évolution obtenue est de type "puissance".

ii) Pénétration à 15 et 25°C

étape a) : Réchauffage et scarification de l'enrobé en place

Essai: PENETRATION A 15°C

Etape a): RECHAUFFAGE ET SCARIFICATION DE L'ENROBE EN PLACE

	PARAMETRES			RESULTATS					
n° chant	e [cm]	L/E(a) [%]	e * L/E [-]	P(x) [1/10 mm]	P(A) [1/10 mm]	Diff [%]	P'(x) [-]	P''(x) [-]	P'''(x) [-]
001	4.0	5.20%	0.21	13	10	-23.1%	52.0	0.68	2.70
002	3.0	5.77%	0.17	13	14	7.7%	39.0	0.75	2.25
003	3.0	5.73%	0.17	16	15	-6.3%	48.0	0.92	2.75
004	3.0	5.01%	0.15	9	7	-22.2%	27.0	0.45	1.35
005	3.5	5.27%	0.18	9	7	-22.2%	31.5	0.47	1.66
006	3.0	6.41%	0.19	29	16	-44.8%	87.0	1.86	5.58
007	3.0	6.35%	0.19	17	12	-29.4%	51.0	1.08	3.24
008	2.5	6.21%	0.16	16	14	-12.5%	40.0	0.99	2.48
009	3.5	5.80%	0.20	8	5	-37.5%	28.0	0.46	1.62
010	2.5	6.47%	0.16	19	14	-26.3%	47.5	1.23	3.07

STATISTIQUES

Minimum:	8	5	-44.8%	27.0	0.45	1.35
Maximum:	29	16	7.7%	87.0	1.86	5.58
Moyenne:	15	11	-21.7%	45.1	0.89	2.67
Ecart-type:	5.208	3.893	0.151	17.386	0.436	1.202

Légendes:

e..... épaisseur de l'enrobé scarifié.
L/E(a)..... teneur en liant de l'enrobé scarifié.
x..... échantillon carotté sur l'enrobé en place, avant réchauffage.
A..... échantillon prélevé sur l'enrobé en place, après réchauffage.
P..... résultat de l'essai de pénétration à 15 °C.

P'(x).... = P(x) * e
P''(x)... = P(x) * L/E(a)
P'''(x).. = P(x) * L/E(a) * e
Diff..... = (P(A) - P(x)) / P(x) * 100

LOI D'AJUSTEMENT:

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
P(x) P(A)	0.816	P(A) = H + M * P(x)	H = 3.7803 M = 0.5114	lin.	Aucune valeur n'a été écartée
P''(x) P(A)	0.802	P(A) = H + M * P(x) * L/E(a)	H = 5.0534 M = 7.1390	lin.	Aucune valeur n'a été écartée

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
P(x) P(A)	0.899	P(A) = H + M * ln(P(x))	H = -11.3425 M = 8.8395	log.	Aucune valeur n'a été écartée
P''(x) P(A)	0.890	P(A) = H + M * ln[P(x) * L/E(a)]	H = 13.0104 M = 7.3458	log.	Aucune valeur n'a été écartée
P'''(x) P(A)	0.808	P(A) = H + M * ln[P(x) * L/E (a) * e]	H = 4.4739 M = 7.6702	log.	Aucune valeur n'a été écartée

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
P(x) P(A)	0.884	P(A) = H * P(x)^M	H = 1.0126 M = 0.8961	puiss.	Aucune valeur n'a été écartée
P''(x) P(A)	0.868	P(A) = H * [P(x) * L/E(a)]^M	H = 12.5601 M = 0.7384	puiss.	Aucune valeur n'a été écartée

Essai: PENETRATION A 25°C

Etape a): RECHAUFFAGE ET SCARIFICATION DE L'ENROBE EN PLACE

	PARAMETRES			RESULTATS					
n° chant	e [cm]	L/E(a) [%]	e * L/E [-]	P(x) [1/10 mm]	P(A) [1/10 mm]	Diff [%]	P'(x) [-]	P''(x) [-]	P'''(x) [-]
001	4.0	5.20%	0.21	28	21	-25.0%	112.0	1.46	5.82
002	3.0	5.77%	0.17	35	33	-5.7%	105.0	2.02	6.06
003	3.0	5.73%	0.17	41	34	-17.1%	123.0	2.35	7.05
004	3.0	5.01%	0.15	18	13	-27.8%	54.0	0.90	2.71
005	3.5	5.27%	0.18	19	14	-26.3%	66.5	1.00	3.50
006	3.0	6.41%	0.19	77	43	-44.2%	231.0	4.94	14.81
007	3.0	6.35%	0.19	42	27	-35.7%	126.0	2.67	8.00
008	2.5	6.21%	0.16	38	33	-13.2%	95.0	2.36	5.90
009	3.5	5.80%	0.20	15	12	-20.0%	52.5	0.87	3.05
010	2.5	6.47%	0.16	52	39	-25.0%	130.0	3.36	8.41

STATISTIQUES

Minimum:	15	12	-44.2%	52.5	0.87	2.71
Maximum:	77	43	-5.7%	231.0	4.94	14.81
Moyenne:	37	27	-24.0%	109.5	2.19	6.53
Ecart-type:	18.615	11.289	0.110	51.696	1.273	3.520

Légendes:

e..... épaisseur de l'enrobé scarifié.
L/E(a)..... teneur en liant de l'enrobé scarifié.
x..... échantillon carotté sur l'enrobé en place, avant réchauffage.
A..... échantillon prélevé sur l'enrobé en place, après réchauffage.
P..... résultat de l'essai de pénétration à 25 °C.

P'(x).... = P(x) * e
P''(x)... = P(x) * L/E(a)
P'''(x).. = P(x) * L/E(a) * e
Diff..... = (P(A) - P(x)) / P(x) * 100

LOI D'AJUSTEMENT:

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
P(x) P(A)	0.912	P(A) = H + M * P(x)	H = 6.7042 M = 0.5533	lin.	Aucune valeur n'a été écartée
P'(x) P(A)	0.828	P(A) = H + M * P(x) * e	H = 7.1120 M = 0.1807	lin.	Aucune valeur n'a été écartée
P''(x) P(A)	0.903	P(A) = H + M * P(x) * L/E(a)	H = 9.3458 M = 8.0047	lin.	Aucune valeur n'a été écartée
P'''(x) P(A)	0.843	P(A) = H + M * P(x) * L/E(a) * e	H = 9.2499 M = 2.7025	lin.	Aucune valeur n'a été écartée

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
P(x) P(A)	0.963	P(A) = H + M * ln(P(x))	H = -46.7720 M = 21.1614	log.	Aucune valeur n'a été écartée
P'(x) P(A)	0.889	P(A) = H + M * ln[P(x) * e]	H = -75.1111 M = 22.1610	log.	Aucune valeur n'a été écartée
P''(x) P(A)	0.962	P(A) = H + M * ln[P(x) * L/E(a)]	H = 15.1583 M = 18.5161	log.	Aucune valeur n'a été écartée
P'''(x) P(A)	0.914	P(A) = H + M * ln[P(x) * L/E (a) * e]	H = -8.1266 M = 19.9468	log.	Aucune valeur n'a été écartée

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
P(x) P(A)	0.872	P(A) = H * exp(M* P(x))	H = 10.7622 M = 0.0225	exp.	Aucune valeur n'a été écartée
P''(x) P(A)	0.859	P(A) = H * exp[M * P(x) * L/E(a)]	H = 12.0273 M = 0.3238	exp.	Aucune valeur n'a été écartée
P'''(x) P(A)	0.904	P(A) = H * exp[M * P(x) * L/E(a)* e]	H = 11.9573 M = 0.1096	exp.	Aucune valeur n'a été écartée

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
P(x) P(A)	0.957	P(A) = H * P(x)^M	H = 1.0845 M = 0.8951	puiss.	Aucune valeur n'a été écartée
P'(x) P(A)	0.891	P(A) = H * (P(x) * e)^M	H = 0.3158 M = 0.9450	puiss.	Aucune valeur n'a été écartée
P''(x) P(A)	0.954	P(A) = H * [P(x) * L/E(a)]^M	H = 14.9152 M = 0.7805	puiss.	Aucune valeur n'a été écartée
P'''(x) P(A)	0.911	P(A) = H * [P(x) * L/E(a) * e]^M	H = 5.5406 M = 0.8458	puiss.	Aucune valeur n'a été écartée

Parmi les lois d'ajustement obtenues, la meilleure est de forme logarithmique, ceci pour les deux températures.

A 15°C et 25°C, la meilleure loi ne tient compte, ni de la teneur en liant de l'enrobé réchauffé, ni de l'épaisseur de scarification.

étape b) : Fabrication de l'enrobé d'apport

Essai: PENETRATION A 15°C

Etape b): FABRICATION DE L'ENROBE D'APPORT

	PARAMETRES	RESULTATS			
n° chant	L/E(b) [%]	P(D) [1/10 mm]	P(B) [1/10 mm]	Diff [%]	P'(D) [-]
001	2.02%	27	16	-40.7%	0.55
002	4.23%	51	31	-39.2%	2.16
003	5.28%	39	22	-43.6%	2.06
004	5.40%	49	29	-40.8%	2.65
005	5.06%	47	27	-42.6%	2.38
006	5.21%	49	27	-44.9%	2.55
007	4.32%	35	24	-31.4%	1.51
008	5.38%	-	33	-	-
009	4.88%	44	27	-38.6%	2.15
010	3.79%	47	25	-46.8%	1.78

STATISTIQUES

Minimum:	27	16	-46.8%	0.55
Maximum:	51	31	-31.4%	2.65
Moyenne:	43	25	-41.0%	1.98
Ecart-type:	7.944	4.387	0.045	0.643

Légendes:

D..... échantillon de bitume de l'enrobé d'apport, avant fabrication.
B..... échantillon de bitume de l'enrobé d'apport, après fabrication.
L/E(b)..... teneur en liant de l'enrobé d'apport.
P..... résultat de l'essai de pénétration à 15 °C.

P'(D)..... = P(D) * L/E(b)

Diff..... = (P(B) - P(D)) / P(D) * 100

Remarque:
Les valeurs du chantier 008 ont été supprimée à cause de l'absence de prélévement de l'échantillon D.

LOI D'AJUSTEMENT:

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
P(D) P(B)	0.924	P(B) = H + M * P(D)	H = 3.3319 M = 0.5103	lin.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.
P'(D) P(B)	0.847	P(B) = H + M * P(D) * L/E(b)	H = 13.8876 M = 5.7904	lin.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
P(D) P(B)	0.927	P(B) = H + M * ln(P(D))	H = -47.8963 M = 19.5483	log.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.
P'(D) P(B)	0.864	P(B) = H + M * ln[P(D) * L/E(b)]	H = 20.6014 M = 7.8474	log.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
P(D) P(B)	0.925	P(B) = H * exp(M * P(D))	H = 9.3921 M = 0.0227	exp.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.
P'(D) P(B)	0.872	P(B) = H * exp[M * P(D) * L/E(b)]	H = 14.8030 M = 0.2640	exp.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
P(D) P(B)	0.936	P(B) = B * P(D)^M	H = 0.9379 M = 0.3758	puiss.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.
P'(D) P(B)	0.901	P(B) = H * [P(D) * L/E(b)]^M	H = 20.0369 M = 0.3632	puiss.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.

Essai: PENETRATION A 25°C

Etape b): FABRICATION DE L'ENROBE D'APPORT

	PARAMETRES	RESULTATS			
n° chant	L/E(b) [%]	P(D) [1/10 mm]	P(B) [1/10 mm]	Diff [%]	P'(D) [-]
001	2.02%	74	39	-47.3%	1.49
002	4.23%	154	80	-48.1%	6.51
003	5.28%	114	55	-51.8%	6.02
004	5.40%	161	83	-48.4%	8.69
005	5.06%	156	74	-52.6%	7.89
006	5.21%	155	74	-52.3%	8.08
007	4.32%	100	59	-41.0%	4.32
008	5.38%	-	89		-
009	4.88%	127	64	-49.6%	6.20
010	3.79%	152	70	-53.9%	5.76

STATISTIQUES

Minimum:	74	39	-53.9%	1.49
Maximum:	161	83	-41.0%	8.69
Moyenne:	133	66	-49.4%	6.11
Ecart-type:	30.749	13.830	0.039	2.195

Légendes:

D.....: échantillon de bitume de l'enrobé d'apport, avant fabrication.
B..... échantillon de bitume de l'enrobé d'apport, après fabrication.
L/E(b)..... teneur en liant de l'enrobé d'apport.
P..... résultat de l'essai de pénétration à 25 °C.

P'(D)..... = P(D) * L/E(b)

Diff..... = (P(B) - P(D)) / P(D) * 100

Remarque:
Les valeurs du chantier 008 ont été supprimée à cause de l'absence de prélévement de l'échantillon D.

LOI D'AJUSTEMENT:

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
P(D) P(B)	0.959	P(B) = H + M * P(D)	H = 9.7656 M = 0.4265	lin.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.
P'(D) P(B)	0.890	P(B) = H + M * P(D) * L/E(b)	H = 32.2063 M = 5.6067	lin.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
P(D) P(B)	0.957	P(B) = H + M * ln(P(D))	H = -173.4826 M = 49.3636	log.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.
P'(D) P(B)	0.875	P(B) = H + M * ln[P(D) * L/E(b)]	H = 27.7854 M = 22.5591	log.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
P(D) P(B)	0.955	P(B) = H * exp(M * P(D))	H = 24.9401 M = 0.0072	exp.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.
P'(D) P(B)	0.903	P(B) = H * exp[M * P(D) * L/E(b)]	H = 36.0337 M = 0.0965	exp.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
P(D) P(B)	0.965	P(B) = H * P(D)^M	H = 1.0721 M = 0.8444	puiss.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.
P'(D) P(B)	0.914	P(B) = H * [P(D) * L/E(b)]^M	H = 32.7560 M = 0.3996	puiss.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.

.. Parmi les lois d'ajustement obtenues, la meilleure est de forme "puissance", ceci pour les deux températures.

Pour les deux températures également, la meilleure loi ne tient pas compte de la teneur en liant de l'enrobé d'apport.

étape c) : Mélange et pose de l'enrobé thermorégénéré

Essai: PENETRATION A 15°C

Etape c): MELANGE ET POSE DE L'ENROBE THERMOREGENERE

n° chant	MELANGE a [%]	MELANGE b [%]	MELANGE P(1) [1/10 mm]	ENROBE THERMOREGENERE Régén(C) [%]	P(2) [1/10 mm]	P(C) [1/10 mm]	Diff *)	Diff ' [%]
001	96.10%	3.90%	10	5.14%	16	18	2	12.5%
002	76.50%	23.50%	17	0.00%	17	17	0	0.0%
003	76.20%	23.80%	16	0.00%	16	18	2	12.5%
004	65.00%	35.00%	12	5.13%	20	23	3	15.0%
005	71.00%	29.00%	10	4.61%	15	22	7	46.7%
006	78.30%	21.70%	18	2.54%	25	32	7	28.0%
007	68.40%	31.60%	16	0.52%	17	19	2	11.8%
008	65.30%	34.70%	19	1.75%	24	22	-2	-8.3%
009	84.50%	15.50%	6	7.33%	10	11	1	10.0%
010	73.50%	26.50%	16	1.71%	21	23	2	9.5%

STATISTIQUES

Minimum:	6	0.0%	10	11	-2	-8.3%
Maximum:	19	7.3%	25	32	7	46.7%
Moyenne:	14	2.9%	18	21	2	13.8%
Ecart-type:	4.121	0.029	4.483	5.442	2.797	0.149

*) = [1/10 mm]

Légendes:

C..... échantillon de l'enrobé thermorégénéré.
P(1)..... valeurs théoriques du mélange (a)-(b) sans liant régénérant.
Ces valeurs sont calculées avec la formule suivante: $100 * \log(P(1)) = a*\log(P(A)) + b*\log(P(B))$
P(A) et P(B) étant les pénétrations à 15 °C des échantillons A et B.
P(2)..... valeur théorique calculée à partir de P(1) avec les abaques pour dosage en liant de recyclage avec échelle modifiée pour pénétration à 15 °C (voir annexe II).
Diff..... = P(C) - P(2)
Diff'..... = (P(C) - P(2)) / P(2) * 100

Remarques:
Pour le chantier 007, la valeur de P(1) est calculée en tenant compte du bitume d'ajout (B 180/220) Celui-ci n'ayant pas fait l'objet d'un prélévement, la pénétration à été choisie arbitrairement à 200 [1/10 mm] et la valeur à 15°C calculée en conséquance.

LOI D'AJUSTEMENT:

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
P(2) P(C)	0.859	P(C) = H + M * P(2)	H = 1.6396 M = 1.0420	lin.	Aucune valeur n'a été écartée

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
P(2) P(C)	0.851	P(C) = H + M * ln(P(2))	H = -29.5319 M = 17.4574	log.	Aucune valeur n'a été écartée

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
P(2) P(C)	0.871	P(C) = H * exp(M * P(2))	H = 7.5148 M = 0.0536	exp.	Aucune valeur n'a été écartée

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
P(2) P(C)	0.891	P(C) = H * P(2)^M Page 4	H = 1.3874 M = 0.9282	puiss.	Aucune valeur n'a été écartée

Essai: PENETRATION A 25°C

Etape c): MELANGE ET POSE DE L'ENROBE THERMOREGENERE

	MELANGE			ENROBE THERMOREGENERE				
n° chant	a [%]	b [%]	P(1) [1/10 mm]	Régén (C) [%]	P(2) [1/10 mm]	P(C) [1/10 mm]	Diff *)	Diff ' [%]
001	96.10%	3.90%	22	5.14%	35	38	3	8.6%
002	76.50%	23.50%	41	0.00%	41	44	3	7.3%
003	76.20%	23.80%	38	0.00%	38	42	4	10.5%
004	65.00%	35.00%	25	5.13%	43	51	8	18.6%
005	71.00%	29.00%	23	4.61%	33	49	16	48.5%
006	78.30%	21.70%	48	2.54%	65	87	22	33.8%
007	68.40%	31.60%	38	0.52%	40	46	6	15.0%
008	65.30%	34.70%	47	1.75%	60	58	-2	-3.3%
009	84.50%	15.50%	16	7.33%	24	25	1	4.2%
010	73.50%	26.50%	46	1.71%	59	62	3	5.1%

STATISTIQUES

Minimum:	16	0.0%	24	25	-2	-3.3%
Maximum:	48	7.3%	65	87	22	48.5%
Moyenne:	34	2.9%	44	50	6	14.8%
Ecart-type:	11.933	0.029	13.273	16.545	7.291	0.155

*) = [1/10 mm]

Légendes:

C..... échantillon de l'enrobé thermorégénéré.
P(1)..... valeurs théoriques du mélange (a)-(b) sans liant régénérant.
Ces valeurs sont calculées avec la formule suivante: $100 * \log(P(1)) = a*\log(P(A)) + b*\log(P(B))$
P(A) et P(B) étant les pénétrations à 25°C des échantillons A et B.
P(2)..... valeur théorique calculée à partir de P(1) avec les abaques pour dosage en liants de recyclage (voir annexe II).
Diff..... = P(C) - P(2)
Diff'..... = (P(C) - P(2)) / P(C) * 100

Remarques:
Pour le chantier 007, la valeur P(1) est calculée en tenant compte du bitume d'ajout (B 180/220). Celui-ci n'ayant pas fait l'objet d'un prélévement, la pénétration à 25°C à été choisie arbitrairement à 200 [1/10 mm] (SN 671'110d)

LOI D'AJUSTEMENT:

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
P(2) P(C)	0.903	P(C) = H + M * P(2)	H = 0.8808 M = 1.1260	lin.	Aucune valeur n'a été écartée

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
P(2) P(C)	0.888	P(C) = H + M * ln(P(2))	H = -128.32 M = 47.7641	log.	Aucune valeur n'a été écartée

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
P(2) P(C)	0.906	P(C) = H * exp(M * P(2))	H = 17.9809 M = 0.0224	exp.	Aucune valeur n'a été écartée

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
P(2) P(C)	0.921	P(C) = H * P(2)^M	H = 1.2210 M = 0.9815	puiss.	Aucune valeur n'a été écartée

Parmi les lois d'ajustement obtenues, la meilleure est de forme "puissance", ceci pour les deux températures.

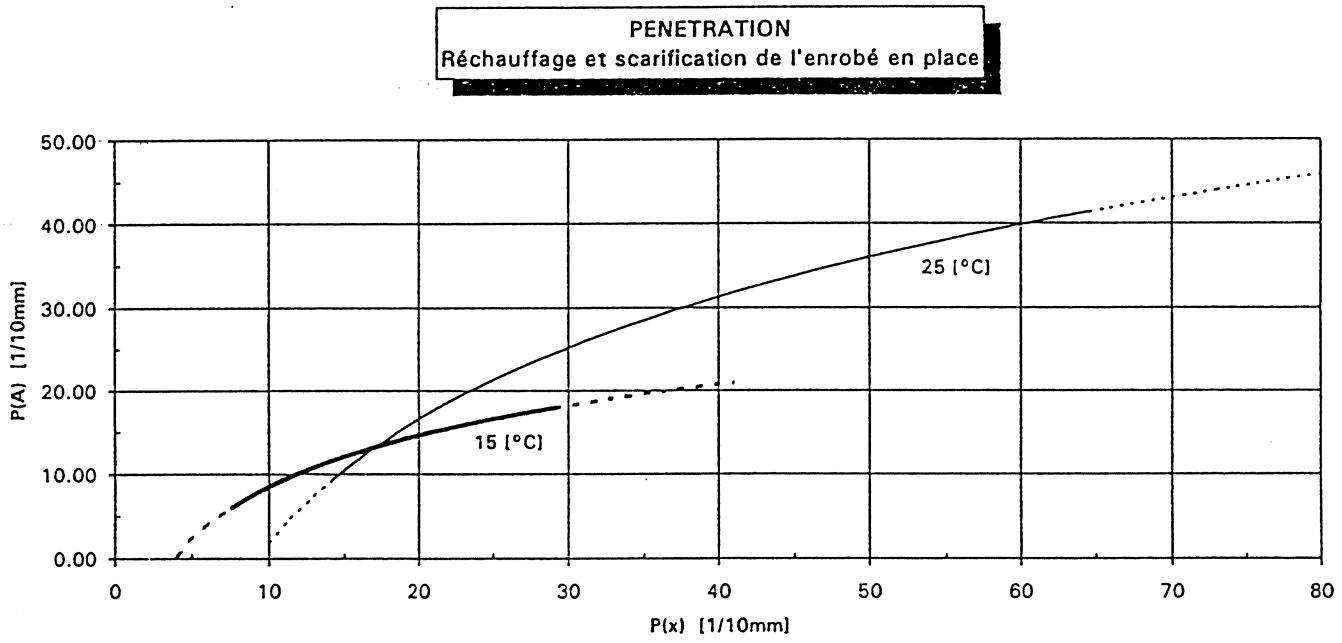
Pénétration, sélection des lois d'évolution

Les meilleures lois obtenues sont présentées ci-après :

Etape a) - Réchauffage et scarification de l'enrobé en place

	Pénétration à 5°C	Pénétration à 15°C	Pénétration à 25°C
Loi	aucune	P (A) = H + M Ln (P (x))	P (A) = H + M Ln (P (x))

La représentation graphique de ces lois tend à montrer qu'il n'y a pas de continuité entre résultats à 15°C et 25°C.

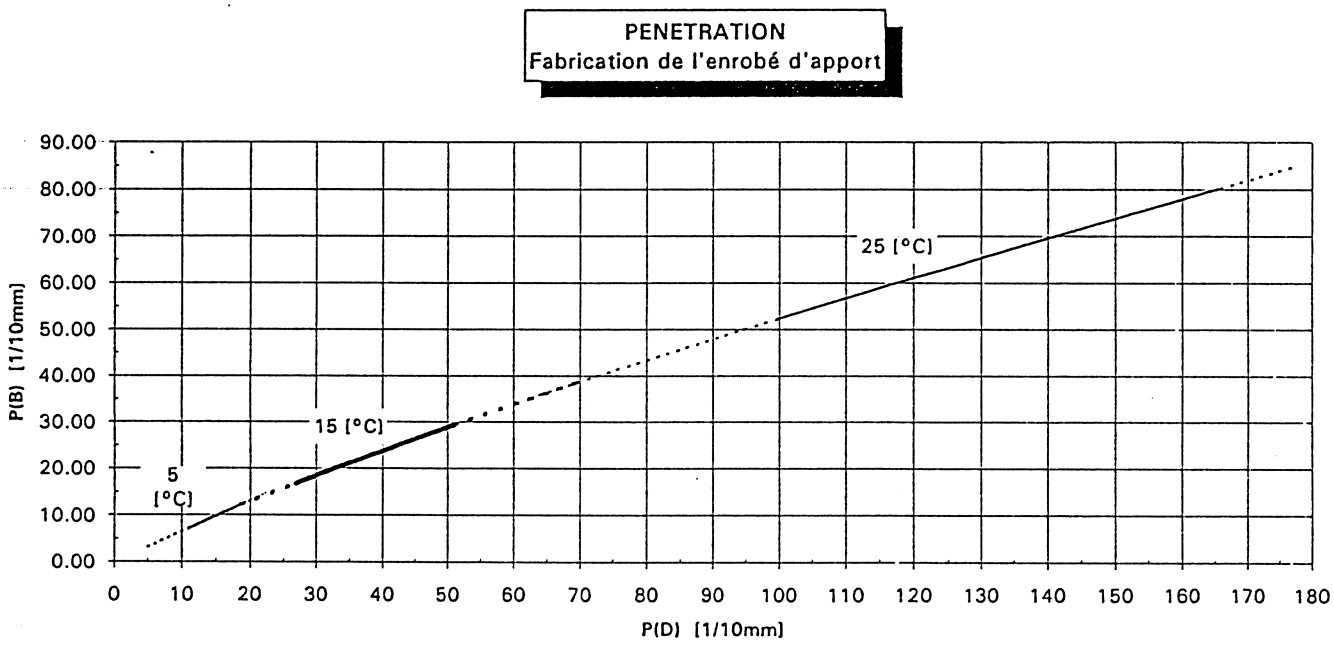


Le trait continu représente la plage de valeurs obtenues pour les essais et les traitillés une extension de ces plages.

Etape b) - Fabrication de l'enrobé d'apport

	Pénétration à 5°C	Pénétration à 15°C	Pénétration à 25°C
Loi	P (A) = H · P (x) ^M	P (A) = H · P (x) ^M	P (A) = H · P (x) ^M

La représentation graphique de ces lois tend à montrer qu'il y a continuité entre les résultats à 5°C, 15°C et 25°C.



Le trait continu représente la plage de valeurs obtenues pour les essais et les traitillés une extension de ces plages.

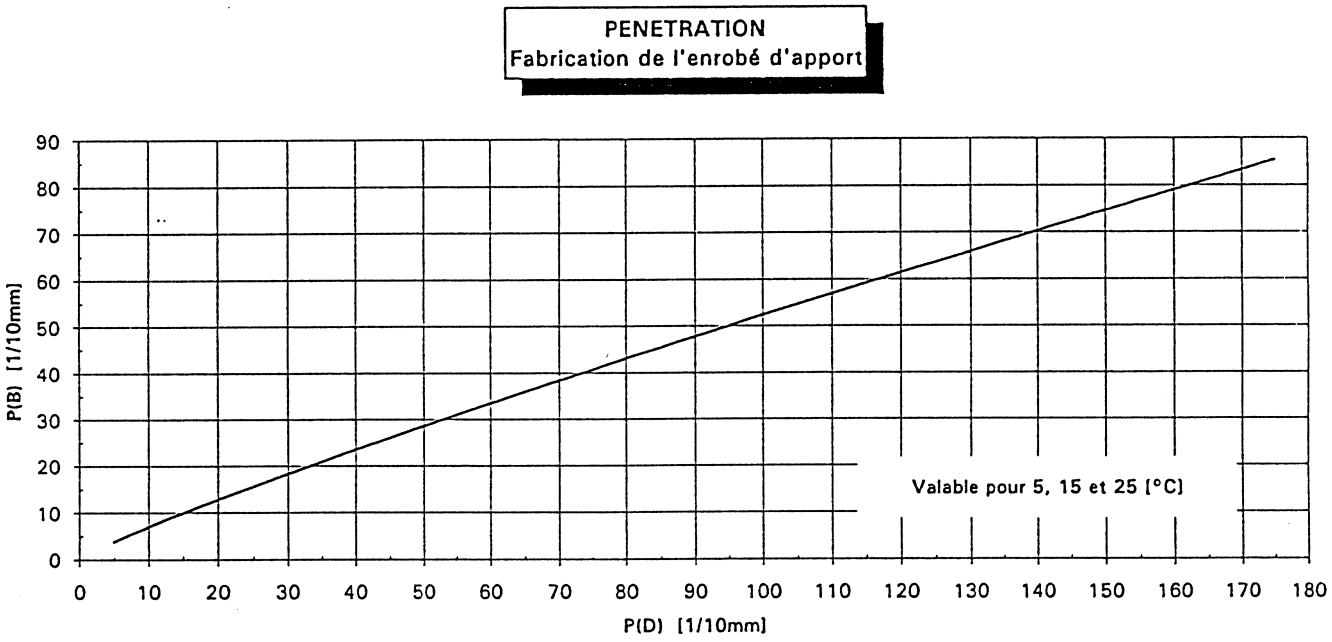
La continuité observée nous permet de remplacer les 3 courbes de puissance en une nouvelle loi unique également du type puissance, dont le coefficient de corrélation est de c = 0,997.

On obtient donc :

$$\boxed{P(B) = H \cdot P(D) \cdot M}$$

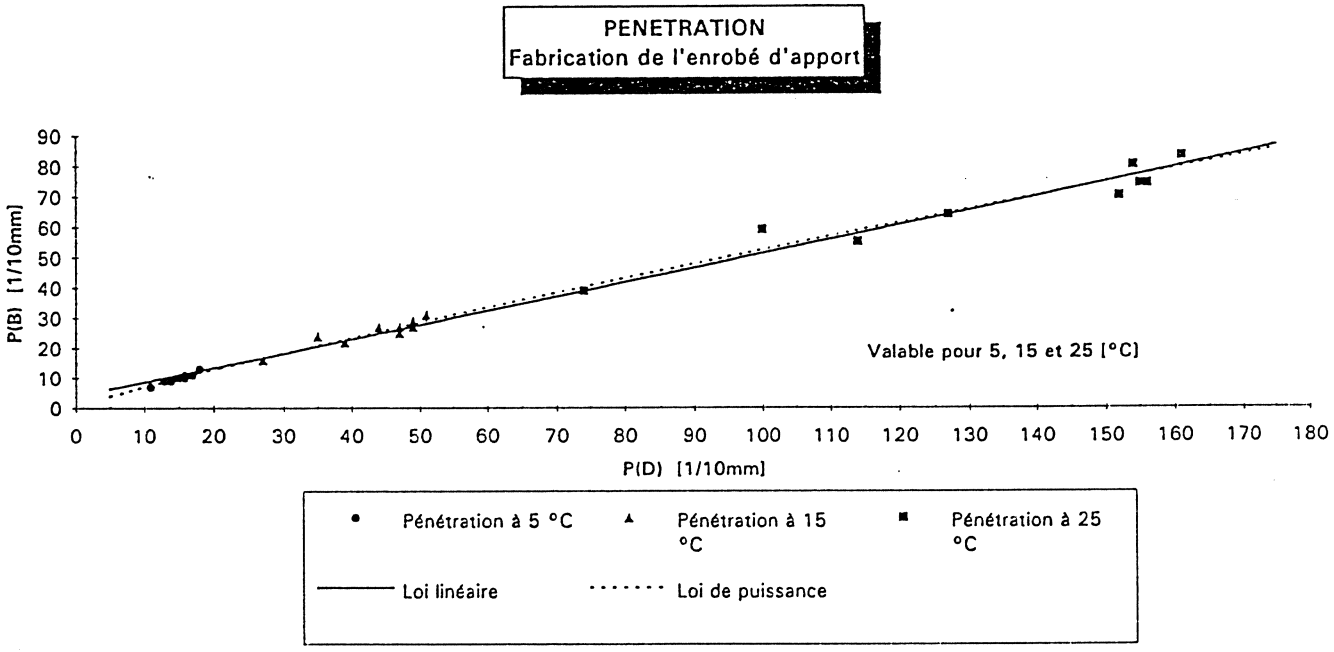
où H = 0,9349
M = 0,8742

et ceci pour : 5, 15 ou 25°C.



En choisissant une loi linéaire au lieu d'une puissance, on remarque sur la représentation graphique que la droite est presque identique à la courbe de puissance. Le coefficient de corrélation, s'il est légèrement moins bon, reste toutefois excellent.

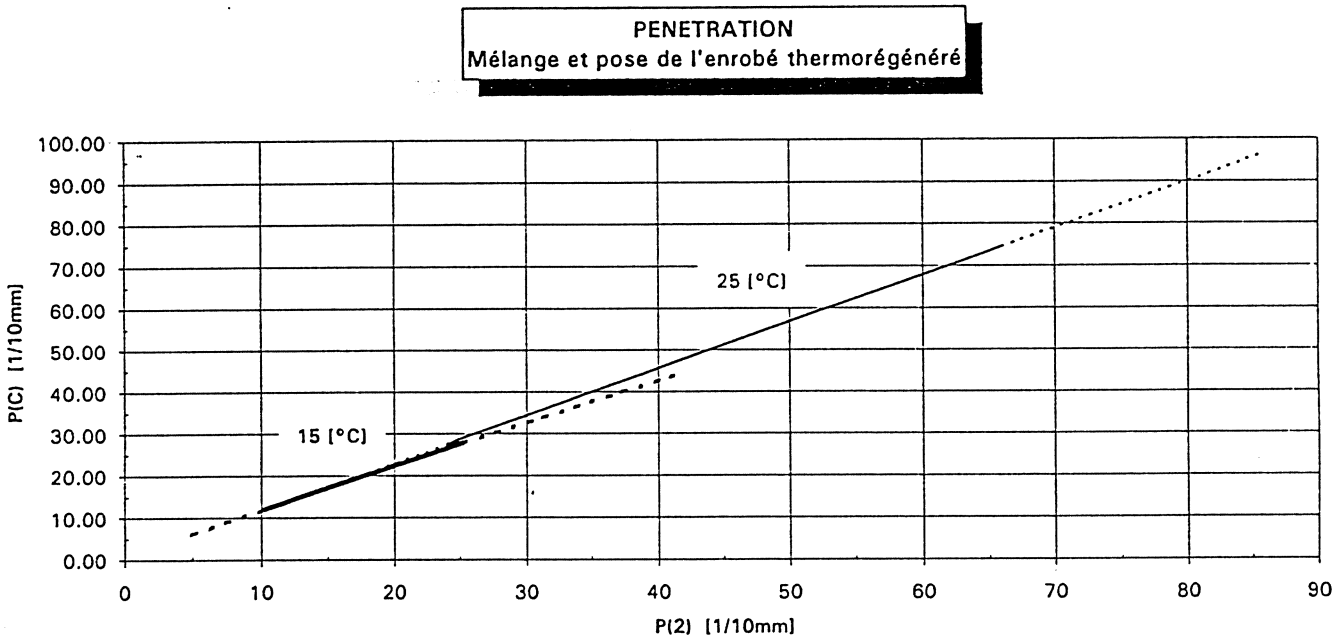
		Pénétration à 5, 15 ou 25°C
Coefficient	Linéaire	0,994
Corrélation	Puissance	0,997



Etape c) - Mélange et pose de l'enrobé thermorégénéré

	Pénétration à 5°C	Pénétration à 15°C	Pénétration à 25°C
Loi	aucune	P (c) = H · P (2) ^M	P (c) = H · P (2) ^M

La représentation graphique de ces lois tend à montrer qu'il y a continuité entre les résultats à 15°C et 25°C, en tous les cas pour ce qui est de la plage de valeurs obtenue par les essais.



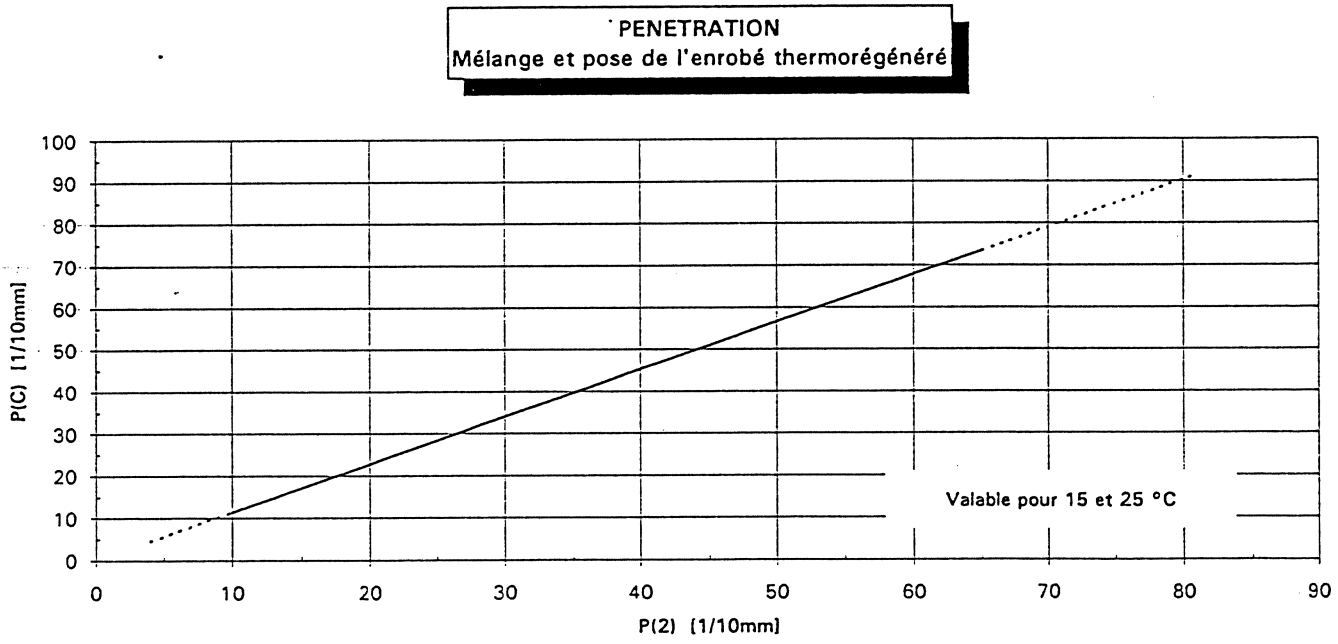
Le trait continu représente la plage de valeurs obtenues pour les essais et les traitillés une extension de ces plages.

La continuité observée permet de remplacer les 2 courbes de puissance par une seule et ainsi d'obtenir un coefficient de corrélation de c =0,973.

$$P(C) = H \cdot P(2)^{M}$$

ou H = 1,1497
M = 0,9959

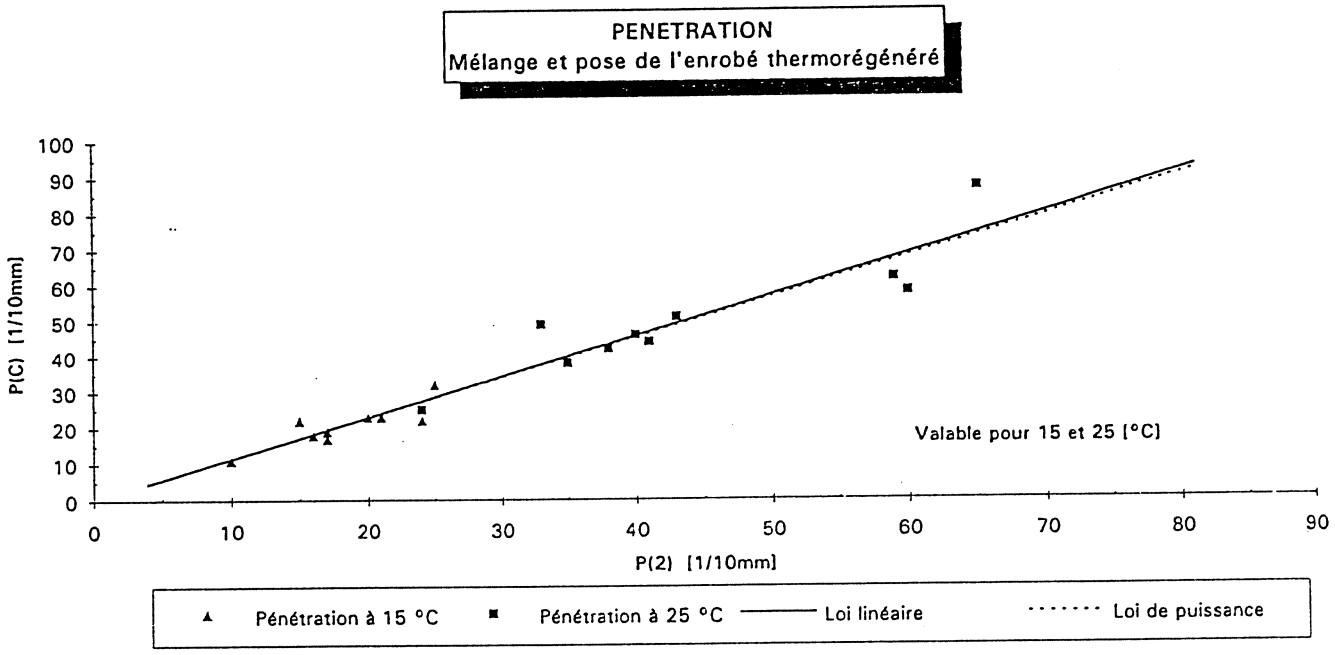
Cette loi est valable pour 15 et 25 °C.



Le trait continu représente la plage de valeurs obtenues pour les essais et les traitillés une extension de ces plages.

En choisissant une loi linéaire au lieu d'une puissance, on remarque, sur la représentation graphique, que la droite est presque identique à la courbe de puissance. Le coefficient de corrélation, s'il est légèrement moins bon, reste toutefois excellent.

		Pénétration à 15 ou 25°C
Coefficient	Linéaire	0,963
Corrélation	Puissance	0,973



5.3.2 Viscosité à 60°C et 130°C

Etape a) - Réchauffage et scarification de l'enrobé en place

Essai: VISCOSITE A 60 °C

Etape a): RECHAUFFAGE ET SCARIFICATION DE L'ENROBE EN PLACE

	PARAMETRES			RESULTATS					
n° chant	e [cm]	L/E (a) [%]	e * L/E [-]	V(x) [Pa*s]	V(A) [Pa*s]	Diff [%]	V'(x) [-]	V''(x) [-]	V'''(x) [-]
001	4.0	5.20%	0.21	2376.600	7291.000	206.8%	9506.4	123.6	494.3
002	3.0	5.77%	0.17	1118.400	1413.820	26.4%	3355.2	64.5	193.6
003	3.0	5.73%	0.17	580.520	1211.600	108.7%	1741.6	33.3	99.8
004	3.0	5.01%	0.15	8876.000	30115.000	239.3%	26628.0	444.7	1334.1
005	3.5	5.27%	0.18	8876.000	25360.000	185.7%	31066.0	467.8	1637.2
006	3.0	6.41%	0.19	136.000	483.080	255.2%	408.0	8.7	26.2
007	3.0	6.35%	0.19	567.900	2853.000	402.4%	1703.7	36.1	108.2
008	2.5	6.21%	0.16	580.520	1055.600	81.8%	1451.3	36.1	90.1
009	3.5	5.80%	0.20	19971.000	31700.000	58.7%	69898.5	1158.3	4054.1
010	2.5	6.47%	0.16	327.840	557.400	70.0%	819.6	21.2	53.0

STATISTIQUES							
	Minimum:	136.000	483.080	26.4%	408.0	8.7	26.2
	Maximum:	19971.000	31700.000	402.4%	69898.5	1158.3	4054.1
	Moyenne:	4341.078	10204.050	163.5%	14657.8	239.4	809.1
	Ecart-type:	6463.4	13250.3	1.2	22415.1	366.5	1276.5

Légendes:

e..... épaisseur de l'enrobé scarifié.
L/E(a)..... teneur en liant de l'enrobé scarifié.
x..... échantillon carotté sur l'enrobé en place, avant réchauffage.
A..... échantillon prélevé sur l'enrobé en place, après réchauffage.
V..... résultat de l'essai de viscosité à 60 °C.

V'(x).... = V(x) * e
V''(x)... = V(x) * L/E(a)
V'''(x).. = V(x) * L/E(a) * e
Diff..... = (V(A) - V(x)) / V(x) * 100

LOI D'AJUSTEMENT:

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
V(x) V(A)	0.914	V(A) = H + M * V(x)	H = 2068.66 M = 1.8740	lin.	Aucune valeur n'a été écartée
V'(x) V(A)	0.895	V(A) = H + M * V(x) * e	H = 2447.03 M = 0.5292	lin.	Aucune valeur n'a été écartée
V''(x) V(A)	0.886	V(A) = H + M * V(x) * L/E(a)	H = 2531.45 M = 32.0452	lin.	Aucune valeur n'a été écartée
V'''(x) V(A)	0.868	V(A) = H + M * V(x) * L/E(a) *e	H = 2915.76 M = 9.0077	lin.	Aucune valeur n'a été écartée

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
V(x) V(A)	0.930	V(A) = H + M * ln(V(x))	H = -44497.05 M = 7529.16	log.	Aucune valeur n'a été écartée
V'(x) V(A)	0.922	V(A) = H + M * ln(V(x) * e)	H = -49106.09 M = 7071.69	log.	Aucune valeur n'a été écartée
V''(x) V(A)	0.932	V(A) = H + M * ln[V(x) * L/E(a)]	H = -24581.40 M = 7873.69	log.	Aucune valeur n'a été écartée
V'''(x) V(A)	0.924	V(A) = H + M * ln[V(x) * L/E(a) * e]	H = -60742.37 M = 7391.2491	log.	Aucune valeur n'a été écartée

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
V(x) V(A)	0.827	V(A) = H * exp(M* V(x))	H = 1379.2751 M = 0.0002	exp.	Aucune valeur n'a été écartée
V'(x) V(A)	0.815	V(A) = H * exp(M * V(x) * e)	H = 1431.06 M = 0.0001	exp.	Aucune valeur n'a été écartée

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
V(x) V(A)	0.965	V(A) = H * V(x)^M	H = 2.8796 M = 0.9760	puiss.	Aucune valeur n'a été écartée
V'(x) V(A)	0.964	V(A) = H * [V(x) * e]^M	H = 1.4228 M =0.9296	puiss.	Aucune valeur n'a été écartée
V''(x) V(A)	0.962	V(A) = H * [V(x) * L/E(a)]^M	H =39.0615 M = 1.0149	puiss.	Aucune valeur n'a été écartée
V'''(x) V(A)	0.963	V(A) = H * [V(x) * L/E (a) * e]^M	H = 16.3295 M = 0.9668	puiss.	Aucune valeur n'a été écartée

Essai: VISCOSITE A 130 °C

Etape a): RECHAUFFAGE ET SCARIFICATION DE L'ENROBE EN PLACE

	PARAMETRES			RESULTATS					
n° chant	e [cm]	L/E (a) [%]	e * L/E [-]	V(x) [Pa/s]	V(A) [Pa/s]	Diff [%]	V'(x) [-]	V''(x) [-]	V'''(x) [-]
001	4.0	5.20%	0.21	1.120	1.739	55.3%	4.48	0.06	0.23
002	3.0	5.77%	0.17	1.140	1.278	12.1%	3.42	0.07	0.20
003	3.0	5.73%	0.17	0.824	1.150	39.6%	2.47	0.05	0.14
004	3.0	5.01%	0.15	2.937	5.805	97.7%	8.81	0.15	0.44
005	3.5	5.27%	0.18	2.917	4.552	56.1%	10.21	0.15	0.54
006	3.0	6.41%	0.19	0.335	0.547	63.3%	1.01	0.02	0.06
007	3.0	6.35%	0.19	0.707	1.387	96.2%	2.12	0.04	0.13
008	2.5	6.21%	0.16	0.633	0.843	33.2%	1.58	0.04	0.10
009	3.5	5.80%	0.20	2.465	3.995	62.1%	8.63	0.14	0.50
010	2.5	6.47%	0.16	0.542	0.648	19.6%	1.36	0.04	0.09

STATISTIQUES

Minimum:	0.335	0.547	12.1%	1.01	0.02	0.06
Maximum:	2.937	5.805	97.7%	10.21	0.15	0.54
Moyenne:	1.362	2.194	53.5%	4.41	0.08	0.24
Ecart-type:	1.011	1.873	0.287	3.491	0.051	0.181

Légendes:

e..... épaisseur de l'enrobé scarifié.
L/E(a)..... teneur en liant de l'enrobé scarifié.
x..... échantillon carotté sur l'enrobé en place, avant réchauffage.
A..... échantillon prélevé sur l'enrobé en place, après réchauffage.
V..... résultat de l'essai de viscosité à 130 °C.

V'(x).... = V(x) * e
V''(x)... = V(x) * L/E(a)
V'''(x).. = V(x) * L/E(a) * e
Diff..... = (V(A) - V(x)) / V(x) * 100

LOI D'AJUSTEMENT:

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
V(x) V(A)	0.978	V(A) = H + M * V(x)	H = -0.2762 M = 1.8139	lin.	Aucune valeur n'a été écartée
V'(x) V(A)	0.953	V(A) = H + M * V(x) * e	H =0.0590 M = 0.5111	lin.	Aucune valeur n'a été écartée
V''(x) V(A)	0.965	V(A) = H + M * V(x) * L/E (a)	H =-0.5186 M = 35.6973	lin.	Aucune valeur n'a été écartée
V'''(x) V(A)	0.933	V(A) = H + M * V(x) * L/E (a) * e	H =-0.1466 M = 9.6336	lin.	Aucune valeur n'a été écartée

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
V(x) V(A)	0.928	V(A) = H + M * ln(V(x))	H = 2.0574 M = 2.3182	log.	Aucune valeur n'a été écartée
V'(x) V(A)	0.906	V(A) = H + M * ln(V(x) * e)	H = -0.2080 M = 2.0335	log.	Aucune valeur n'a été écartée
V''(x) V(A)	0.906	V(A) = H + M * ln[V(x) * L/E(a)]	H = 9.1426 M = 2.4996	log.	Aucune valeur n'a été écartée
V'''(x) V(A)	0.900	V(A) = H + M * ln[V(x) * L/E(a) * e]	H = 5.8697 M = 2.1956	log.	Aucune valeur n'a été écartée

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
V(x) V(A)	0.967	V(A) = H * exp(M* V(x))	H = 0.5458 M = 0.7909	exp.	Aucune valeur n'a été écartée
V'(x) V(A)	0.963	V(A) = H * exp(M * V(x) * e)	H = 0.5864 M = 0.2281	exp.	Aucune valeur n'a été écartée
V''(x) V(A)	0.958	V(A) = H * exp[M * V(x) * L/E(a)]	H = 0.4876 M = 15.6579	exp.	Aucune valeur n'a été écartée
V'''(x) V(A)	0.952	V(A) = H * exp[M * V(x) * L/E(a)* e]	H = 0.5579 M = 4.3428	exp.	Aucune valeur n'a été écartée

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
V(x) V(A)	0.979	V(A) = H * V(x)^M	H = 1.5033 M = 1.0775	puiss.	Aucune valeur n'a été écartée
V'(x) V(A)	0.973	V(A) = H * [V(x) * e]^M	H = 0.5126 M = 0.9648	puiss.	Aucune valeur n'a été écartée
V''(x) V(A)	0.951	V(A) = H * [T(x) * L/E(a)]^M	H = 40.2069 M = 1.1592	puiss.	Aucune valeur n'a été écartée
V'''(x) V(A)	0.970	V(A) = H * [V(x) * L/E(a) * e]^M	H = 9.2117 M = 1.0447	puiss.	Aucune valeur n'a été écartée

Pour les deux températures auxquelles nous avons mesuré la viscosité dynamique des liants, soit 60°C et 130°C, la meilleure des lois d'ajustement obtenue est de forme "puissance" et ne tient compte, ni de la teneur en liant, ni de l'épaisseur de scarification de l'enrobé.

Etape b) - Fabrication de l'enrobé d'apport

Essai: VISCOSITE A 60 °C

Etape b): FABRICATION DE L'ENROBE D'APPORT

	PARAMETRES	RESULTATS			
n° chant	L/E (b) [%]	V(D) [Pa*s]	V(B) [Pa*s]	Diff [%]	V'(D) [-]
001	2.02%	123.760	524.885	324.1%	2.5
002	4.23%	43.038	119.680	178.1%	1.8
003	5.28%	80.960	310.765	283.9%	4.3
004	5.40%	38.210	114.000	198.4%	2.1
005	5.06%	47.652	141.440	196.8%	2.4
006	5.21%	61.844	150.960	144.1%	3.2
007	4.32%	100.000	297.105	197.1%	4.3
008	5.38%	-	93.000		-
009	4.88%	59.565	264.057	343.3%	2.9
010	3.79%	41.444	138.720	234.7%	1.6

STATISTIQUES					
	Minimum:	38.210	114.000	144.1%	1.6
	Maximum:	123.760	524.885	343.3%	4.3
	Moyenne:	66.275	229.068	233.4%	2.8
	Ecart-type:	29.608	135.639	0.687	0.995

Légendes:

D..... échantillon de bitume de l'enrobé d'apport, avant fabrication.
B..... échantillon de bitume de l'enrobé d'apport, après fabrication.
L/E(b)..... teneur en liant de l'enrobé d'apport.
V..... résultat de l'essai de viscosité à 60 °C.

V'(D).... = V(D) * L/E(b)

Diff..... = (V(B) - V(D)) / V(D) * 100

Remarque:
Les valeurs du chantier 008 ont été supprimées à cause de l'absence de prélèvement de l'échantillon D.

LOI D'AJUSTEMENT:

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
V(D) V(B)	0.941	V(B) = H + M * V(D)	H = -56.8624 M = 4.3143	lin.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
V(D) V(B)	0.917	V(B) = H + M * ln(V(D))	H = -1004.17 M = 299.7943	log.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
V(D) V(B)	0.934	V(B) = H * exp(M * V(D))	H = 65.7046 M = 0.0168	exp.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
V(D) V(B)	0.942	V(B) = H * V(D)^M	H = 1.3868 M = 1.2070	puiss.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.

Essai: VISCOSITE A 130 °C

Etape b): FABRICATION DE L'ENROBE D'APPORT

	PARAMETRES	RESULTATS			
n° chant	L/E (b) [%]	V(D) [Pa/s]	V(B) [Pa/s]	Diff [%]	V'(D) [-]
001	2.02%	0.391	0.662	69.3%	0.0079
002	4.23%	0.216	0.343	58.8%	0.0091
003	5.28%	0.308	0.520	68.8%	0.0163
004	5.40%	0.222	0.347	56.3%	0.0120
005	5.06%	0.231	0.367	58.9%	0.0117
006	5.21%	0.238	0.379	59.2%	0.0124
007	4.32%	0.334	0.520	55.7%	0.0144
008	5.38%	-	0.305		
009	4.88%	0.244	0.430	76.2%	0.0119
010	3.79%	0.355	0.634	78.6%	0.0135

STATISTIQUES

Minimum:	0.216	0.343	55.7%	0.0079
Maximum:	0.391	0.662	78.6%	0.0163
Moyenne:	0.282	0.467	64.7%	0.0121
Ecart-type:	0.066	0.123	0.088	0.003

Légendes:

D..... échantillon de bitume de l'enrobé d'apport, avant fabrication.
B..... échantillon de bitume de l'enrobé d'apport, après fabrication.
L/E(b)..... teneur en liant de l'enrobé d'apport.
V..... résultat de l'essai de viscosité à 130 °C.

V'(D)..... = V(D) * L/E(b)

Diff..... = (V(B) - V(D)) / V(D) * 100

Remarque:
Les valeurs du chantier 008 ont été supprimée à cause de l'absence de prélévement de l'échantillon D.

LOI D'AJUSTEMENT:

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
V(D) V(B)	0.982	V(B) = H + M * V(D)	H = -0.0507 M = 1.8346	lin.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
V(D) V(B)	0.981	V(B) = H + M * ln(V(D))	H = 1.1525 M = 0.5320	log.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
V(D) V(B)	0.980	V(B) = H * exp(M * V(D))	H = 0.1547 M = 3.8106	exp.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
V(D) V(B)	0.984	V(B) = H * V(D)^M	H = 1.8969 M = 1.1108	puiss.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.

Pour les deux températures auxquelles nous avons mesuré la viscosité dynamique des liants, soit 60°C et 130°C, la meilleure des lois d'ajustement obtenue est de forme "puissance" et ne tient pas compte de la teneur en liant.

Cette observation est similaire à celle faite dans l'étape a), soit réchauffage et scarification de l'enrobé d'apport.

Etape c) - Mélange et pose de l'enrobé thermorégénéré

Essai: VISCOSITE A 60 °C

Etape c): MELANGE ET POSE DE L'ENROBE THERMOREGENERE

	MELANGE			*ENROBE THERMOREGENERE*			
n° chant	a [%]	b [%]	V(1) [Pa*s]	Régén (C) [%]	V'(1) [-]	V(C) [Pa*s]	Diff [%]
001	96.10%	3.90%	6579.924	5.14%	40400.74	1410.650	-78.6%
002	76.50%	23.50%	791.383	0.00%	791.38	618.380	-21.9%
003	76.20%	23.80%	876.433	0.00%	876.43	631.000	-28.0%
004	65.00%	35.00%	4276.865	5.13%	26217.18	548.970	-87.2%
005	71.00%	29.00%	5631.342	4.61%	31591.83	729.300	-87.0%
006	78.30%	21.70%	375.318	2.54%	1328.63	140.080	-62.7%
007	68.40%	31.60%	1204.010	0.52%	1830.10	624.690	-48.1%
008	65.30%	34.70%	454.369	1.75%	1249.51	223.800	-50.7%
009	84.50%	15.50%	15092.397	7.33%	125719.67	4152.700	-72.5%
010	73.50%	26.50%	385.567	1.71%	1044.89	236.410	-38.7%

STATISTIQUES						
Min:	375.318	0.00%	791.38	140.080	-87.2%
Max:	15092.397	7.33%	125719.67	4152.700	-21.9%
Moy:	3566.761	2.87%	23105.04	931.598	-57.5%
E-type:	4680.950	2.54%	39148.966	1187.235	23.748

Légendes:

C..... échantillon de bitume de l'enrobé thermorégénéré.
V(1)..... valeurs théoriques du mélange (a)-(b) sans liant régénérant.
ces valeurs sont calculées avec la formule suivante: $\log(V) = a*\log(V(A)) + b*\log(V(B))$
V(A) et V(B) étant les viscosité à 60 °C des échantillons A et B.
Régén(C)... % de liant régénérant par rapport à la masse totale de liant théorique.

V'(1)..... = V(1) * (Régén(C) + 1) Diff ..... = (V(C) - V(1)) / V(1) * 100

Remarque:
Pour le chantier 007, la valeur V(1) est calculée en tenant compte du bitume d'ajout (B 180/220). Celui-ci n'ayant pas fait l'objet d'un prélévement, la pénétration à 25 °C a été choisie arbitrairement à 200 [1/10 mm] et la viscosité à 60 °C calculée à partir de cette valeur.

LOI D'AJUSTEMENT:

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
V'(1) V(C)	0.866	V(C) = H + M * V(1) * (Régén(C) + 1)	H = 254.6296 M = 0.0293	lin.	Aucune valeur n' été écartée
Régén(C) Diff	0.867	Diff = - [H + M * Régén(C) + 1]	H = 26.1007 M = 8.1175	lin.	Aucune valeur n' été écartée

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
Régén(C) Diff	0.916	Diff = - [H + M * ln(Régén(C) + 1)]	H = 26.1068 M = 28.1563	log.	Aucune valeur n' été écartée

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
V'(1) V(C)	0.836	V(C) = H * exp[M * V(1) * (Régén(C) + 1)]	H = 358.7498 M = 2.072e-5	exp.	Aucune valeur n'a été écartée
Régén(C) Diff	0.843	Diff = H * exp[M * (Régén (C) + 1)]	H = - 28.2626 M = 0.1595	exp.	Aucune valeur n' été écartée

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
Régén(C) Diff	0.920	Diff = H * (Régén (C) + 1)^M	H = - 27.7051 M = 0.5713	puiss.	Aucune valeur n' été écartée

Essai: VISCOSITE A 130 °C

Etape c): MELANGE ET POSE DE L'ENROBE THERMOREGENERE

	MELANGE			ENROBE THERMOREGENERE			
n° chant	a [%]	b [%]	V(1) [Pa/s]	Régén (C) [%]	V'(1) [-]	V(C) [Pa/s]	Diff [%]
001	96.10%	3.90%	1.675	5.14%	10.283	0.860	-48.6%
002	76.50%	23.50%	0.938	0.00%	0.938	0.810	-13.7%
003	76.20%	23.80%	0.952	0.00%	0.952	0.810	-14.9%
004	65.00%	35.00%	2.166	5.13%	13.275	0.729	-66.3%
005	71.00%	29.00%	2.193	4.61%	12.304	0.839	-61.7%
006	78.30%	21.70%	0.505	2.54%	1.788	0.347	-31.3%
007	68.40%	31.60%	0.953	0.52%	1.449	0.751	-21.2%
008	65.30%	34.70%	0.592	1.75%	1.629	0.442	-25.4%
009	84.50%	15.50%	2.828	7.33%	23.557	1.333	-52.9%
010	73.50%	26.50%	0.644	1.71%	1.746	0.466	-27.7%

STATISTIQUES

Min:	0.505	0.00%	0.938	0.347	-66.3%
Max:	2.828	7.33%	23.557	1.333	-13.7%
Moy:	1.345	2.87%	6.792	0.739	-36.4%
E-type:	0.812	2.54%	7.744	0.280	19.415

Légendes:

C..... échantillon de bitume de l'enrobé thermorégénéré.
V(1)..... valeurs théoriques du mélange (a)-(b) sans liant régénérant.
ces valeurs sont calculées avec la formule suivante: $\log(V) = a*\log(V(A)) + b*\log(V(B))$
V(A) et V(B) étant les viscosité à 130 °C des échantillons A et B.
Régén(C)... % de liant régénérant par rapport à la masse totale de liant théorique.

V'(1)..... = V(1) * (Régén(C) + 1)

Diff..... = (V(C) - V(1)) / V(1) * 100

Remarque:
Pour le chantier 007, la valeur V(1) est calculée en tenant compte du bitume d'ajout (B 180/220). Celui-ci n'ayant pas fait l'objet d'un prélévement, la pénétration à 25 °C a été choisie arbitrairement à 200 [1/10 mm] et la viscosité à 130 °C calculée à partir de cette valeur.

LOI D'AJUSTEMENT:

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
Régén(C) Diff '	0.902	Diff = - (H + M * Régén(C))	H = 9.6366 M = 6.9025	lin.	Aucune valeur n'a été écartée

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
Régén(C) Diff	0.909	Diff = -[H + M * ln(Régén(C) + 1)]	H = 10.8959 M = 22.8184	log.	Aucune valeur n'a été écartée

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
Régén(C) Diff	0.921	Diff = H * exp(M * Régén(C) + 1)	H = - 14.1625 M = 0.2075	exp.	Aucune valeur n'a été écartée

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
Régén(C) Diff	0.964	Diff = H * (Régén(C) + 1)^M	H = - 14.2830 M = 0.7122	puiss.	Aucune valeur n'a été écartée

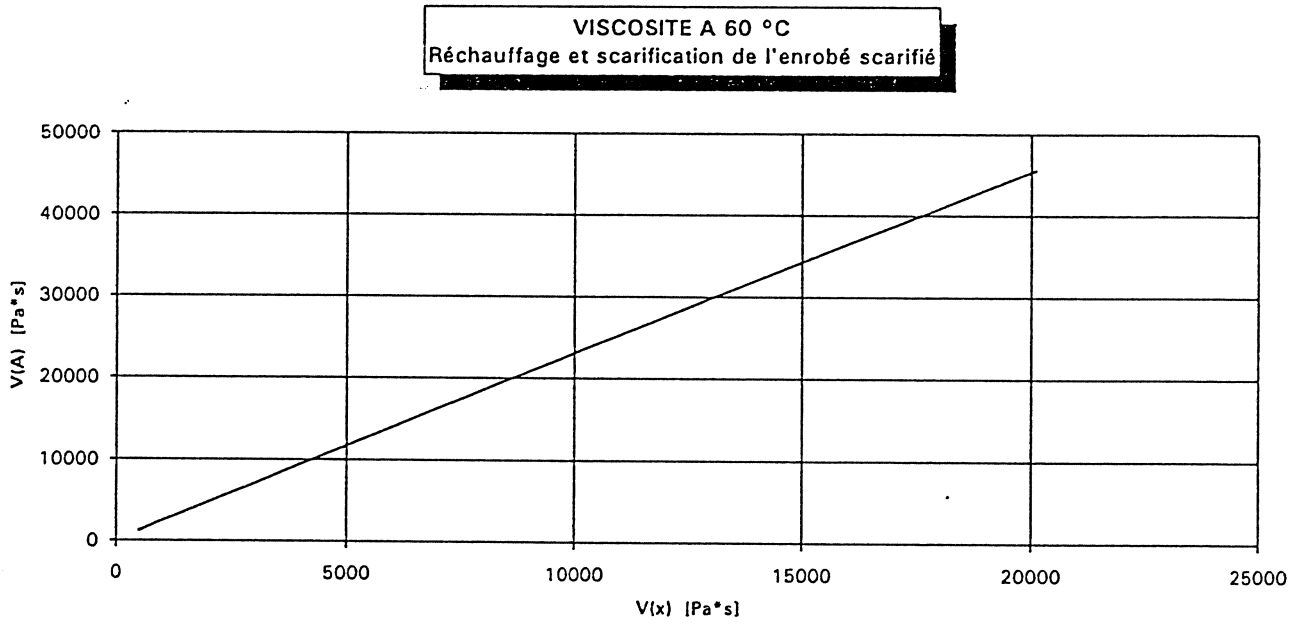
Viscosité, sélection des lois d'évolution

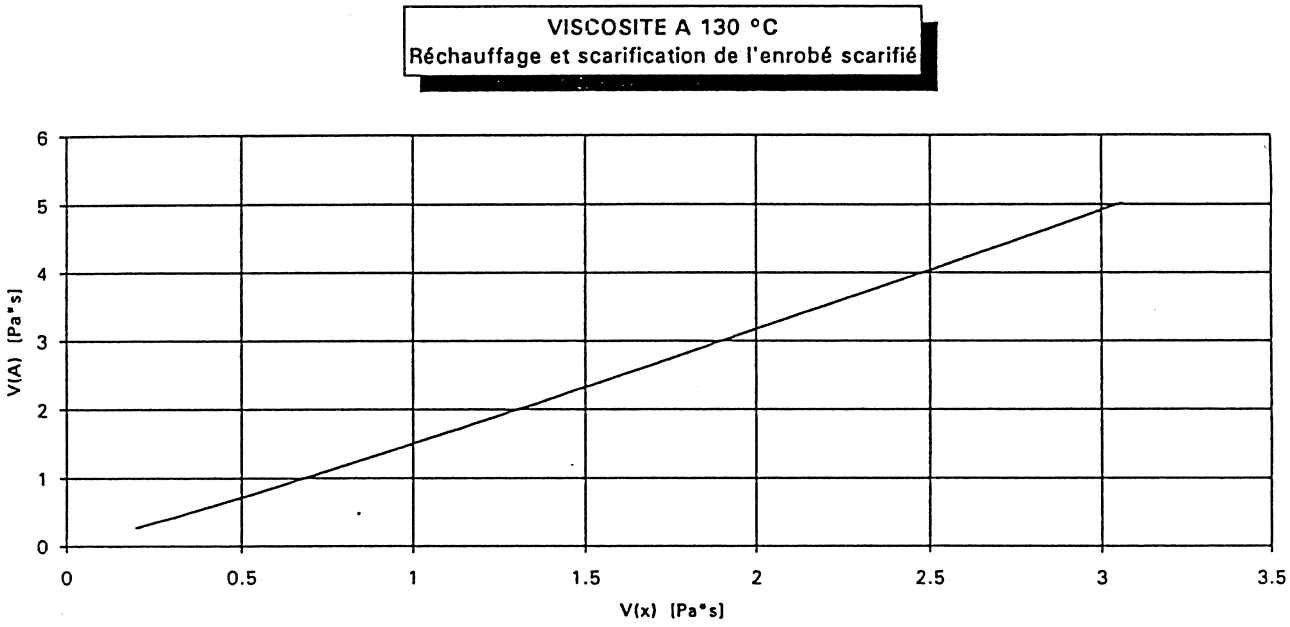
Les meilleures lois obtenues sont présentées ci-après :

Etape a) - Réchauffage et scarification de l'enrobé en place

	Viscosité à 60°C	Viscosité à 130°C
Loi	V (A) = H · V (x) ^M	V (A) = H · V (x) ^M

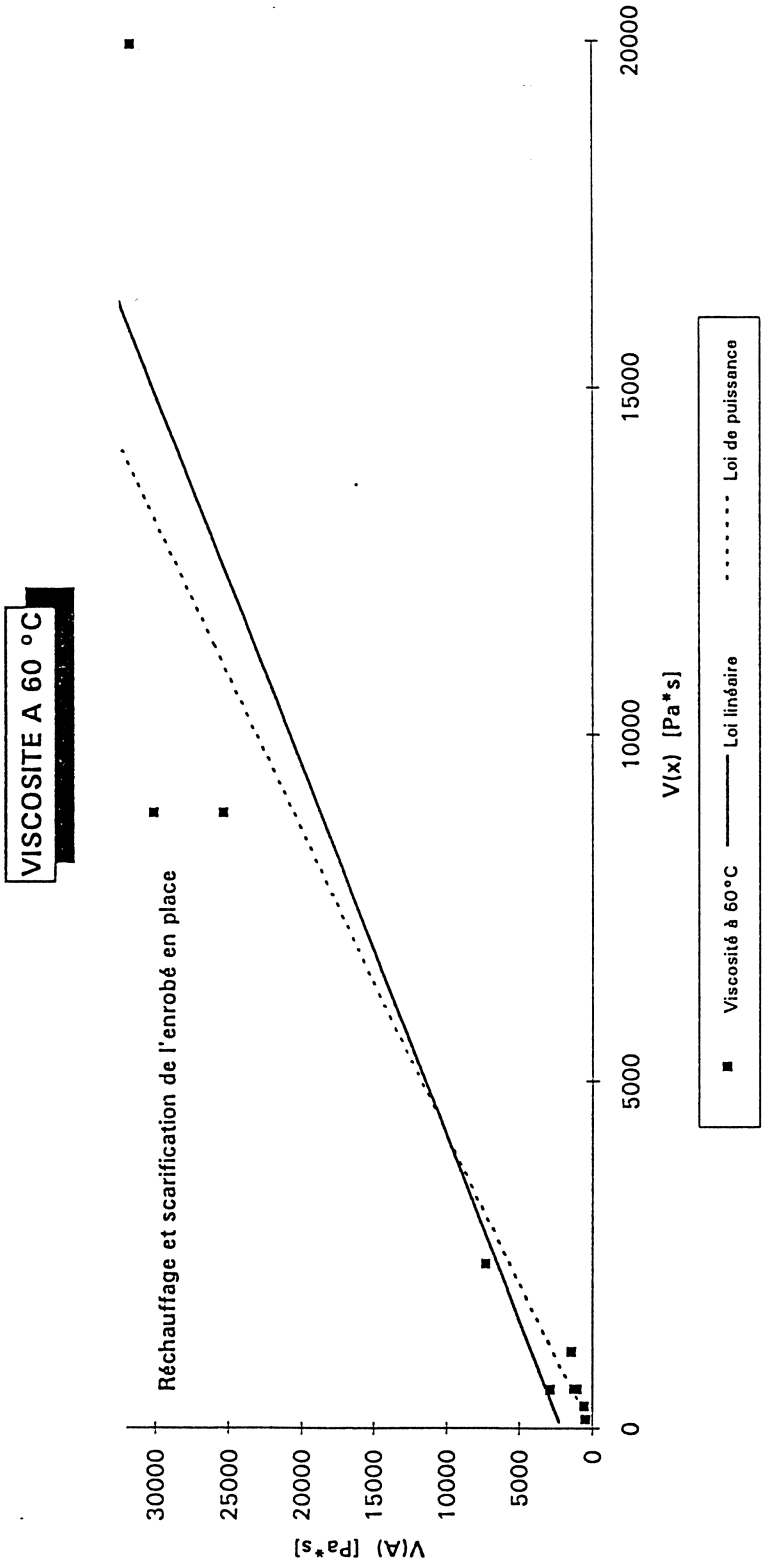
Les plages de valeurs obtenues étant complètement différentes pour les 2 essais (facteur de 10'000), il n'est pas possible de représenter ces deux lois sur un même graphique. Cependant, la comparaison des paramètres des 2 lois montrent qu'il n'y a pas continuité entre les résultats à 60°C et 130°C.

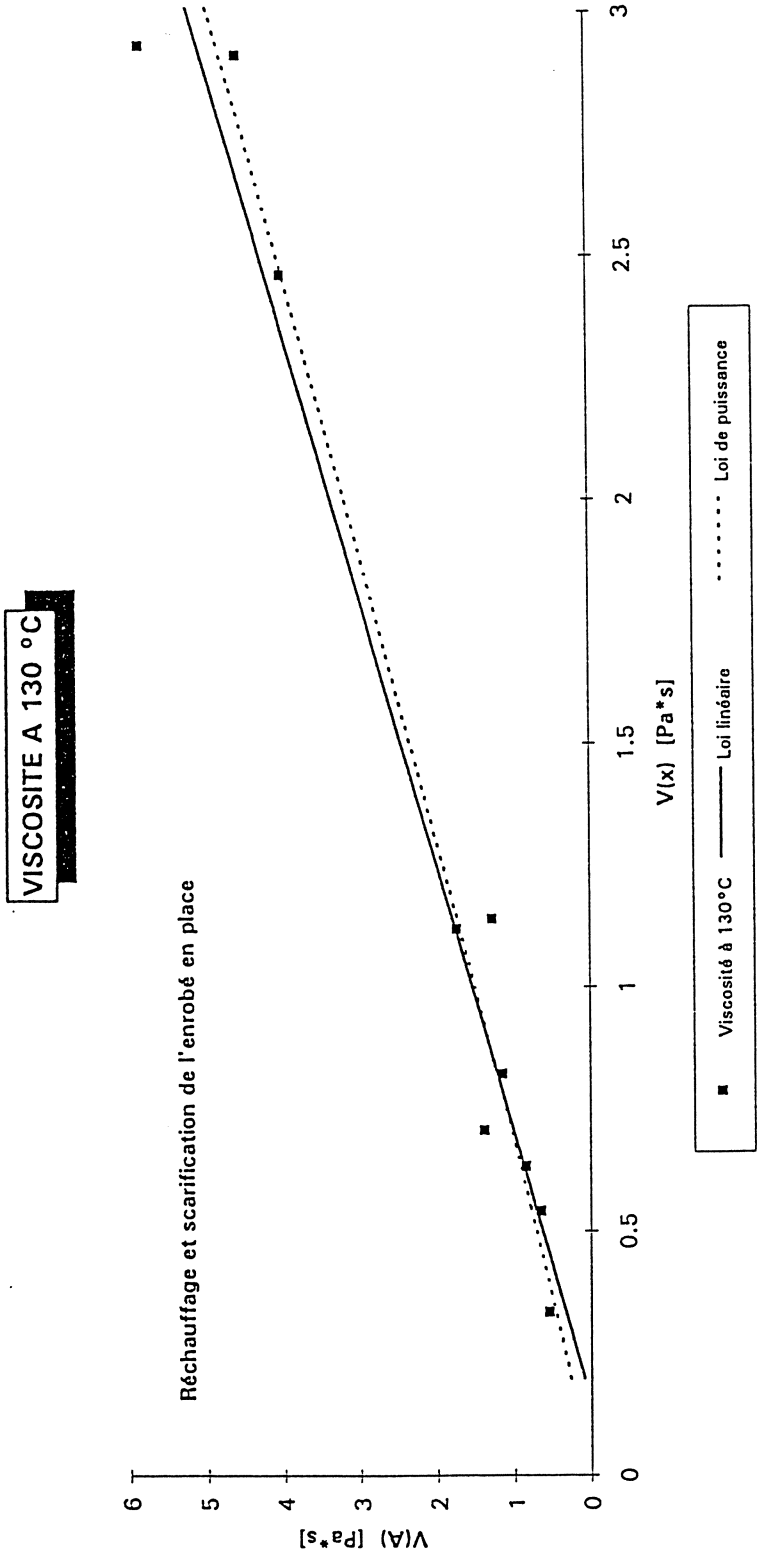




En choisissant une loi linéaire au lieu d'une puissance, on remarque sur les représentations graphiques que les droites sont identiques aux courbes de puissance. Les coefficient de corrélation, s'ils sont un peu moins bons, restent toutefois suffisants.

		Viscosité à 60°C	Viscosité à 130°C
Coefficient	Linéaire	0,914	0,978
Corrélation	Puissance	0,965	0,979

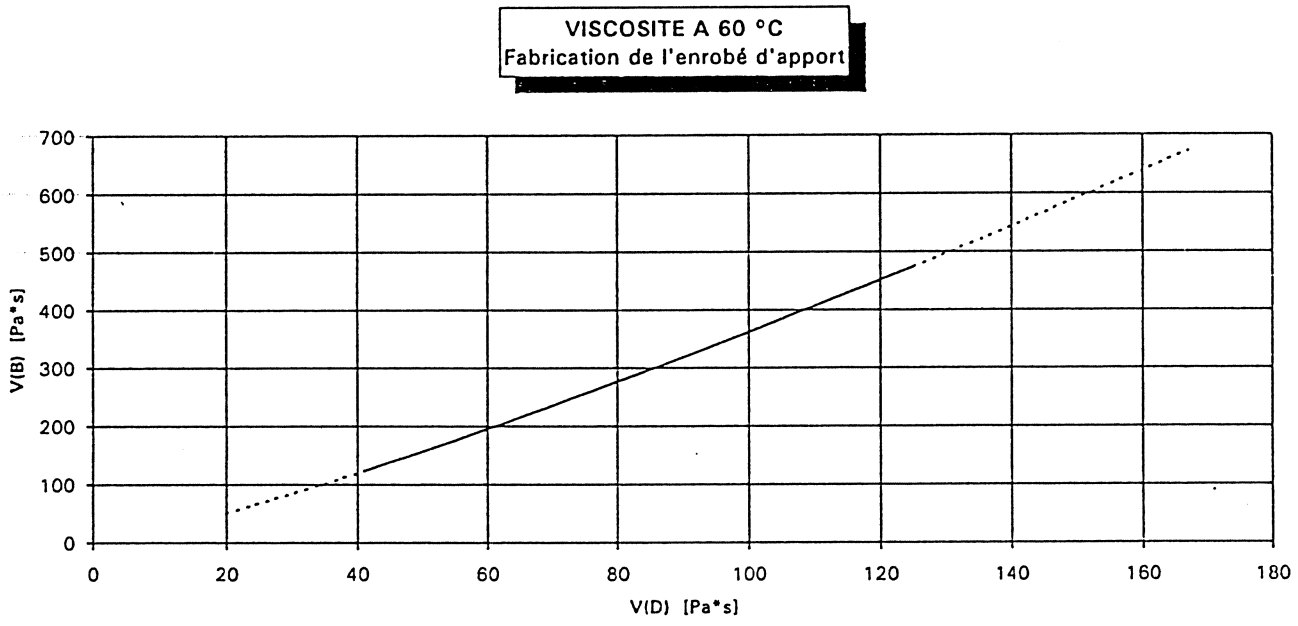

VISCOSITE A 60 °C
Réchauffage et scarification de l'enrobé en place
V(A) [Pa*s]
30000
25000
20000
15000
10000
5000
0
0
5000
10000
15000
20000
V(x) [Pa*s]
Viscosité à 60°C
Loi linéaire
Loi de puissance


VISCOSITE A 130 °C
Réchauffage et scarification de l'enrobé en place
V(A) [Pa*s]
0
1
2
3
4
5
6
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
V(x) [Pa*s]
Viscosité à 130°C
Loi linéaire
Loi de puissance

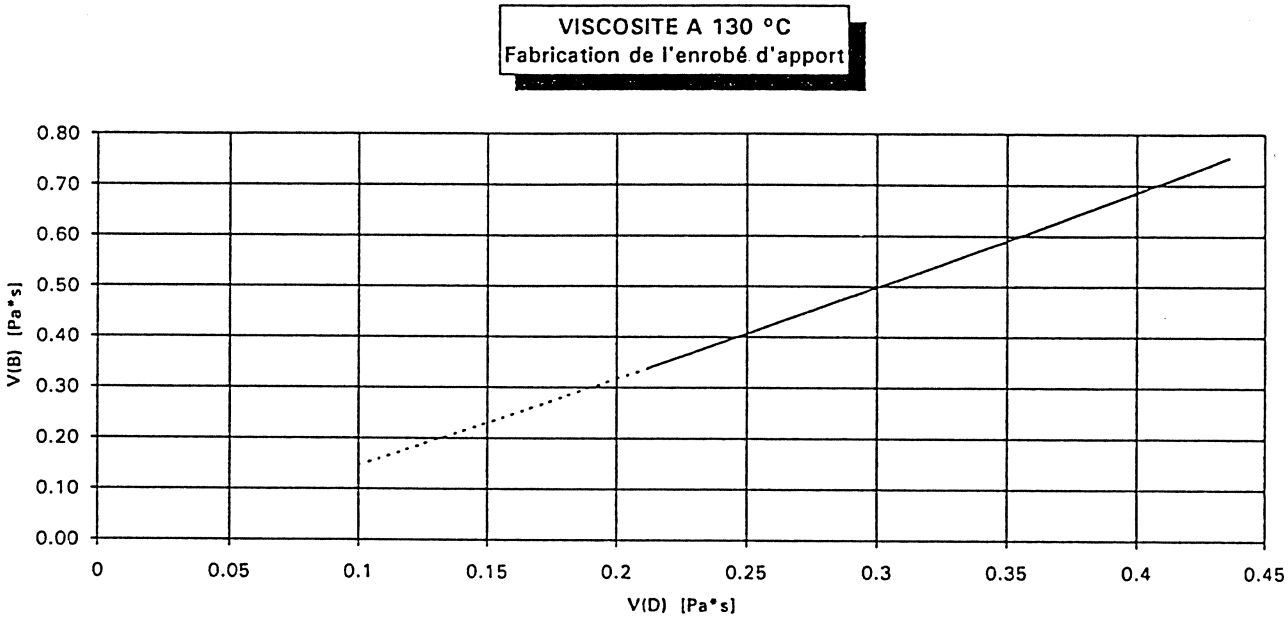
Etape b) - Fabrication de l'enrobé d'apport

	Viscosité à 60°C	Viscosité à 130°C
Loi	V (B) = H · V (D) ^M	V (B) = H · V (D) ^M

Les plages de valeurs obtenues étant complètement différentes pour les 2 essais (facteur de 1'000), il n'est pas possible de représenter ces deux lois sur un même graphique. Cependant, la comparaison des paramètres des 2 lois montrent qu'il n'y a pas continuité entre les résultats à 60°C et 130°C.



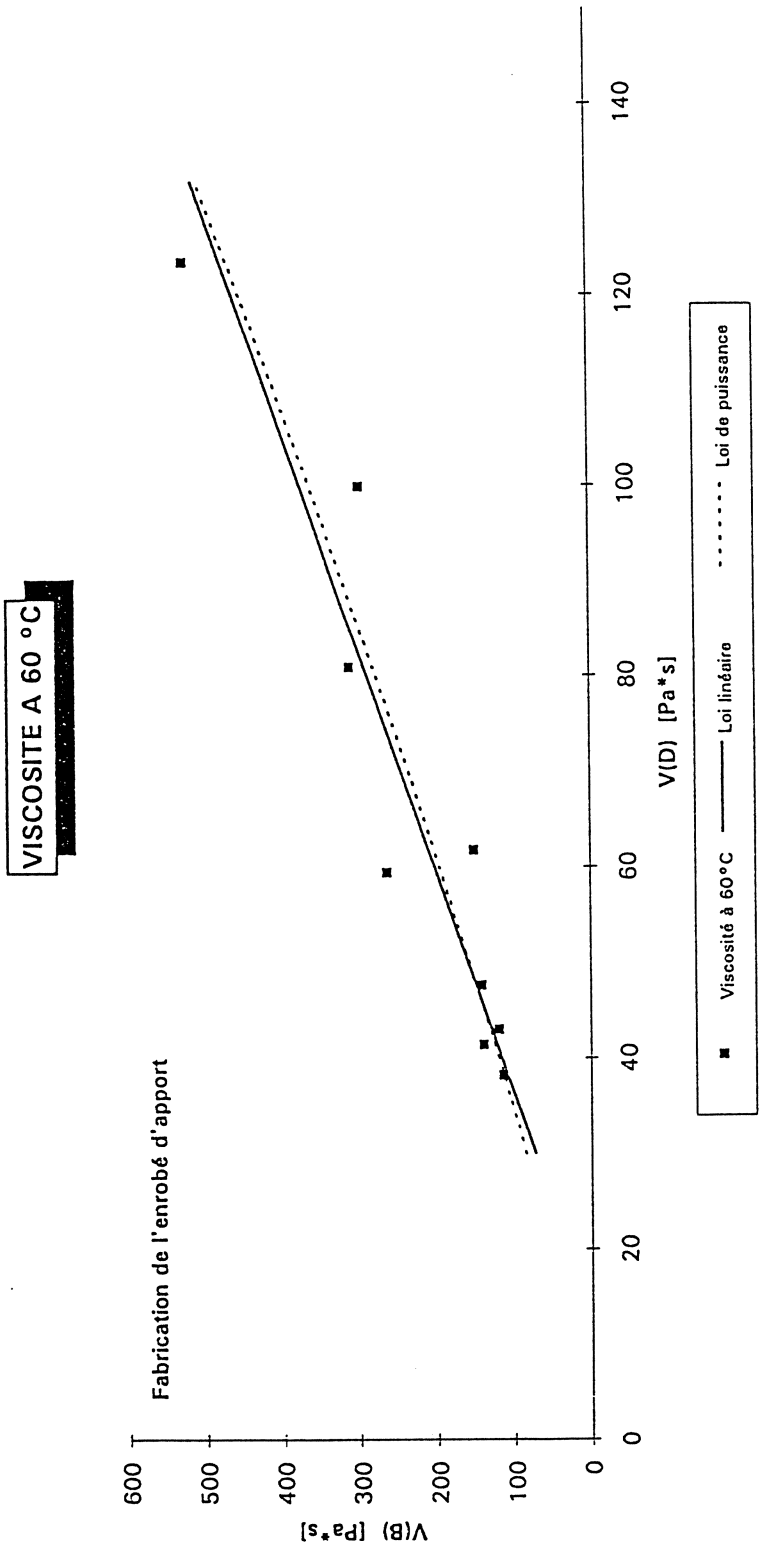
Le trait continu représente la plage de valeurs obtenues pour les essais et les traitillés une extension de ces plages.

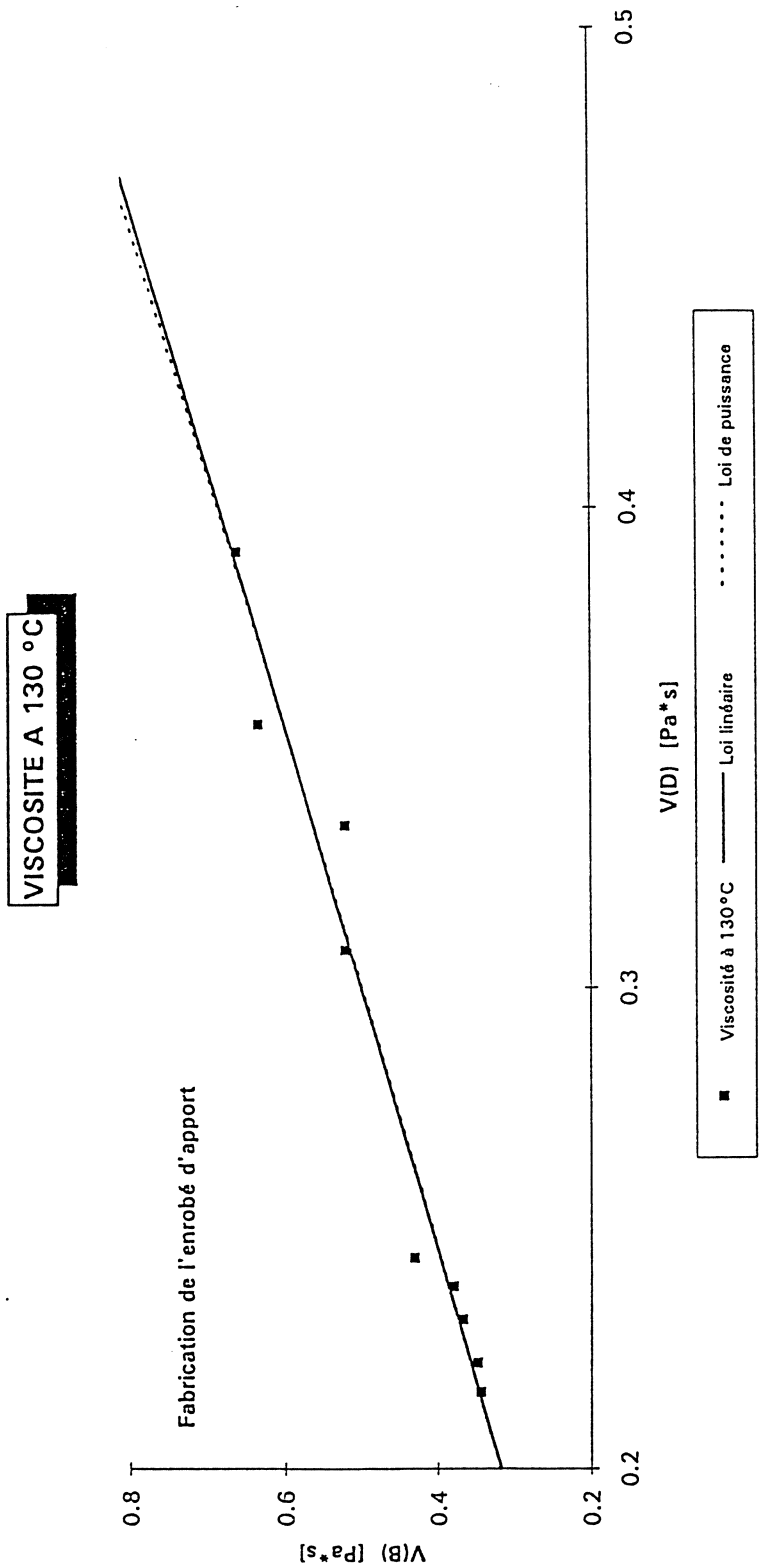


Le trait continu représente la plage de valeurs obtenues pour les essais et les traitillés une extension de ces plages.

En choisissant une loi linéaire au lieu d'une puissance, on remarque sur les représentations graphiques que les droites sont identiques aux courbes de puissance. Les coefficient de corrélation, s'ils sont un peu moins bons, restent toutefois suffisants.

		Viscosité à 60°C	Viscosité à 130°C
Coefficient	Linéaire	0,941	0,982
Corrélation	Puissance	0,942	0,984

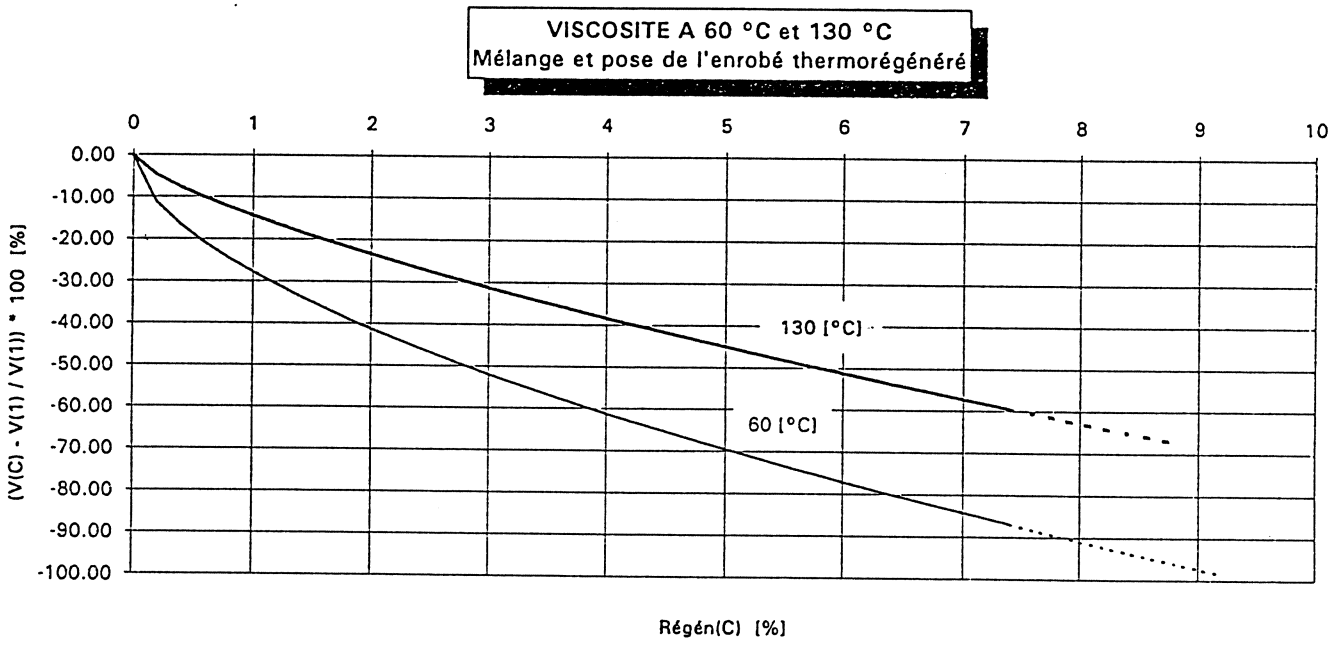

VISCOSITE A 60 °C
Fabrication de l'enrobé d'apport
V(B) [Pa*s]
600
500
400
300
200
100
0
0
20
40
60
80
100
120
140
V(D) [Pa*s]
Viscosité à 60°C
Loi linéaire
Loi de puissance


VISCOSITE A 130 °C
Fabrication de l'enrobé d'apport
V(B) [Pa*s]
0.8
0.6
0.4
0.2
0.2
0.3
0.4
0.5
V(D) [Pa*s]
Viscosité à 130°C
Loi linéaire
Loi de puissance

Etape c) - Mélange et pose de l'enrobé thermorégénéré

Les lois les meilleures sont obtenues en exprimant la différence en % entre la viscosité théorique du mélange avant régénérant et la viscosité du mélange final, en fonction de la teneur en régénérant.

	Viscosité à 60°C	Viscosité à 130°C
Loi	Diff = H · (Régén (c) + 1) ^M	Diff = H · (Régén (c) + 1) ^M



Le trait continu représente la plage de valeurs obtenues pour les essais et les traitillés une extension de ces plages.

5.3.3 Point de ramollissement anneau et bille

Etape a) - Réchauffage et scarification de l'enrobé en place

Essai: ANNEAU ET BILLE

Etape a): RECHAUFFAGE ET SCARIFICATION DE L'ENROBE EN PLACE

	PARAMETRES			RESULTATS					
n° chant	e [cm]	L/E(a) [%]	e * L/E [-]	T(x) [°C]	T(A) [°C]	Diff [%]	T'(x) [-]	T''(x) [-]	T'''(x) [-]
001	4.0	5.20%	0.21	63.3	67.9	7.3%	253.2	3.29	13.17
002	3.0	5.77%	0.17	57.8	58.8	1.7%	173.4	3.34	10.01
003	3.0	5.73%	0.17	55.0	58.1	5.6%	165.0	3.15	9.45
004	3.0	5.01%	0.15	69.4	77.3	11.4%	208.2	3.48	10.43
005	3.5	5.27%	0.18	69.2	78.6	13.6%	242.2	3.65	12.76
006	3.0	6.41%	0.19	46.2	54.0	16.9%	138.6	2.96	8.88
007	3.0	6.35%	0.19	55.5	65.2	17.5%	166.5	3.52	10.57
008	2.5	6.21%	0.16	55.2	57.6	4.3%	138.0	3.43	8.57
009	3.5	5.80%	0.20	74.4	76.5	2.8%	260.4	4.32	15.10
010	2.5	6.47%	0.16	51.0	54.5	6.9%	127.5	3.30	8.25

STATISTIQUES							
	Minimum:	46.2	54.0	1.7%	127.5	2.96	8.25
	Maximum:	74.4	78.6	17.5%	260.4	4.32	15.10
	Moyenne:	59.7	64.9	8.8%	187.3	3.44	10.72
	Ecart-type:	9.036	9.711	0.057	50.154	0.362	2.253

Légendes:

e..... épaisseur de l'enrobé scarifié.
L/E(a).... teneur en liant de l'enrobé scarifié.
x..... échantillon carotté sur l'enrobé en place, avant réchauffage.
A..... échantillon prélevé sur l'enrobé en placem, après réchauffage et scarification).
T..... résultat de l'essai Anneau et Bille.

T'(x)..... = T(x) * e
T''(x)..... = T(x) * L/E(a)
T'''(x).... = T(x) * L/E(a) * e
Diff..... = (T(A) - T(x)) / T(x) * 100

LOI D'AJUSTEMENT:

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
T(x) T(A)	0.943	T(A) = H + M * T(x)	H = 4.3702 M = 1.0131	lin.	Aucune valeur n'a été écartée
T'(x) T(A)	0.867	T(A) = H + M * T(x) * e	H = 33.4126 M = 0.1678	lin.	Aucune valeur n'a été écartée

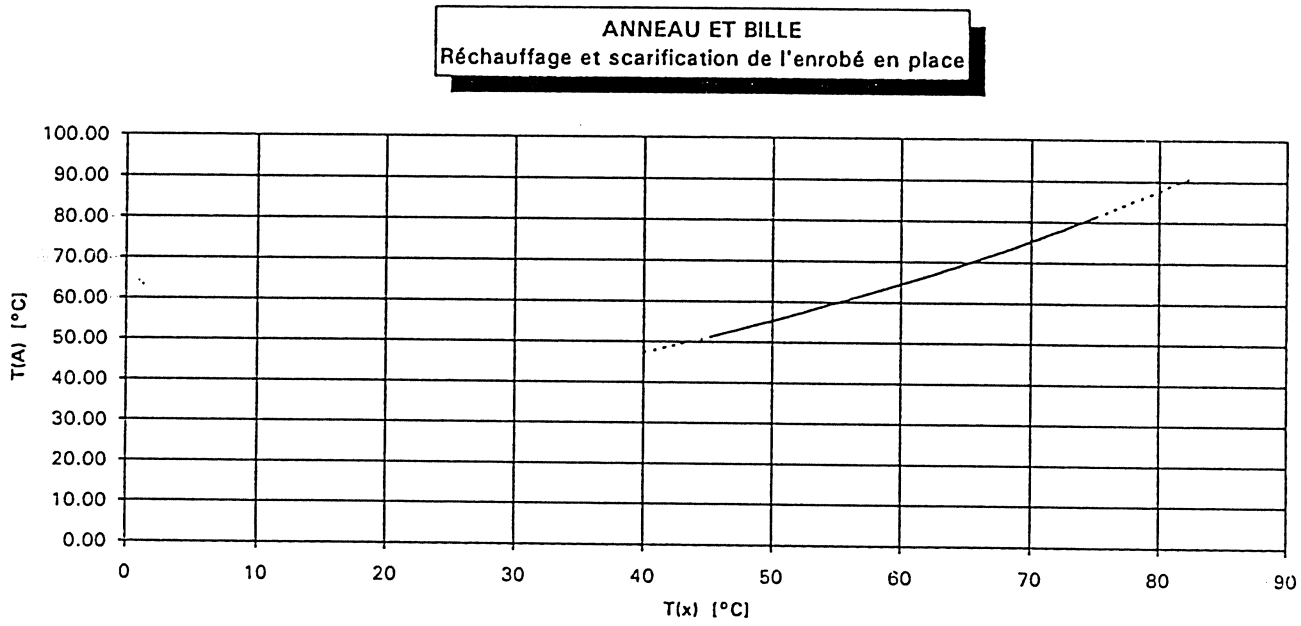
Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
T(x) T(A)	0.936	T(A) = H + M * ln(T(x))	H = -180.84 M = 60.2325	log.	Aucune valeur n'a été écartée
T'(x) T(A)	0.877	T(A) = H + M * ln(T(x) * e)	H = -102.02 M = 32.0866	log.	Aucune valeur n'a été écartée
T'''(x) T(A)	0.816	T(A) = H + M * ln[T(x) * L/E(a) * e]	H = -28.1131 M = 39.5024	log.	Aucune valeur n'a été écartée

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
T(x) T(A)	0.944	T(A) = H * exp(M* T(x))	H = 25.5958 M = 0.0154	exp.	Aucune valeur n'a été écartée
T'(x) T(A)	0.874	T(A) = H * exp(M * T(x) * e)	H = 39.6754 M = 0.0026	exp.	Aucune valeur n'a été écartée
T'''(x) T(A)	0.805	T(A) = H * exp[M * T(x) * L/E(a)* e]	H = 36.5022 M = 0.0527	exp.	Aucune valeur n'a été écartée

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
T(x) T(A)	0.940	T(A) = H * T(x)^M	H = 1.5173 M = 0.9182	puiss.	Aucune valeur n'a été écartée
T'(x) T(A)	0.886	T(A) = H * (T(x) * e)^M	H = 4.9644 M = 0.4922	puiss.	Aucune valeur n'a été écartée
T'''(x) T(A)	0.826	T(A) = H * [T(x) * L/E(a) * e]^M	H = 15.3856 M = 0.6071	puiss.	Aucune valeur n'a été écartée

La meilleure des lois est de type exponentiel ne faisant intervenir, ni la teneur en liant de l'enrobé en place, ni l'épaisseur de l'enrobé scarifié.

	Température anneau et bille
Loi	$T(A) = H \cdot \exp(M \cdot T(x))$



Le trait continu représente la plage de valeurs obtenues pour les essais et les traitillés une extension de ces plages.

Etape b) - Fabrication de l'enrobé d'apport

Essai: ANNEAU ET BILLE

Etape b): FABRICATION DE L'ENROBE D'APPORT

	PARAMETRES	RESULTATS			
n° chant	L/E(b) [%]	T(D) [°C]	T(B) [°C]	Diff [%]	T'(D) [-]
001	2.02%	47.9	56.5	18.0%	0.97
002	4.23%	39.1	46.5	18.9%	1.65
003	5.28%	43.1	50.9	18.1%	2.28
004	5.40%	40.1	46.2	15.2%	2.17
005	5.06%	40.5	47.9	18.3%	2.05
006	5.21%	40.8	48.2	18.1%	2.13
007	4.32%	43.4	51.1	17.7%	1.87
008	5.38%	-	44.5		-
009	4.88%	43.7	50.2	14.9%	2.13
010	3.79%	42.3	47.3	11.8%	1.60

STATISTIQUES

Minimum:	39.1	46.2	11.8%	0.97
Maximum:	47.9	56.5	18.9%	2.28
Moyenne:	42.3	49.4	16.8%	1.87
Ecart-type:	2.639	3.220	0.023	0.411

Légendes:

D..... échantillon de bitume de l'enrobé d'apport, avant fabrication.
B..... échantillon de bitume de l'enrobé d'apport, après fabrication.
L/E(b)..... teneur en liant de l'enrobé d'apport.
T..... résultat de l'essai Anneau et Bille.

T'(D)..... = T(D) * L/E(b)

Diff..... = (T(B) - T(D)) / T(D) * 100

Remarque:
Les valeurs du chantier 008 ont été supprimée à cause de l'absence de prélévement de l'échantillon D.

LOI D'AJUSTEMENT:

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
T(D) T(B)	0.953	T(B) = H + M * T(D)	H = 0.2432 M = 1.1620	lin.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.

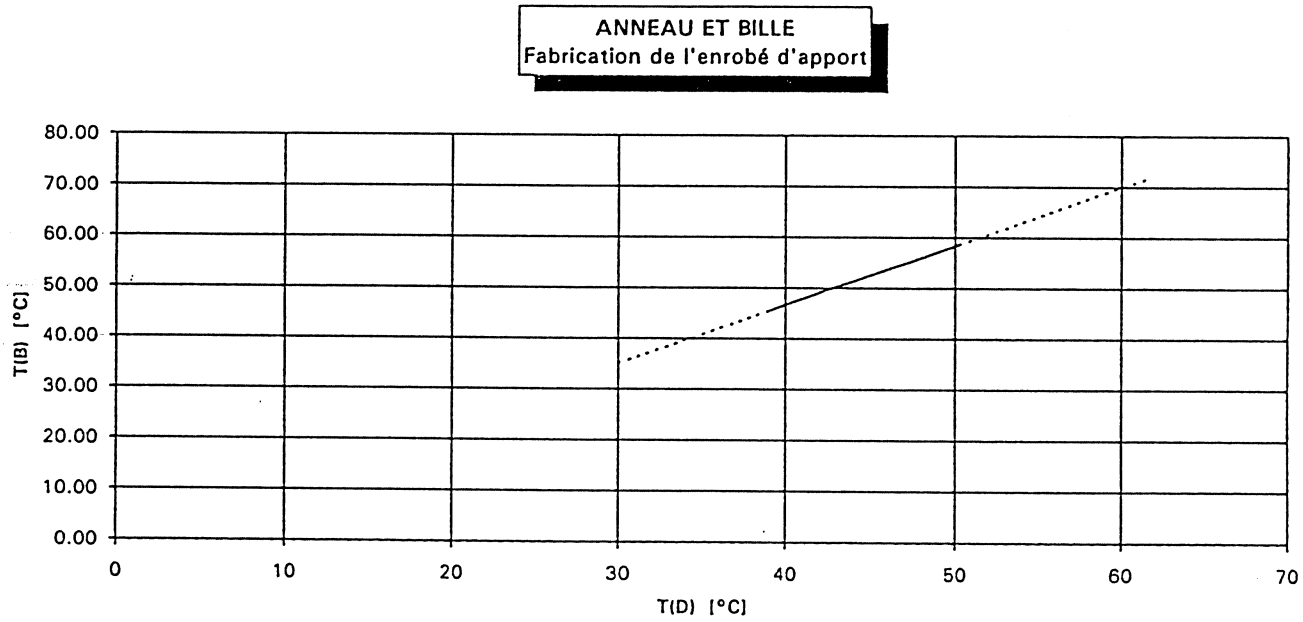
Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
T(D) T(B)	0.948	T(B) = H + M * ln(T(D))	H = -137.85 M = 50.0265	log.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
T(D) T(B)	0.952	T(B) = H * exp(M * T(D))	H = 18.8177 M = 0.0228	exp.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
T(D) T(B)	0.948	T(B) = H * T(D)^M	H = 1.2517 M = 0.9814	puiss.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.

La meilleure des lois est une linéaire ne faisant pas intervenir la teneur en liant de l'enrobé d'apport : L/E (b).

	Température anneau et bille
Loi	T (B) = H + M · T (D)



Le trait continu représente la plage de valeurs obtenues pour les essais et les traitillés une extension de ces plages.

Etape c) - Mélange et pose de l'enrobé thermorégénéré

Essai: ANNEAU ET BILLE

Etape c): MELANGE ET POSE DE L'ENROBE THERMOREGENERE

	MELANGE			ENROBE THERMOREGENERE			
n° chant	a [%]	b [%]	T(1) [° C]	Régén (C) [%]	T'(1) [-]	T(C) [° C]	Diff [%]
001	96.10%	3.90%	67.5	5.14%	4.14	59.4	-11.94%
002	76.50%	23.50%	55.9	0.00%	0.56	54.3	-2.88%
003	76.20%	23.80%	56.4	0.00%	0.56	54.0	-4.23%
004	65.00%	35.00%	66.4	5.13%	4.07	53.9	-18.84%
005	71.00%	29.00%	69.7	4.61%	3.91	55.5	-20.37%
006	78.30%	21.70%	52.7	2.54%	1.87	46.1	-12.59%
007	68.40%	31.60%	59.8	0.52%	0.91	54.0	-9.65%
008	65.30%	34.70%	53.1	1.75%	1.46	49.2	-7.26%
009	84.50%	15.50%	72.4	7.33%	6.03	65.6	-9.42%
010	73.50%	26.50%	52.6	1.71%	1.43	50.2	-4.55%

STATISTIQUES

Min:	52.6	0.00%	0.6	46.1	-20.37%
Max:	72.4	7.33%	6.0	65.6	-2.88%
Moy:	60.6	2.87%	2.5	54.2	-10.17%
E-type:	7.649	2.536	1.895	5.43114	5.940

Légendes:

C..... échantillon de bitume de l'enrobé thermorégénéré.
T(1)..... valeurs théoriques du mélange (a)-(b) sans liant régénérant.
ces valeurs sont calculées avec la formule suivante: $100*T(1) = a*T(A) + b*T(B)$
T(A) et T(B) étant les températures de ramolissement des échantillons A et B.
Régén(C)... % de liant régénérant par rapport à la masse totale de liant théorique.

T'(1)..... = T(1) * (Régén(C) + 1)

Diff ..... = (T(C) - T(1)) / T(1) * 100

Remarque:
Pour le chantier 007, la valeur T(1) est calculée en tenant compte du bitume d'ajout (B 180/220). Celui-ci n'ayant pas fait l'objet d'un prélévement, la pénétration à 25 °C a été choisie arbitrairement à 200 [1/10 mm] et lae point de ramolissement anneau et bille calculé à partir de cette valeur.

LOI D'AJUSTEMENT:
Aucune loi d'ajustement n'a pu être trouvée entre T(C) et les paramètres a et b (% des composants du mélange final) et Régén(C) (teneur en liant régénérant).

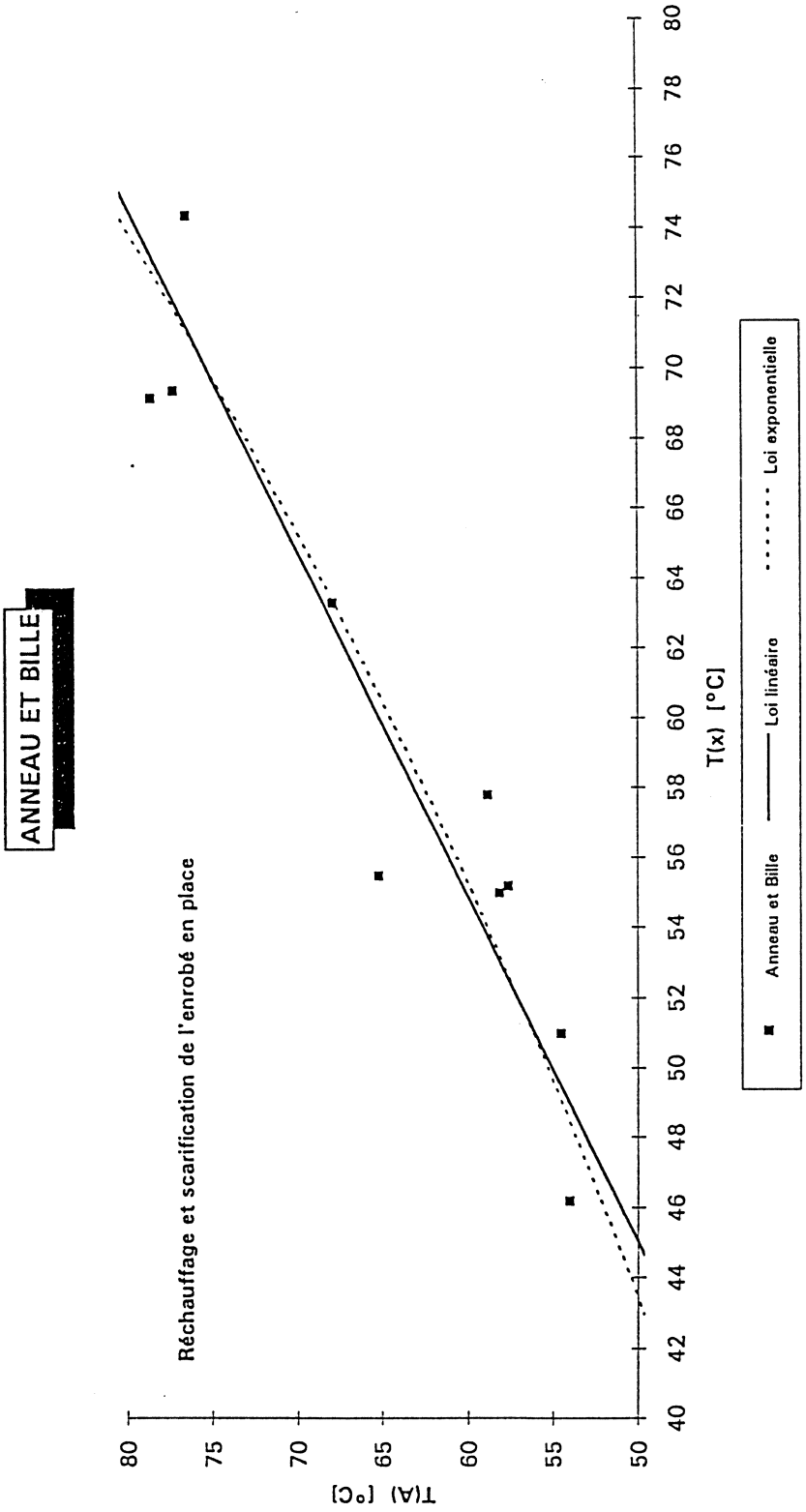
Température A et B, sélection des lois d'évolution

Les meilleures lois obtenues sont présentées ci-après :

	Loi
étape a)	$T(A) = H \cdot \exp(M \cdot T(x))$
étape b)	$T(B) = H + M \cdot T(D)$
étape c)	aucune

Pour l'étape a), en choisissant une loi linéaire au lieu d'une exponentielle, on remarque, sur la représentation graphique, que la droite est similaire à la courbe exponentielle. Le coefficient de corrélation, s'il est un peu moins bon, reste toutefois suffisant.

		A et B
Coefficient Corrélation	Linéaire	0.943
	Exponentielle	0.944


ANNEAU ET BILLE
Réchauffage et scarification de l'enrobé en place
T(A) [°C]
80
75
70
65
60
55
50
40
42
44
46
48
50
52
54
56
58
60
62
64
66
68
70
72
74
76
78
80
T(x) [°C]
Anneau et Bille
Loi linéaire
Loi exponentielle

5.3.4 Détermination du point de Fraass

Etape a) - Réchauffage et scarification de l'enrobé en place

Essai: POINT DE FRAASS

Etape a): RECHAUFFAGE ET SCARIFICATION DE L'ENROBE EN PLACE

	PARAMETRES			RESULTATS					
n° chant	e [cm]	L/E(a) [%]	e * L/E [-]	F(x) [°C]	F(A) [°C]	Diff [%]	F'(x) [-]	F''(x) [-]	F'''(x) [-]
001	4.0	5.20%	0.21	-13	-9	-30.8%	-52.0	-0.7	-2.7
002	3.0	5.77%	0.17	-10	-9	-10.0%	-30.0	-0.6	-1.7
003	3.0	5.73%	0.17	-19	-10	-47.4%	-57.0	-1.1	-3.3
004	3.0	5.01%	0.15	-6	-3	-50.0%	-18.0	-0.3	-0.9
005	3.5	5.27%	0.18	-7	-4	-42.9%	-24.5	-0.4	-1.3
006	3.0	6.41%	0.19	-20	-18	-10.0%	-60.0	-1.3	-3.8
007	3.0	6.35%	0.19	-11	-9	-18.2%	-33.0	-0.7	-2.1
008	2.5	6.21%	0.16	-16	-13	-18.8%	-40.0	-1.0	-2.5
009	3.5	5.80%	0.20	-3	-2	-33.3%	-10.5	-0.2	-0.6
010	2.5	6.47%	0.16	-16	-11	-31.3%	-40.0	-1.0	-2.6

STATISTIQUES							
	Minimum:	-20	-18	-50.0%	-60.0	-1.3	-3.8
	Maximum:	-3	-2	-10.0%	-10.5	-0.2	-0.6
	Moyenne:	-12	-9	-29.3%	-36.5	-0.7	-2.2
	Ecart-type:	5.705	4.849	0.147	16.513	0.372	1.032

Légendes:

e..... épaisseur de l'enrobé scarifié.
L/E(a)..... teneur en liant de l'enrobé scarifié.
x..... échantillon carotté sur l'enrobé en place, avant réchauffage.
A..... échantillon prélevé sur l'enrobé en place, après réchauffage.
F..... résultat de l'essai de Fraass.

F'(x)..... = F(x) * e
F''(x)..... = F(x) * L/E(a)
F'''(x)..... = F(x) * L/E(a) * e
Diff..... = (F(A) - F(x)) / F(x) * 100

LOI D'AJUSTEMENT:

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
F(x) F(A)	0.913	F(A) = H - M * ABS(F(x))	H = 0.5859 M = 0.7757	lin.	Aucune valeur n'a été écartée
F'(x) F(A)	0.841	F(A) = H - M * ABS(F(x)) * e	H = 0.2134 M = 0.2469	lin.	Aucune valeur n'a été écartée
F''(x) F(A)	0.945	F(A) = H - M * ABS(F(x)) * L/E(a)	H = 0.3539 M = 12.5396	lin.	Aucune valeur n'a été écartée
F'''(x) F(A)	0.909	F(A) = H - M * ABS(F(x)) * L/E(a) * e	H = 0.3934 M = 4.2760	lin.	Aucune valeur n'a été écartée

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
F(x) F(A)	0.885	F(A) = H - M * ln[ABS(F(x))]	H = 8.1214 M = 7.1740	log.	Aucune valeur n'a été écartée
F'(x) F(A)	0.843	F(A) = H - M * ln[ABS(F(x)) * e]	H = 17.1232 M = 7.4482	log.	Aucune valeur n'a été écartée
F''(x) F(A)	0.923	F(A) = -(H + M * ln[ABS(F(x)) * L/E(a)])	H = 12.1660 M = 7.3235	log.	Aucune valeur n'a été écartée
F'''(x) F(A)	0.891	F(A) = H - M * ln[ABS(F(x)) * L/E(a)*e]	H = 4.1795 M = 7.3193	log.	Aucune valeur n'a été écartée

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
F(x) F(A)	0.920	F(A) = H * exp[M* ABS(F(x))]	H = - 1.8806 M = 0.1125	exp.	Aucune valeur n'a été écartée
F'(x) F(A)	0.865	F(A) = H * exp(M * ABS(F(x)) * e)	H = - 1.9346 M = 0.0365	exp.	Aucune valeur n'a été écartée
F''(x) F(A)	0.927	F(A) = H * exp[M * ABS(F(x)) * L/E(a)]	H = - 2.0160 M = 1.7691	exp.	Aucune valeur n'a été écartée
F'''(x) F(A)	0.909	F(A) = H * exp[M * ABS(F(x)) * L/E(a) * e]	H = - 36.5022 M = 0.0527	exp.	Aucune valeur n'a été écartée

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
F(x) F(A)	0.957	F(A) = H * ABS(F(x))^M	H = - 0.5275 M = 1.1159	puiss.	Aucune valeur n'a été écartée
F'(x) F(A)	0.923	F(A) = H * (ABS[F(x) * e)]^M	H = - 0.1239 M = 1.1724	puiss.	Aucune valeur n'a été écartée
F''(x) F(A)	0.975	F(A) = H * ABS[(F(x) * L/E(a)]^M	H = - 12.2289 M = 1.1123	puiss.	Aucune valeur n'a été écartée
F'''(x) F(A)	0.957	F(A) = H * [ABS(F(x)) * L/E(a)*e]^M	H = - 15.3856 M = 0.6071	puiss.	Aucune valeur n'a été écartée

La meilleure des lois obtenues est de type "puissance", qui tient compte de la teneur en liant. Notons également que nous obtenons une corrélation à peine moins bonne avec une loi de type "puissance", qui ne tient pas compte de la teneur en liant.

Etape b) - Fabrication de l'enrobé d'apport

Essai: POINT DE FRAASS

Etape b): FABRICATION DE L'ENROBE D'APPORT

	PARAMETRES	RESULTATS			
n° chant	L/E(b) [%]	F(D) [°C]	F(B) [°C]	Diff [%]	F'(D) [-]
001	2.02%	-16	-13	-18.8%	-0.3
002	4.23%	-21	-18	-14.3%	-0.9
003	5.28%	-23	-20	-13.0%	-1.2
004	5.40%	-20	-19	-5.0%	-1.1
005	5.06%	-20	-19	-5.0%	-1.0
006	5.21%	-19	-18	-5.3%	-1.0
007	4.32%	-17	-16	-5.9%	-0.7
008	5.38%	-	-17		-
009	4.88%	-21	-19	-9.5%	-1.0
010	3.79%	-21	-20	-4.8%	-0.8

STATISTIQUES

Minimum:	-23	-20	-18.8%	-1.2
Maximum:	-16	-13	-4.8%	-0.3
Moyenne:	-20	-18	-9.1%	-0.9
Ecart-type:	2.167	2.236	0.052	0.259

Légendes:

D..... échantillon de bitume de l'enrobé d'apport, avant fabrication.
B..... échantillon de bitume de l'enrobé d'apport, après fabrication.
L/E(b)..... teneur en liant de l'enrobé d'apport.
F..... résultat de l'essai de Fraass.

F'(D).... = F(D) * L/E(b)

Diff..... = (F(B) - F(D)) / F(D) * 100

Remarque:
Les valeurs du chantier 008 ont été supprimée à cause de l'absence de prélévement de l'échantillon D.

LOI D'AJUSTEMENT:

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
F(D) F(B)	0.903	F(B) = H - M * ABS(F(D))	H = 0.4320 M = 0.9320	lin.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.
F'(D) F(B)	0.881	F(B) = -(H + M * ABS(F(D)) * L/E(b))	H = 11.4375 M = 7.3828	lin.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
F(D) F(B)	0.920	F(B) = H - M * LN[ABS(F(D))]	H = 35.9959 M = 18.1257	log.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.
F'(D) F(B)	0.904	F(B) = -(H + M * LN[ABS(F(D)) * L/E(b)])	H = 18.8682 M = 4.8489	log.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
F(D) F(B)	0.891	F(B) = -H * exp[M * ABS(F(D))]	H = 5.8637 M = 0.0563	exp.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.
F'(D) F(B)	0.892	F(B) = -H * exp[M * ABS(F(D)) * L/E(b)]	H = 11.8838 M = 0.4583	exp.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
F(D) F(B)	0.909	F(B) = -H * ABS(F(D))^M	H = 0.6780 M = 1.0981	puiss.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.
F'(D) F(B)	0.923	F(B) = -H * [ABS(F(D)) * L/E(b)]^M	H = 18.8569 M = 0.3033	puiss.	Les valeurs du chantier 008 ont été écartées.

La meilleure des lois obtenues est de type "puissance", qui tient compte de la teneur en liant, comme dans le cas de l'étape a). Notons également que nous obtenons une corrélation à peine moins bonne avec une loi de type "logarithmique", qui ne tient pas compte de la teneur en liant.

Etape c) - Mélange et pose de l'enrobé thermorégénéré

Essai: POINT DE FRAASS

Etape c): MELANGE ET POSE DE L'ENROBE THERMOREGENERE

	MELANGE			ENROBE THERMOREGENERE			
n° chant	a [%]	b [%]	F(1) [° C]	Régén (C) [%]	F'(1) [-]	F(C) [° C]	Diff [%]
001	96.10%	3.90%	-9	5.14%	-0.56	-14	52.9%
002	76.50%	23.50%	-11	0.00%	-0.11	-12	8.0%
003	76.20%	23.80%	-12	0.00%	-0.12	-13	5.0%
004	65.00%	35.00%	-9	5.13%	-0.53	-15	74.4%
005	71.00%	29.00%	-8	4.61%	-0.47	-15	79.6%
006	78.30%	21.70%	-18	2.54%	-0.64	-20	11.1%
007	68.40%	31.60%	-12	0.52%	-0.18	-18	56.1%
008	65.30%	34.70%	-14	1.75%	-0.40	-18	25.1%
009	84.50%	15.50%	-5	7.33%	-0.39	-12	158.9%
010	73.50%	26.50%	-13	1.71%	-0.36	-15	12.1%

STATISTIQUES

Min:	-18	0.00%	-0.64	-20	5.0%
Max:	-5	7.33%	-0.11	-12	158.9%
Moy:	-11	2.87%	-0.37	-15	48.3%
E-type:	3.724	2.536	0.185	2.700	47.974

Légendes:

C..... échantillon de bitume de l'enrobé thermorégénéré.
F(1)..... valeurs théoriques du mélange (a)-(b) sans liant régénérant.
ces valeurs sont calculées avec la formule suivante: $100*F = a*F(A) + b*F(B)$
F(A) et F(B) étant les points de Fraass des échantillons A et B.
Régén(C)... % de liant régénérant par rapport à la masse totale de liant théorique.

F'(1)..... = F(1) * (Régén(C) + 1)

Diff ..... = (F(C) - F(1)) / F(1) * 100

Remarque:
Pour le chantier 007, la valeur F(1) est calculée en tenant compte du bitume d'ajout (B 180/220). Celui-ci n'ayant pas fait l'objet d'un prélévement, la pénétration à 25 °C a été choisie arbitrairement à 200 [1/10 mm] et le point de Fraass calculé à partir de cette valeur.

LOI D'AJUSTEMENT:

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
Régén(C) Diff	0.839	Diff = H + M * Régén(C)	H = 2.7063 M = 15.8767	lin.	Aucune valeur n'a été écartée

Cas	Corrél	Loi d'ajustement	Param.	Type	Remarque
Régén(C) Diff	0.815	Diff = H * exp(M * Régén(C))	H = 9.8560 M = 0.3718	exp.	Aucune valeur n'a été écartée

La meilleure des lois obtenues est de type "linéaire", qui exprime la variation en % du point de Fraass entre la valeur théorique du mélange avant l'ajout de régénérant et la valeur Fraass déterminée sur le mélange final en fonction du pourcentage de liant régénérant.

Point de Fraass, sélection des lois d'évolution

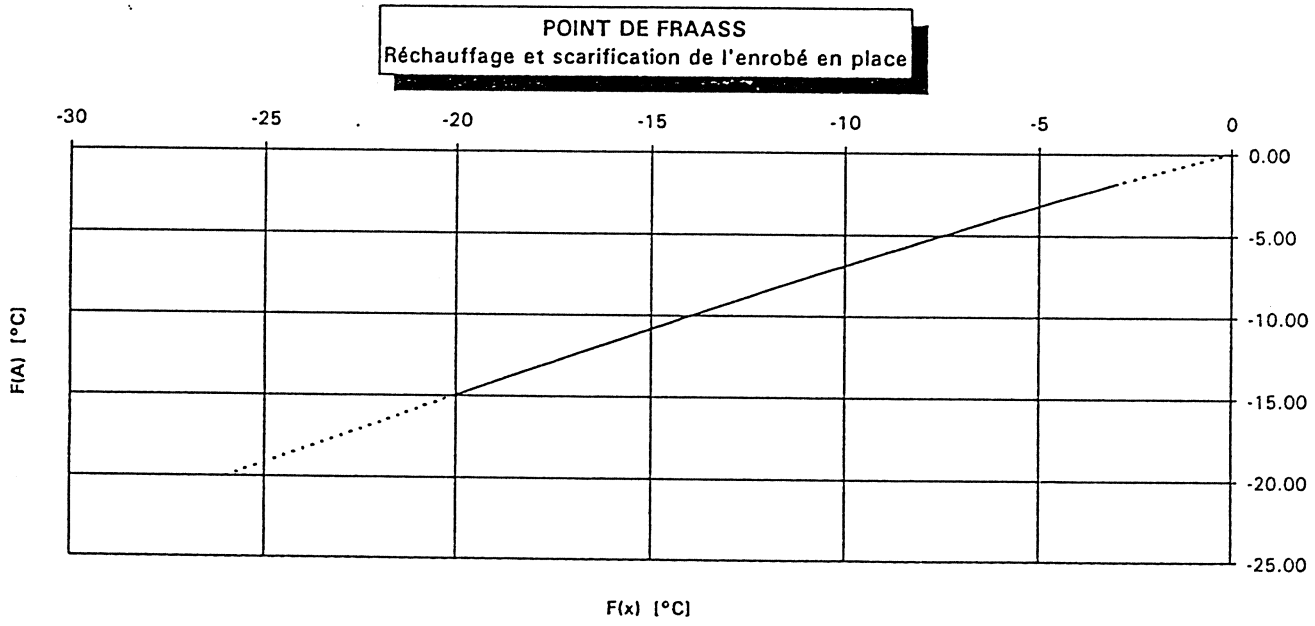
Etape a) - Réchauffage et scarification de l'enrobé en place

La meilleure des lois obtenues est de type "puissance" et est fonction de la teneur en liant. Le coefficient de régression (c) obtenu est de 0,975.

Toutefois, une loi de type "puissance", qui ne tient pas compte de la teneur en liant de l'enrobé réchauffé, a un coefficient de régression (c) de 0,957.

Au vu de la faible différence de précision et compte tenu que les lois retenues des autres paramètres de viscosité s'expriment sans tenir compte de la teneur en liant, nous retiendrons la loi suivante :

	Loi
étape a)	F (A) = H · abs (F (x)) ^M



Le trait continu représente la plage de valeurs obtenues pour les essais et les traitillés une extension de ces plages.

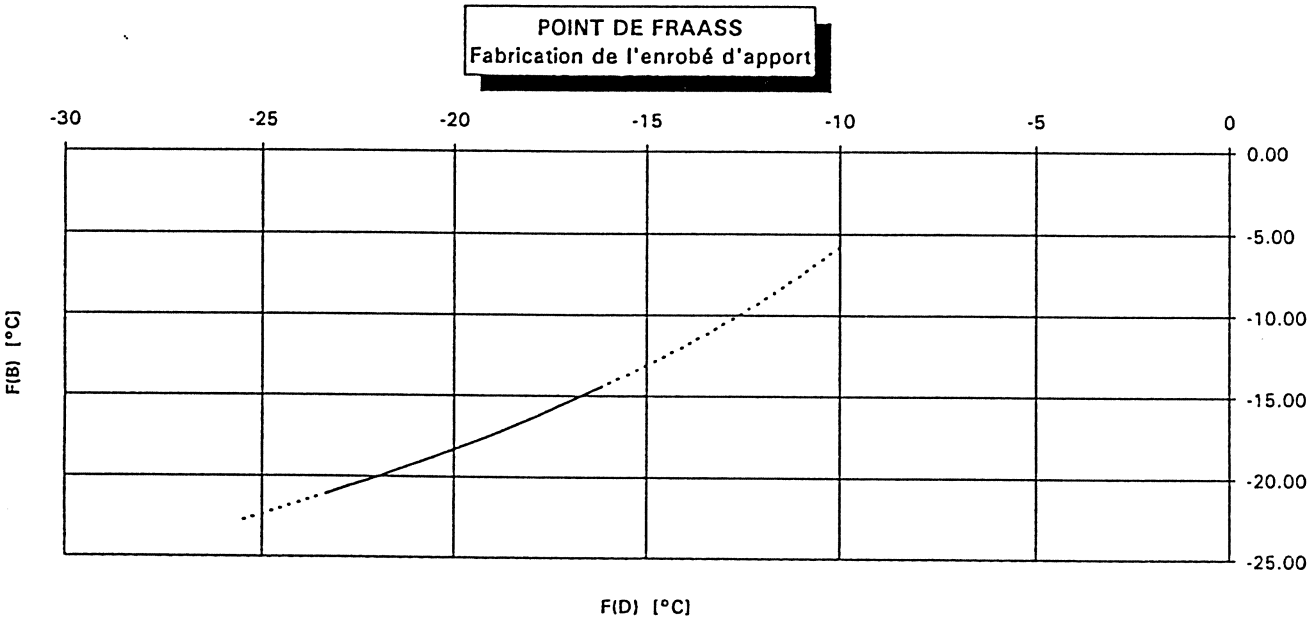
Etape b) - Fabrication de l'enrobé d'apport

La meilleure des lois obtenues est de type "puissance" et est fonction de la teneur en liant. Le coefficient de régression (c) obtenu est de 0,923.

Toutefois, une loi de type "logarithmique", qui ne tient pas compte de la teneur en liant de l'enrobé réchauffé, a un coefficient de régression (c) de 0,920.

Au vu de la faible différence de précision et compte tenu que les lois retenues des autres paramètres de viscosité s'expriment sans tenir compte de la teneur en liant, nous retiendrons la loi suivante :

	Loi
étape b)	F (B) = H - M · ln (abs (F (D))

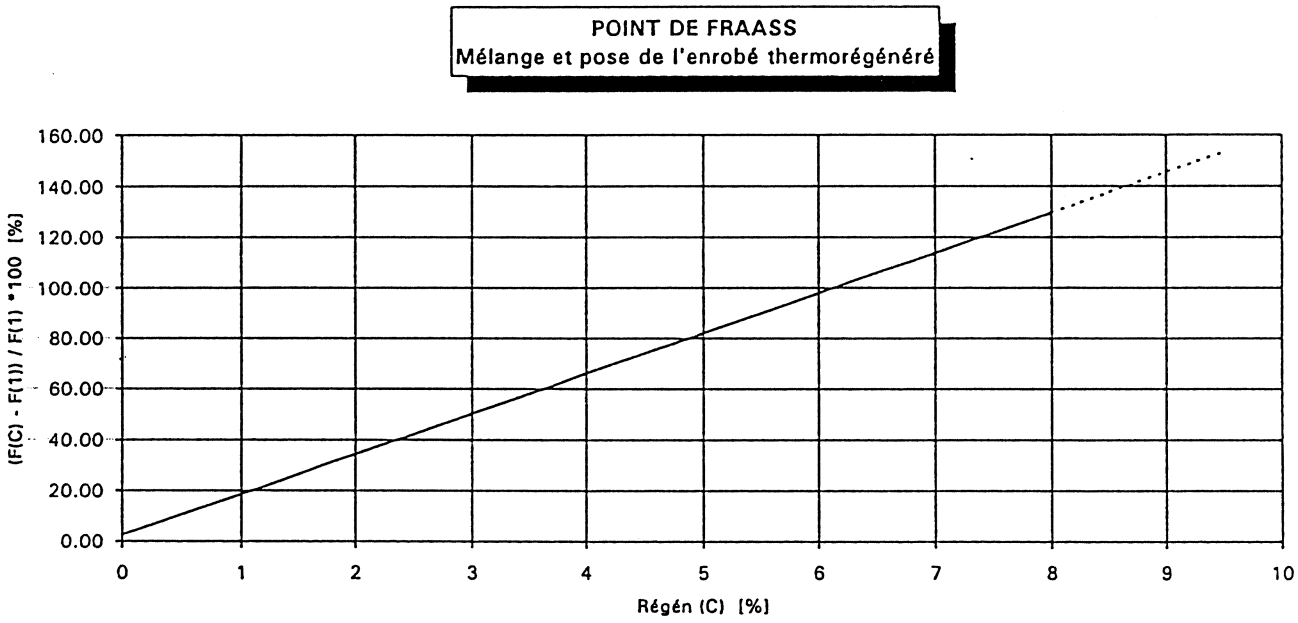


Le trait continu représente la plage de valeurs obtenues pour les essais et les traitillés une extension de ces plages.

Etape c) - Mélange et pose de l'enrobé thermorégénéré

La meilleure des lois obtenues est celle sélectionnée, soit :

	Loi
étape c)	Diff = H + M · Régén (c)



Le trait continu représente la plage de valeurs obtenues pour les essais et les traitillés une extension de ces plages.

5.4 Deuxième partie

Synthèse des résultats, analyse statistique et appréciation des autres paramètres ayant fait l'objet d'essais

Préambule

Dans cette deuxième partie, les paramètres analysés sont :

- la modification de masse à 163°C
- la teneur en cendres
- la ductilité
- la teneur en asphaltènes
- le désenrobage (selon EMPA).

Dans la pratique, les essais concernés ne sont que rarement pratiqués. Pour ces paramètres, la recherche de lois d'évolution possibles, travail long et fastidieux, nous a paru inutile.

Dès lors, nous nous sommes bornés dans cette partie à observer et commenter leur évolution générale dans les diverses phases de la thermorégénération et aussi entre le stade précédant la thermorégénération et le stade final.

5.4.1 Modification de masse à 163°C

Etape a): **Réchauffage et scarification de l'enrobé en place**

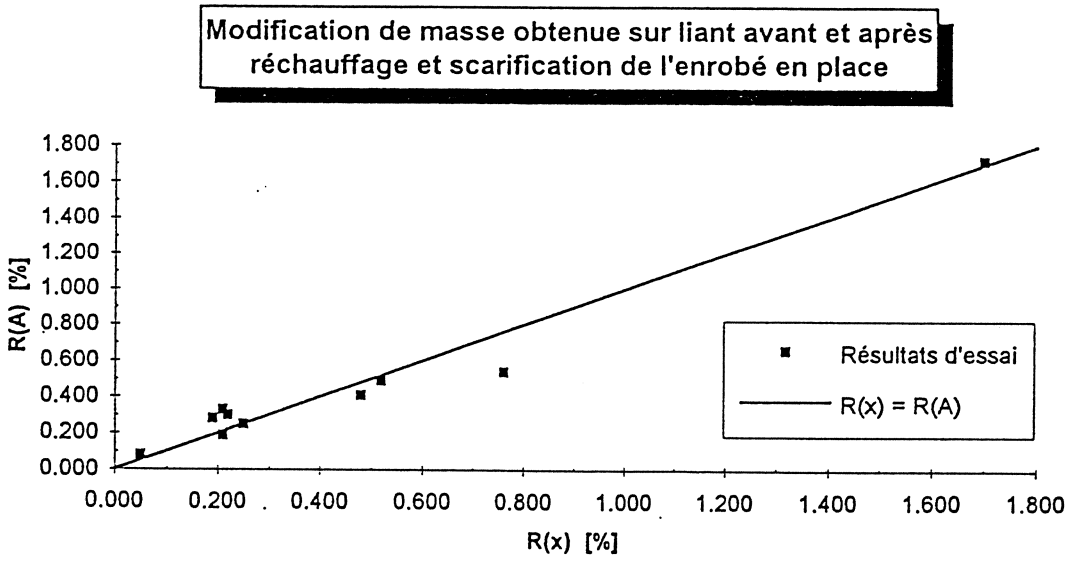
N° chantier	R(x) [%]		R(A) [%]
001	0.761	Réchauffage et scarification de l'enrobé en place.	0.540
002	0.519		0.490
003	0.050		0.080
004	0.210		0.190
005	0.190		0.280
006	0.220		0.300
007	1.700		1.720
008	0.210		0.330
009	0.480		0.410
010	0.250		0.250

Statistiques:

0.050	Minimum	0.080
1.700	Maximum	1.720
0.459	Moyenne	0.459
0.458	Ecart-type	0.440

Légendes:

x..... échantillon carotté de l'enrobé en place, avant réchauffage.
A..... échantillon prélevé sur l'enrobé en place, après réchauffage.
R..... résultats de l'essai de modification de masse à 163 °C.



Les résultats obtenus avant et après réchauffage sont dans l'ensemble identiques. Il n'y a donc lors de cette étape pas d'évolution apparente de ce paramètre.

Essai: MODIFICATION DE MASSE A 163 °C

Etape b): **Fabrication de l'enrobé d'apport**

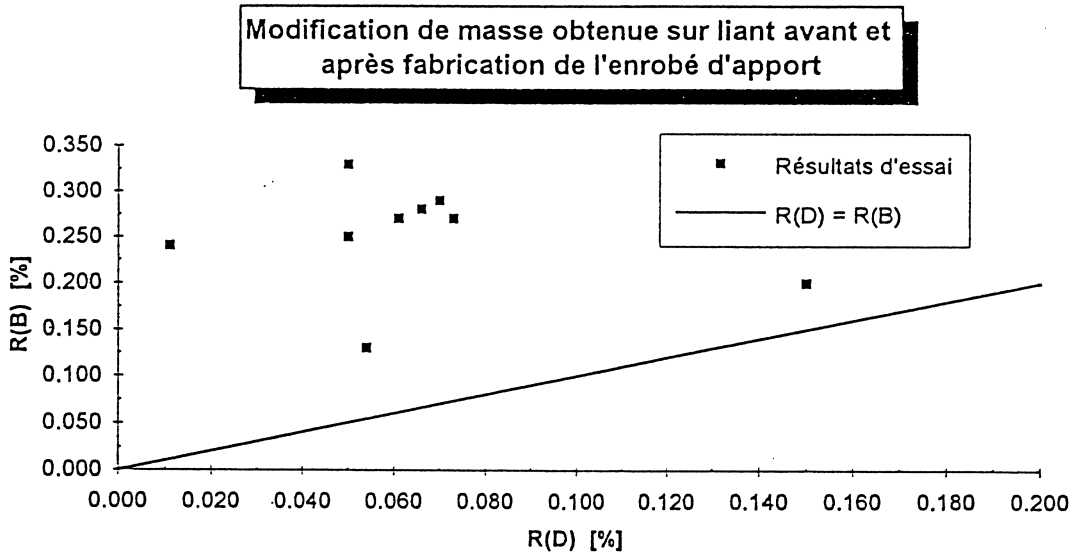
N° chantier	R(D) [%]		R(B) [%]
001	0.073		0.270
002	0.150		0.200
003	0.011		0.240
004	0.054		0.130
005	0.061	Fabrication de l'enrobé d'apport.	0.270
006	0.066		0.280
007	0.070		0.290
008	-		0.250
009	0.050		0.330
010	0.050		0.250

Statistiques:

0.011	**Minimum**	0.130
0.150	**Maximum**	0.330
0.065	**Moyenne**	**0.251**
0.035	**Ecart-type**	0.052

Légendes:

D..... échantillon de bitume de l'enrobé d'apport, avant fabrication.
B..... échantillon de bitume de l'enrobé d'apport, après fabrication.
R..... résultats de l'essai de modification de masse à 163 °C.



Evolution significative, lorsqu'elle est exprimée en %.
Toutefois, les valeurs absolues restent faibles et très inférieures à l'exigence de la norme.

Essai: MODIFICATION DE MASSE A 163 °C

Thermorégénération complète

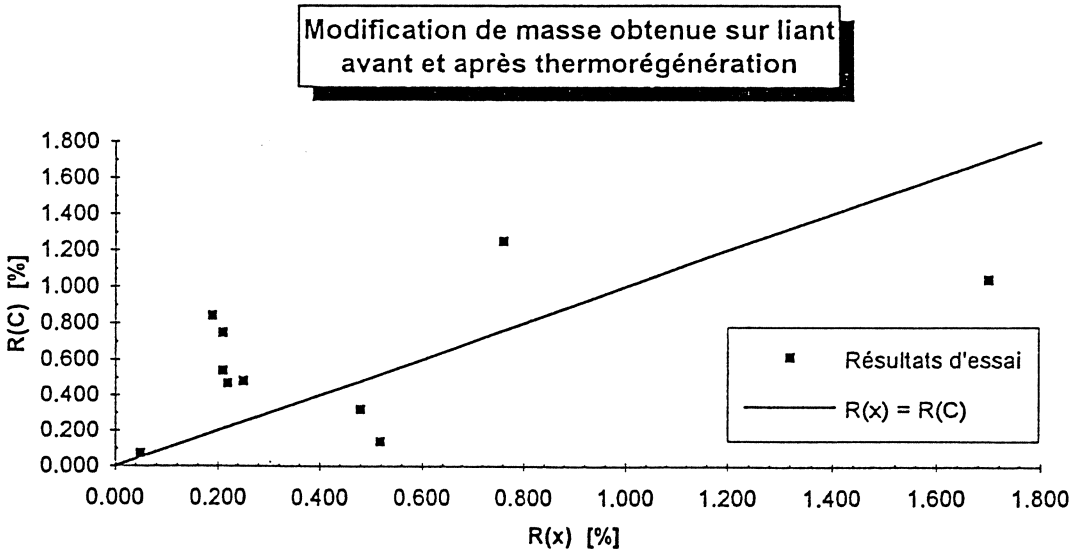
N° chantier	R(x) [%]		R(C) [%]
001	0.761	Thermorégénération complète	1.250
002	0.519		0.140
003	0.050		0.070
004	0.210		0.750
005	0.190		0.840
006	0.220		0.470
007	1.700		1.040
008	0.210		0.540
009	0.480		0.320
010	0.250		0.480

Statistiques:

0.050	Minimum	0.070
1.700	Maximum	1.250
0.459	Moyenne	0.590
0.458	Ecart-type	0.361

Légendes:

x..... échantillon carotté de l'enrobé en place, avant réchauffage.
C..... échantillon de bitume de l'enrobé thermorégénéré.



L'évolution sous l'action de la thermorégénération est faible. En moyenne, les résultats augmentent de quelques 10èmes de pourcent. Les valeurs demeurent très faibles.

5.4.2 Teneur en asphaltènes

Etape a): **Réchauffage et scarification de l'enrobé en place**

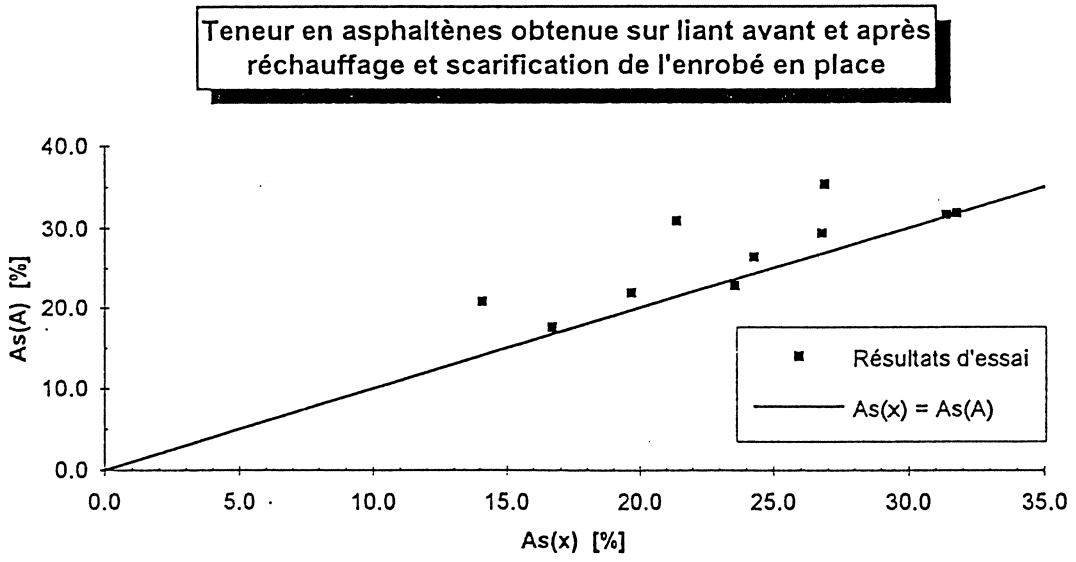
N° chantier	As(x) [%]		As(A) [%]
001	26.8	Réchauffage et scarification de l'enrobé en place.	29.4
002	24.3		26.4
003	23.6		22.8
004	31.8		31.9
005	31.4		31.7
006	14.1		20.8
007	21.4		30.9
008	19.7		21.9
009	26.9		35.4
010	16.7		17.6

Statistiques:

14.1	Minimum	17.6
31.8	Maximum	35.4
23.7	Moyenne	26.9
5.5	Ecart-type	5.6

Légendes:

x..... échantillon carotté de l'enrobé en place, avant réchauffage.
A..... échantillon prélevé sur l'enrobé en place, après réchauffage.
As..... résultats de l'essai de teneur en asphaltènes.



Dans cette étape nous mesurons une augmentation générale de la teneur en asphaltènes de l'ordre de 3 % en moyenne environ.

Essai: TENEUR EN ASPHALTENES

Etape b): **Fabrication de l'enrobé d'apport**

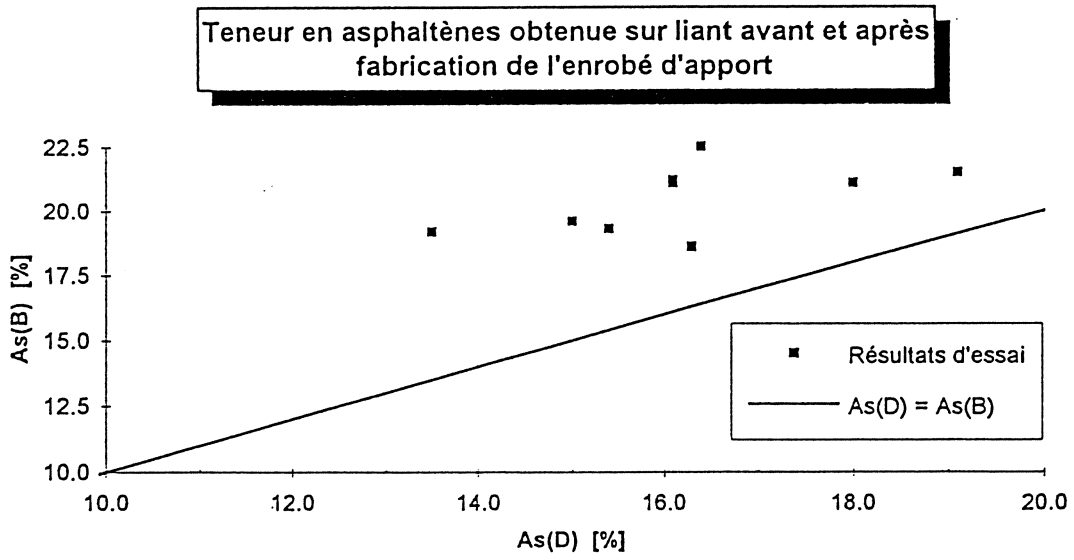
N° chantier	As(D) [%]		As(B) [%]
001	16.1	Fabrication de l'enrobé d'apport.	21.1
002	16.3		18.6
003	16.4		22.5
004	15.0		19.6
005	16.1		21.2
006	15.4		19.3
007	18.0		21.1
008	-		18.4
009	19.1		21.5
010	13.5		19.2

Statistiques:

13.5	**Minimum**	18.4
19.1	**Maximum**	22.5
16.2	**Moyenne**	**20.3**
1.5	**Ecart-type**	1.3

Légendes:

D..... échantillon de bitume de l'enrobé d'apport, avant fabrication.
B..... échantillon de bitume de l'enrobé d'apport, après fabrication.
As..... résultats de l'essai de teneur en asphaltènes.



Dans cette étape également, nous notons une augmentation de la teneur en asphaltènes de 4 % en moyenne.

Essai: TENEUR EN ASPHALTENES

Thermorégénération complète

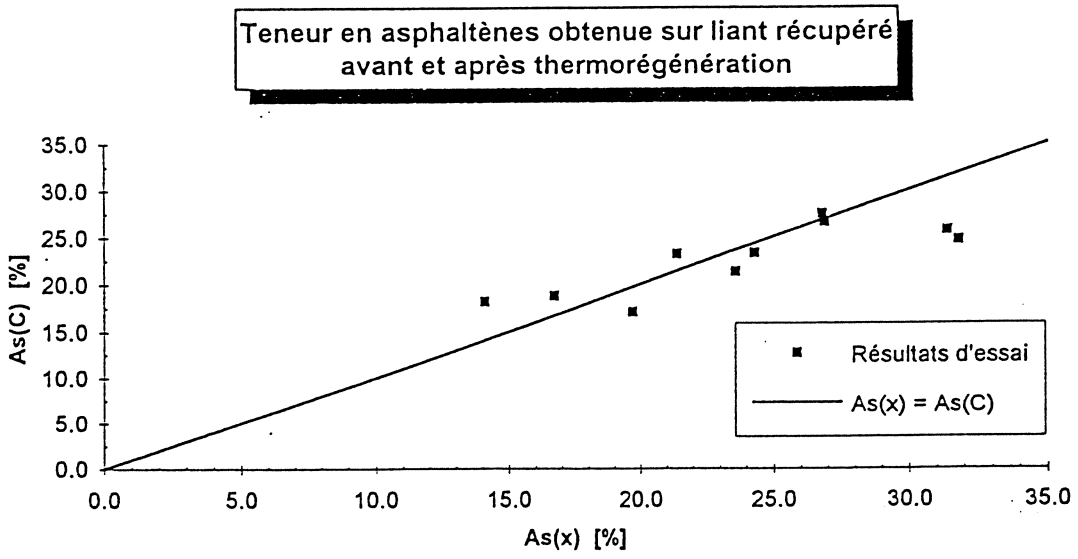
N° chantier	As(x) [%]		As(C) [%]
001	26.6	Thermorégénération complète	27.5
002	24.3		23.3
003	23.6		21.3
004	31.8		24.7
005	31.4		25.7
006	14.1		18.2
007	21.4		23.2
008	19.7		17.1
009	26.9		26.6
010	16.7		18.8

Statistiques:

14.1	Minimum	17.1
31.8	Maximum	27.5
23.7	Moyenne	22.6
5.5	Ecart-type	3.5

Légendes:

x..... échantillon carotté de l'enrobé en place, avant réchauffage.
C..... échantillon de bitume de l'enrobé thermorégénéré.
As..... résultats de l'essai de teneur en asphaltènes.



L'évolution de ce paramètre sous l'action de la thermorégénération se mesure par une légère diminution de 1 % environ de la moyenne des résultats. Compte tenu des observations faites aux étapes a) et b), la diminution de la teneur en asphaltènes est liée à l'ajout du liant régénérant.

5.4.3 Teneur en cendres

Etape a): **Réchauffage et scarification de l'enrobé en place**

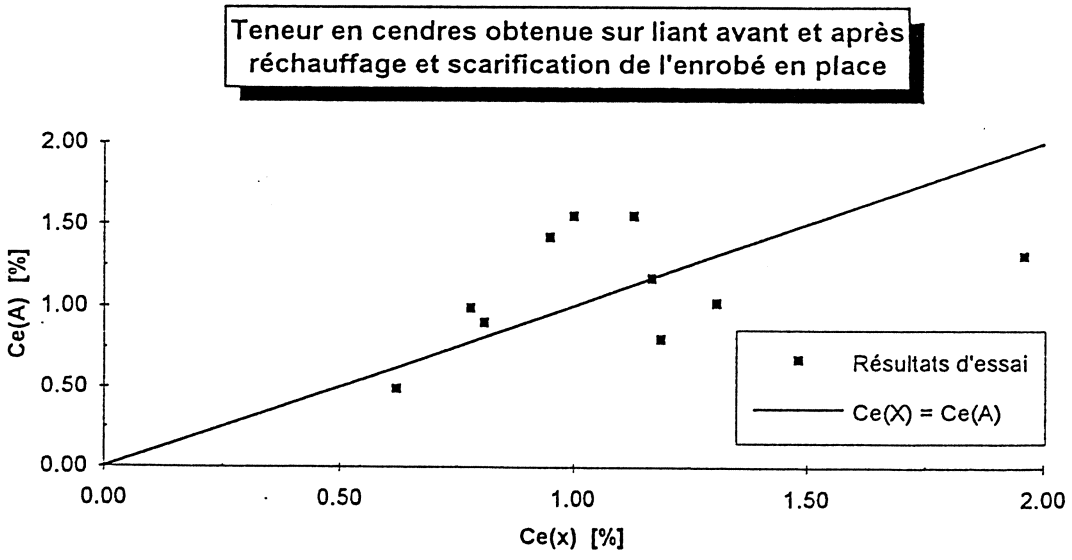
N° chantier	Ce(x) [%]		Ce(A) [%]
001	0.78	Réchauffage et scarification de l'enrobé en place.	0.99
002	1.19		0.80
003	0.62		0.49
004	0.81		0.90
005	1.31		1.02
006	1.96		1.31
007	1.00		1.55
008	1.13		1.55
009	0.95		1.42
010	1.17		1.17

Statistiques:

0.62	Minimum	0.49
1.96	Maximum	1.55
1.09	Moyenne	1.12
0.35	Ecart-type	0.33

Légendes:

x..... échantillon carotté de l'enrobé en place, avant réchauffage.
A..... échantillon prélevé sur l'enrobé en place, après réchauffage.
Ce..... résultats de l'essai de teneur en cendres.



Les résultats obtenus avant et après réchauffage sont dans l'ensemble identiques. Il n'y a donc lors de cette étape pas d'évolution apparente de ce paramètre.

Essai: TENEUR EN CENDRES

Etape b): **Fabrication de l'enrobé d'apport**

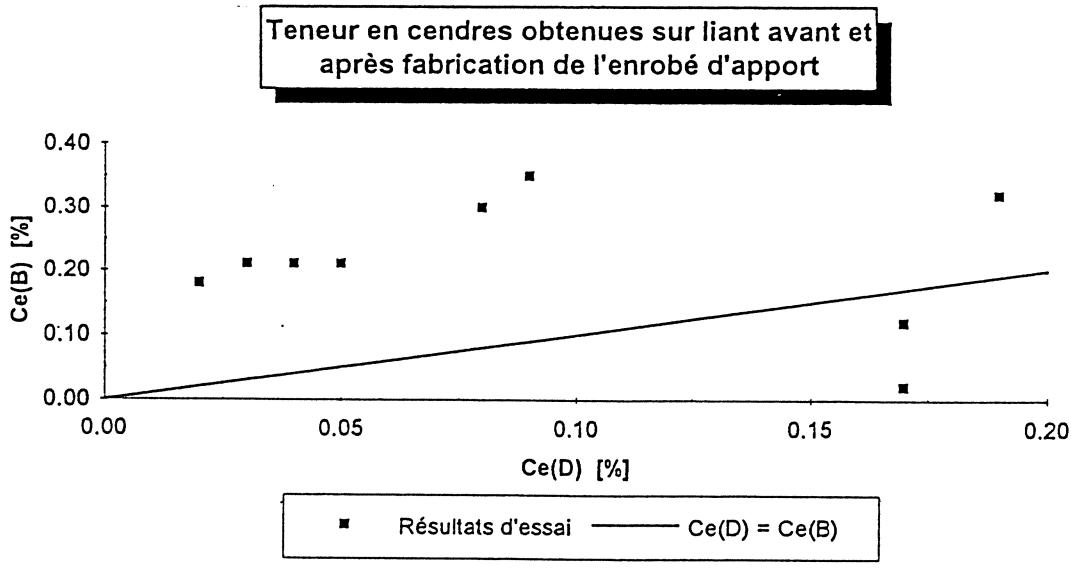
N° chantier	Ce(D) [%]		Ce(B) [%]
001	0.17		0.02
002	0.17		0.12
003	0.09		0.35
004	0.02		0.18
005	0.03	Fabrication de l'enrobé d'apport.	0.21
006	0.04		0.21
007	0.08		0.30
008	-		0.30
009	0.19		0.32
010	0.05		0.21

Statistiques:

0.02	Minimum	0.02
0.19	Maximum	0.35
0.09	Moyenne	0.22
0.06	Ecart-type	0.10

Légendes:

D..... échantillon de bitume de l'enrobé d'apport, avant fabrication.
B..... échantillon de bitume de l'enrobé d'apport, après fabrication.
Ce..... résultats de l'essai de teneur en cendres.



Les valeurs obtenues sur le liant récupéré de l'enrobé sont en moyenne deux fois plus élevées que celles obtenues sur le liant prélevé avant fabrication de l'enrobé. Les valeurs absolues sont toutefois très faibles et restent largement dans l'exigence de la norme.

Essai: TENEUR EN CENDRES

Thermorégénération complète

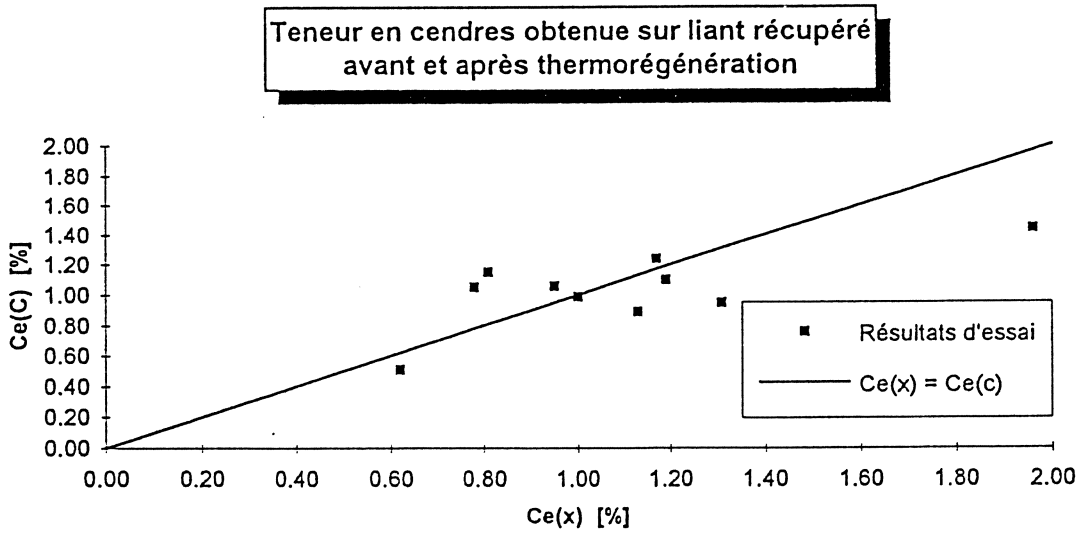
N° chantier	Ce(x) [%]		Ce(C) [%]
001	0.78	→ Thermorégénération complète →	1.05
002	1.19		1.10
003	0.62		0.51
004	0.81		1.15
005	1.31		0.95
006	1.96		1.44
007	1.00		0.99
008	1.13		0.89
009	0.95		1.06
010	1.17		1.24

Statistiques:

0.62	Minimum	0.51
1.96	Maximum	1.44
1.09	Moyenne	1.04
0.35	Ecart-type	0.23

Légendes:

x..... échantillon carotté de l'enrobé en place, avant réchauffage.
C..... échantillon de bitume de l'enrobé thermorégénéré.
Ce..... résultats de l'essai de teneur en cendres.



En moyenne, il n'y a pas d'évolution de la teneur en cendres sous l'action de la thermorégénération.

5.4.4 Désenrobage

Etape a): Réchauffage et scarification de l'enrobé en place

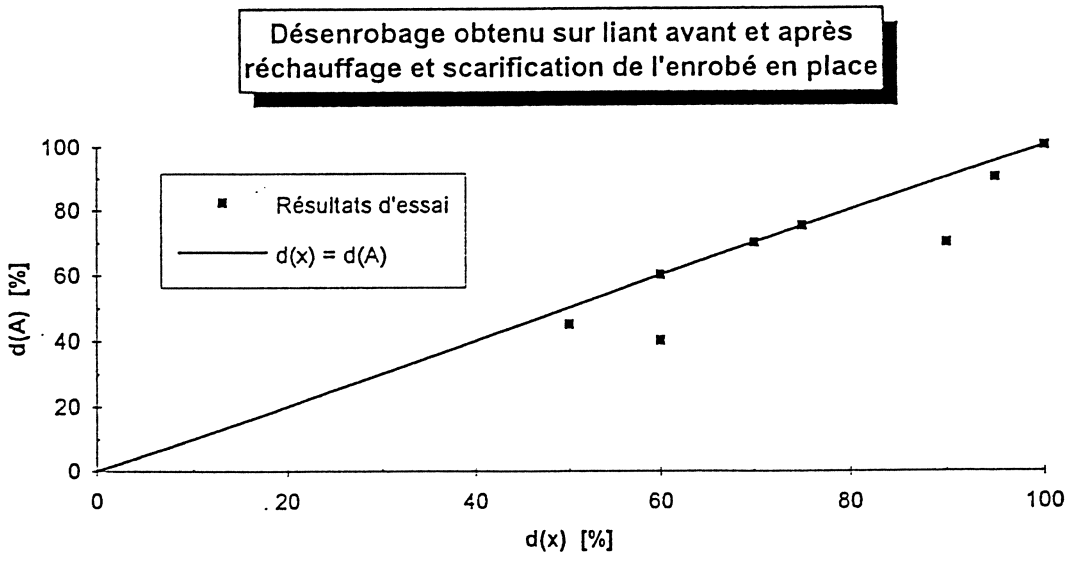
N° chantier	d(x) [%]		d(A) [%]
001	75	Réchauffage et scarification de l'enrobé en place.	75
002	60		60
003	60		40
004	95		90
005	95		90
006	70		70
007	90		70
008	50		45
009	100		100
010	75		75

Statistiques:

50	Minimum	40
100	Maximum	100
77	Moyenne	72
16	Ecart-type	18

Légendes:

x..... échantillon carotté de l'enrobé en place, avant réchauffage.
A..... échantillon prélevé sur l'enrobé en place, après réchauffage.
d..... résultats de l'essai de désenrobage (selon l'EMPA).



Les résultats obtenus avant et après réchauffage de l'enrobé en place sont à peu près équivalents.

Essai: DESENROBAGE

Etape b): **Fabrication de l'enrobé d'apport**

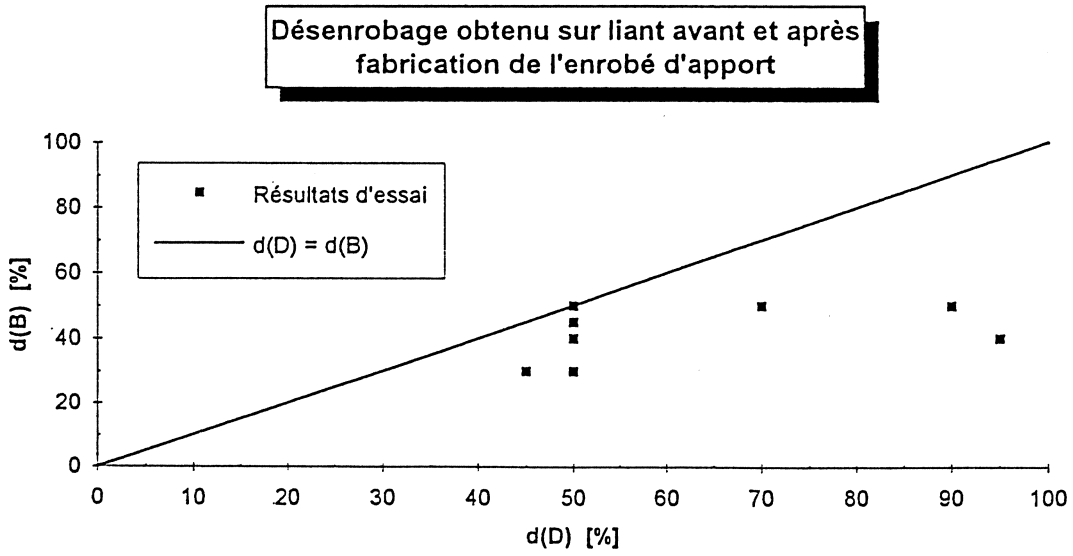
N° chantier	d(D) [%]		d(B) [%]
001	90	Fabrication de l'enrobé d'apport.	50
002	70		50
003	95		40
004	50		30
005	45		30
006	50		40
007	50		30
008	-		30
009	50		45
010	50		50

Statistiques:

45	Minimum	30
95	Maximum	50
61	Moyenne	40
18	Ecart-type	9

Légendes:

D..... échantillon de bitume de l'enrobé d'apport, avant fabrication.
B..... échantillon de bitume de l'enrobé d'apport, après fabrication.
d..... résultats de l'essai de désenrobage (selon l'EMPA).



Les résultats obtenus sur le liant récupéré de l'enrobé sont relativement constants, quelles que soient les valeurs mesurées sur le liant prélevé avant fabrication de l'enrobé, et plus faibles en moyenne.

Essai: DESENROBAGE

Thermorégénération complète

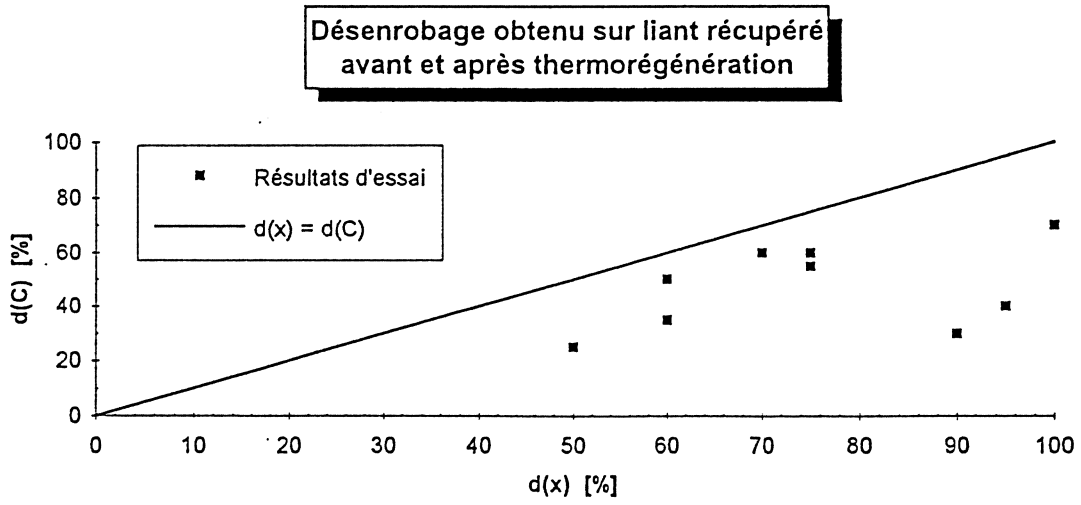
N° chantier	d(x) [%]		d(C) [%]
001	75	→ Thermorégénération complète →	55
002	60		50
003	60		35
004	95		40
005	95		40
006	70		60
007	90		30
008	50		25
009	100		70
010	75		60

Statistiques:

50	Minimum	25
100	Maximum	70
77	Moyenne	47
16	Ecart-type	14

Légendes:

x..... échantillon carotté de l'enrobé en place, avant réchauffage.
C..... échantillon de bitume de l'enrobé thermorégénéré.
d..... résultats de l'essai de désenrobage.



Les valeurs obtenues après thermorégénération sont en moyenne plus faibles qu'avant traitement, de 25 % environ.

5.4.5 Ductilité

Etape a): Réchauffage et scarification de l'enrobé en place

N° chantier	Du(x) [mm]		Du(A) [mm]
001	119		59
002	>1500		>1500
003	>1500		1283
004	67	Réchauffage et scarification de l'enrobé en place.	46
005	77		49
006	>1500		>1500
007	>1500		221
008	1185		1140
009	38		33
010	>1500		>1500

Statistiques:

38	Minimum	33
>1500	Maximum	>1500
-	Moyenne	-
-	Ecart-type	-

Légendes:

x..... échantillon carotté de l'enrobé en place, avant réchauffage.
A..... échantillon prélevé sur l'enrobé en place, après réchauffage.
Du..... résultats de l'essai de ductilité.

En moyenne, nous observons une légère diminution des résultats sur le liant récupéré après réchauffage et scarification.

Essai: DUCTILITE

Etape b): **Fabrication de l'enrobé d'apport**

N° chantier	Du(D) [mm]		Du(B) [mm]
001	>1500	Fabrication de l'enrobé d'apport.	>1500
002	>1500		>1500
003	>1500		>1500
004	>1500		>1500
005	>1500		>1500
006	>1500		>1500
007	>1500		>1500
008	-		>1500
009	>1500		>1500
010	>1500		>1500

Statistiques:

>1500	Minimum	>1500
>1500	Maximum	>1500
>1500	Moyenne	>1500
-	Ecart-type	-

Légendes:

D..... échantillon de bitume de l'enrobé d'apport, avant fabrication.
B..... échantillon de bitume de l'enrobé d'apport, après fabrication.
Du..... résultats de l'essai de ductilité.

Aucune modification de la ductilité occasionnée par la fabrication de l'enrobé n'a été observée.

Essai: DUCTILITE

Thermorégénération complète

N° chantier	Du(x) [mm]		Du(C) [mm]
001	119	Thermorégénération complète	318
002	>1500		>1500
003	>1500		>1500
004	67		>1500
005	77		>1500
006	>1500		>1500
007	>1500		>1500
008	1185		>1500
009	38		77
010	>1500		>1500

Statistiques:

38	Minimum	77
>1500	Maximum	>1500
-	Moyenne	-
-	Ecart-type	-

Légendes:

x..... échantillon carotté de l'enrobé en place, avant réchauffage.
C..... échantillon de bitume de l'enrobé thermorégénéré.
Du..... résultats de l'essai de désenrobage.

Amélioration notable des résultats occasionnée par la thermorégénération concernant ce paramètre. Tous les chantiers montrent une amélioration de la ductilité du bitume final, deux seulement restant en deçà des exigences des normes.

5.4.6 Indice de pénétration

Essai: INDICE DE PENETRATION

Etape a): Réchauffage et scarification de l'enrobé en place

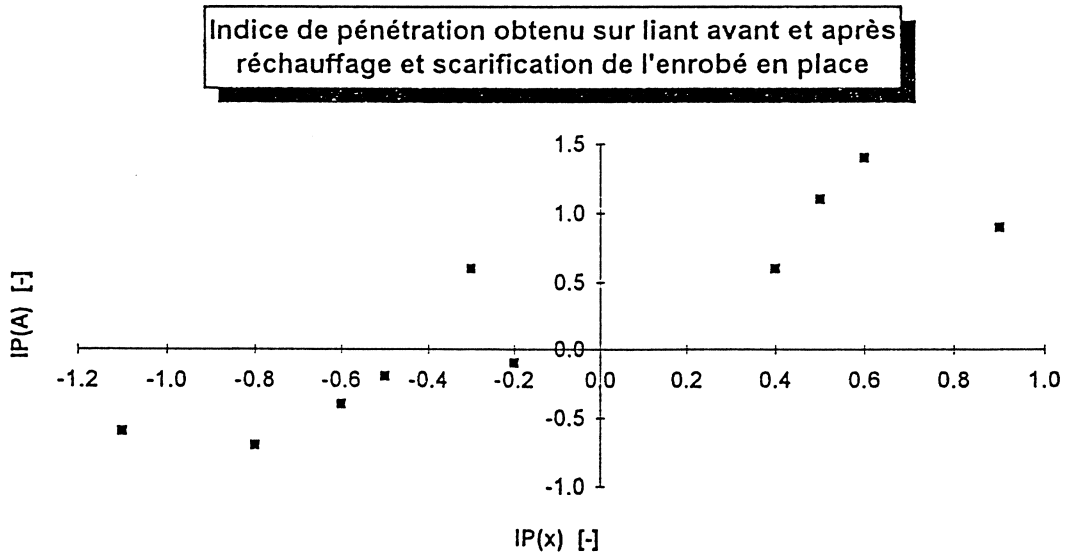
N° chantier	IP(x) [-]		IP(A) [-]
001	0.4	Réchauffage et scarification de l'enrobé en place.	0.6
002	-0.2		-0.1
003	-0.5		-0.2
004	0.5		1.1
005	0.6		1.4
006	-1.1		-0.6
007	-0.3		0.6
008	-0.6		-0.4
009	0.9		0.9
010	-0.8		-0.7

Statistiques:

-1.1	Minimum	-0.7
0.9	Maximum	1.4
-0.1	Moyenne	0.3
0.64	Ecart-type	0.71

Légendes:

x..... échantillon carotté de l'enrobé en place, avant réchauffage.
A..... échantillon prélevé sur l'enrobé en place, après réchauffage.
IP..... indice de pénétration.



Le réchauffage et la scarification de l'enrobé en place entraîne très légèrement une diminution de la susceptibilité du liant (IP plus grand). Cependant, la dispersion des résultats est importante.

Essai: INDICE DE PENETRATION

Etape b): **Fabrication de l'enrobé d'apport**

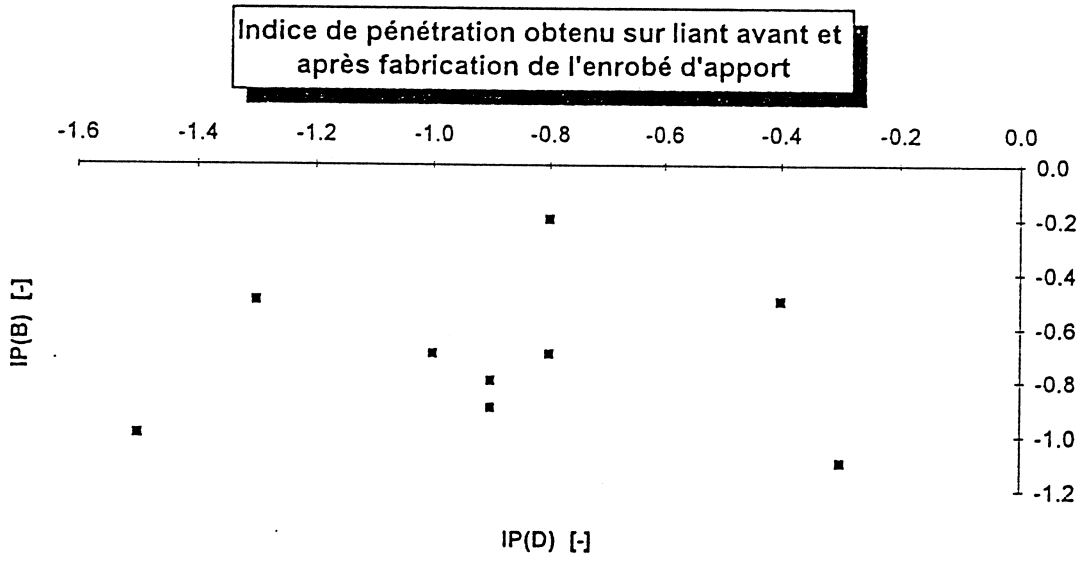
N° chantier	IP(D) [-]		IP(B) [-]
001	-0.8	Fabrication de l'enrobé d'apport.	-0.2
002	-1.5		-1.0
003	-1.0		-0.7
004	-0.9		-0.9
005	-0.9		-0.8
006	-0.8		-0.7
007	-1.3		-0.5
008	-		-1.3
009	-0.4		-0.5
010	-0.3		-1.1

Statistiques:

-1.5	Minimum	-1.3
-0.3	Maximum	-0.2
-0.9	Moyenne	-0.8
0.36	Ecart-type	0.31

Légendes:

D..... échantillon de bitume de l'enrobé d'apport, avant fabrication.
B..... échantillon de bitume de l'enrobé d'apport, après fabrication.
IP..... indice de pénétration.



La dispersion des résultats est telle qu'aucune tendance n'est observable sur la susceptibilité du liant.

Essai: INDICE DE PENETRATRION

Thermorégénération complète

N° chantier	Ip(x) [-]		Ip(C) [-]	Diff [-]
001	0.4	thermo-régénération complète	0.3	-0.08
002	-0.2		-0.5	-0.24
003	-0.5		-0.6	-0.17
004	0.5		-0.2	-0.73
005	0.6		0.1	-0.53
006	-1.1		-0.8	0.31
007	-0.3		-0.4	-0.13
008	-0.6		-1.0	-0.46
009	0.9		0.5	-0.41
010	-0.8		-0.6	0.23

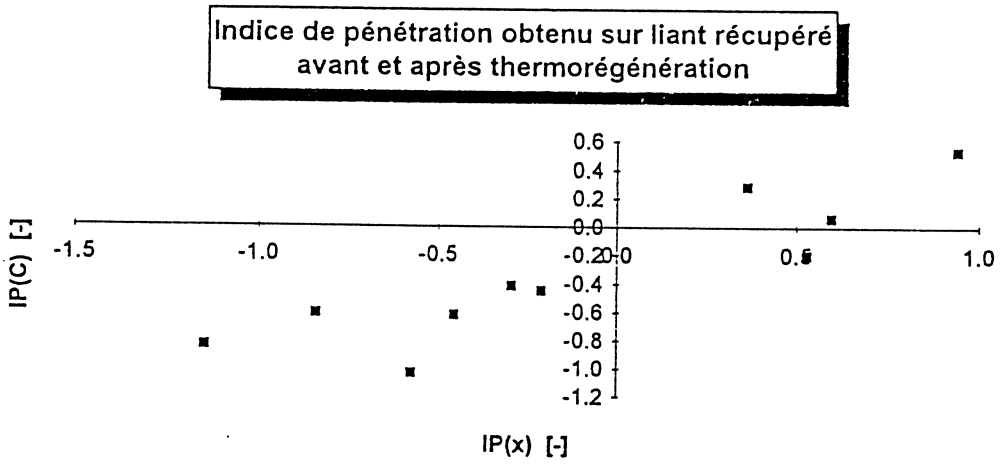
Statistiques:

-1.149	Minimum	-1.036	-0.729
0.941	Maximum	0.536	0.308
-0.109	Moyenne	-0.330	-0.221
0.650	Ecart-type	0.474	0.310

Légendes:

x..... échantillon carotté de l'enrobé en place, avant réchauffage.
A..... échantillon prélevé sur l'enrobé en place, après réchauffage.
Ip..... indice de pénétration de l'échantillon concerné.

Diff..... = Ip(C) - Ip(x)



En moyenne, un liant après thermorégénération est plus susceptible (IP plus petit) qu'avant traitement.

6. COMMENTAIRES

Préambule

En préambule à ce chapitre, il nous paraît nécessaire de rappeler les objectifs de l'étude, l'étendue des investigations et les particularités auxquelles nous nous sommes trouvés confrontés.

Il s'agissait pour nous d'étudier l'évolution des caractéristiques intrinsèques des bitumes dans les diverses phases de traitement de bétons bitumineux soumis à un traitement par régénération.

L'étude se limitait aux bitumes et à la thermorégénération in situ d'enrobés sans polymères et sans ajouts de polymères.

Après enquête auprès de l'ensemble des départements des travaux publics cantonaux, nous avons sélectionné 10 chantiers qui se voulaient représentatifs, dans leur taille et leur répartition géographique.

Bien qu'attribués à différentes entreprises, nous avons constaté, en fait, que les chantiers sélectionnés ont été traités à l'exception d'un seul, par la même entreprise et la même machine. L'autre entreprise a utilisé une machine du même constructeur mais d'un modèle différent.

Pour les 9 chantiers réalisés par la même machine, la puissance de chauffe a été identique.

Pour l'ensemble des chantiers, 1 seul liant régénérant a été utilisé.

6.1 Lois d'évolution

La synthèse des résultats obtenus par l'ensemble des essais pratiqués sur les échantillons prélevés lors des diverses phases de la thermorégénération figure dans le tableau ci-après.

Cela nous permet ainsi d'apprécier globalement l'évolution de chacune des caractéristiques des liants dans toutes les étapes d'une thermorégénération in situ.

Dans le tableau suivant, nous avons regroupé les lois d'ajustement sélectionnées caractérisant l'évolution des paramètres dans les diverses phases de la thermorégénération. Les paramètres concernés sont ceux liés à la viscosité des bitumes et qu'Heukelom a réussi à regrouper sur un abaque.

Tableau de synthèse des résultats d'analyse

Essai:	Statistiques	Ech. x	Etape a	Ech. A	Diff [%]	Ech. D	Etape b	Ech. B	Diff [%]	Ech. 1	Etape c	Ech. C	Diff [%]	Globalement: x	C	Diff [u]
Pénétration à 5°C	minimum:	4	[1/10mm]	2		11	[1/10mm]	7		3	[1/10mm]	5		4	5	
	maximum:	11	[1/10mm]	7		18	[1/10mm]	13		7	[1/10mm]	13		11	13	
	moyenne:	6	[1/10mm]	5	-17	15	[1/10mm]	10	-33	6	[1/10mm]	9	50	6	9	+3
Pénétration à 15°C	minimum:	8	[1/10mm]	5		27	[1/10mm]	16		6	[1/10mm]	11		8	11	
	maximum:	29	[1/10mm]	16		51	[1/10mm]	31		19	[1/10mm]	32		29	32	
	moyenne:	15	[1/10mm]	11	-27	43	[1/10mm]	25	-42	14	[1/10mm]	21	50	15	21	+6
Pénétration à 25°C	minimum:	15	[1/10mm]	12		74	[1/10mm]	39		16	[1/10mm]	25		15	25	
	maximum:	77	[1/10mm]	43		161	[1/10mm]	83		48	[1/10mm]	87		77	87	
	moyenne:	37	[1/10mm]	27	-27	133	[1/10mm]	66	-50	34	[1/10mm]	50	47	37	50	+13
Viscosité à 60°C	minimum:	136	[Pa*s]	483		38	[Pa*s]	114		375	[Pa*s]	140		136	140	
	maximum:	19971	[Pa*s]	31700		123	[Pa*s]	525		15092	[Pa*s]	4153		19971	4153	
	moyenne:	4341	[Pa*s]	10204	135	66	[Pa*s]	229	247	3567	[Pa*s]	932	-74	4341	932	-3409
Viscosité à 130°C	minimum:	0.335	[Pa*s]	0.547		0.216	[Pa*s]	0.343		0.505	[Pa*s]	0.347		0.335	0.347	
	maximum:	2.937	[Pa*s]	5.805		0.391	[Pa*s]	0.662		2.828	[Pa*s]	1.333		2.937	1.333	
	moyenne:	1.362	[Pa*s]	2.194	61.087	0.282	[Pa*s]	0.467	65.603	1.345	[Pa*s]	0.739	-45.056	1.362	0.739	-0.623
Température	minimum:	46.2	[°C]	54.0		31.1	[°C]	46.2		52.6	[°C]	46.1		46.2	46.1	
anneau - bille	maximum:	74.4	[°C]	78.6		47.9	[°C]	56.5		72.4	[°C]	65.6		74.4	65.6	
	moyenne:	59.7	[°C]	64.9	8.7	42.3	[°C]	49.4	16.8	60.6	[°C]	54.2	-10.6	59.7	54.2	-5.5
Détermination	minimum:	-20	[°C]	-18		-23	[°C]	-20		-18	[°C]	-20		-20	-20	
du point de Fraass	maximum:	-3	[°C]	-2		-16	[°C]	-13		-5	[°C]	-12		-3	-12	
	moyenne:	-12	[°C]	-9	-25	-20	[°C]	-18	-10	-11	[°C]	-15	36	-12	-15	-3.0
Modification de	minimum:	0.050	[%]	0.080		0.011	[%]	0.130		0.104	[%]	0.070		0.050	0.070	
masse à 163°C	maximum:	1.700	[%]	1.720		0.150	[%]	0.330		1.000	[%]	1.250		1.700	1.250	
	moyenne:	0.459	[%]	0.459	0.000	0.065	[%]	0.251	286.154	0.371	[%]	0.590	59.030	0.459	0.590	+0.131
Teneur en	minimum:	14.1	[%]	17.6		13.5	[%]	18.4		18.0	[%]	17.1		14.1	17.1	
Asphaltènes	maximum:	31.8	[%]	35.4		19.1	[%]	22.5		33.2	[%]	27.5		31.8	27.5	
	moyenne:	23.7	[%]	26.9	13.5	16.2	[%]	20.3	25.3	23.5	[%]	22.6	-3.8	23.7	22.6	-1.1
Teneur en Cendres	minimum:	0.62	[%]	0.49		0.02	[%]	0.02		0.46	[%]	0.51		0.62	0.51	
	maximum:	1.96	[%]	1.55		0.19	[%]	0.35		1.25	[%]	1.44		1.96	1.44	
	moyenne:	1.09	[%]	1.12	2.75	0.09	[%]	0.22	144.44	0.90	[%]	1.04	15.56	1.09	1.04	-0.05
Désenrobage	minimum:	50	[%]	40		75	[%]	30		40	[%]	25		50	25	
(selon l'EMPA)	maximum:	100	[%]	100		95	[%]	50		91	[%]	70		100	70	
	moyenne:	77	[%]	72	-6	61	[%]	40	-34	63	[%]	47	-25	77	47	-30
Ductilité	minimum:	58	[mm]	33		>1500	[mm]	>1500		-	[mm]	>1500		58	>1500	
	maximum:	>1500	[mm]	>1500		>1500	[mm]	>1500		-	[mm]	>1500		>1500	>1500	
	moyenne:	-	[mm]	-	-	>1500	[mm]	>1500	-	-	[mm]	>1500	-	-	>1500	-

Etape a) : Réchauffage et scarification de l'enrobé en place
Etape b) : Fabrication de l'enrobé d'apport
Etape c) : Mélange et pose des enrobés thermorégénérés

TABLEAU DE SYNTHESE DES LOIS D'EVOLUTION

	Etape a				Etape b				Etape c			
Essai	c	Loi	Param.	Modèle	c	Loi	Param.	Modèle	c	Loi	Param.	Modèle
Fraass	0.96	F(A) = H * abs(F(x))^M	H = - 0.5275 M = 1.1159	puiss.	0.92	F(B) = H - M * ln(abs(F(D)))	H = 35.9959 M = 18.1257	puiss.	0.84	Diff [%] = -[H + M * Régén(C)]	H = 2.7063 M = 15.8767	lin.
Péné 5 °C	-	pas de loi d'ajustement	-	-	0.99	P(B) = H + M * P(D)	H =3.9950 M = 0.4710	lin.	-	pas de loi d'ajustement	-	-
Péné 15 °C	0.90	P(A) = H + M * ln(P(x))	H = -11.8426 M = 8.8395	log.	0.99	P(B) = H + M * P(D)	H =3.9950 M = 0.4710	lin.	0.96	P(C) = H + M * P(2)	H = 0.0047 M = 1.1423	lin.
Péné 25 °C	0.96	P(A) = H + M * ln(P(x))	H = -46.7720 M = 21.1614	log.	0.99	P(B) = H + M * P(D)	H =3.9950 M = 0.4710	lin.	0.96	P(C) = H + M * P(2)	H = 0.0047 M = 1.1423	lin.
A et B	0.94	T(A) = H + M * T(x)	H = 4.3702 M = 1.0131	lin.	0.95	T(B) = H + M * T(D)	H = 0.2432 M = 1.1620	lin.	-	pas de loi d'ajustement	-	-
Visco 60 °C	0.91	V(A) = H + M * V(x)	H = 2068.86 M = 1.8740	lin.	0.94	V(B) = H + M * V(D)	H = -56.8624 M = 4.3143	lin.	0.92	Diff [%] = H * (Régén(C) +1)^M	H = -27.8051 M = 0.5713	puiss.
Visco 130 °C	0.98	V(A) = H + M * V(x)	H = -0.2762 M = 1.8139	lin.	0.98	V(B) = H + M * V(D)	H = -0.0507 M = 1.8346	lin.	0.96	Diff [%] = H * (Régén(C) +1)^M	H = -14.2830 M = 0.7122	puiss.

Légendes:

- c : coefficient de corrélation
- Diff : (V(C)-V(1)) / V(1) * 100 ou (F(C)-F(1)) / F(1) * 100
- x : bitume de l'échantillon carotté sur l'enrobé en place, avant réchauffage
- A : bitume de l'échantillon carotté sur l'enrobé en place, après scarification
- B : bitume de l'enrobé d'apport, avant fabrication
- C : liant régénérant
- D : bitume de l'enrobé d'apport, après fabrication
- H : ordonnée à l'origine de la cuorbe d'ajustement
- M : pente de la courbe d'ajustement
- (1) : valeur théorique du mélange sans régénérant
- (2) : valeur théorique du mélange final (avec régénérant)

Etape a): Réchauffage et scarification de l'enrobé en place.
Etape b): Fabrication de l'enrobé d'apport.
Etape c): Mélange et pose de l'enrobé thermorégénéré.

- Il nous a été possible de déterminer des lois d'évolution à divers stades du traitement, soit :

  a) réchauffage et scarification de l'enrobé en place
  b) fabrication de l'enrobé d'apport
  c) mélange des enrobés et du régénérant, mise en oeuvre.

  Pour les paramètres liés à la viscosité du liant et qu'Heukelom a regroupé sur un seul abaque, soit :

  - point de Fraass
  - pénétration
  - température anneau et bille
  - viscosité dynamique.

  à l'exception de la pénétration à 5°C pour les étapes a) et c) et de la température anneau et bille pour l'étape c).

  Les coefficients de régression (c) obtenus sont tous supérieurs à 0,80 (limites au-dessus de laquelle nous jugeons une corrélation comme satisfaisante), voire à 3 exceptions près, supérieurs à 0,9.

  Le fait que nous n'ayons pas obtenu de coefficients de régression satisfaisants pour l'évolution de la pénétration à 5°C aux étapes a) et c) résultent probablement de l'imprécision des résultats (arrondis à l'unité) eut égard à leur ordre de grandeur.

- Aucune loi d'évolution ne fait appel à l'épaisseur de scarification, ni à la teneur en liant, à l'exception du point de Fraass pour lequel cependant nous avons obtenu des lois d'évolution sans ce paramètre avec un bon coefficient de régression.

  Il est donc possible, pour les paramètres concernés, de déterminer leur valeur aux divers stades de la thermorégénération, en fonction des caractéristiques suivantes :

  - valeur initiale avant réchauffage
  - valeur initiale, bitumes de l'enrobé d'apport, avant fabrication
  - pourcentage de liant provenant de l'enrobé scarifié et de l'enrobé d'apport dans le mélange final
  - pourcentage de liant régénérant.

  Pour la phase b), les lois d'évolution de la pénétration aux différentes températures sont relativement semblables, ce qui nous a permis de déterminer une seule loi d'évolution pour toutes les températures de pénétration avec un coefficient de régression tout à fait acceptable.

  Pour la phase c), les pénétrations finales théoriques calculées en fonction des valeurs des liants des enrobés mélangés, de leur proportion et du dosage en régénérant, sont équivalentes à celles mesurées sur l'enrobé traité, prélevé après sa mise en oeuvre.

6.2 Autres paramètres mesurés

Les autres essais réalisés :

- modification de masse à 163° C
- teneur en cendres
- ductilité
- teneur en asphaltènes
- désenrobage EMPA

sont rarement effectués au contraire de ceux cités au chapitre précédent. C'est pourquoi nous n'avons pas cherché à déterminer les lois d'évolution éventuelles, travail long et fastidieux. Nous nous sommes donc bornés à apprécier l'évolution moyenne des résultats.

Evolution des résultats moyens et appréciation

Rappel : étape a) : réchauffage et scarification de l'enrobé en place
étape b) : fabrication de l'enrobé d'apport
globalement : avant et après thermorégénération (y compris action du régénérant)

	Etape a)			Etape b)			Globalement		
	avant 1)	après 2)	appréciation	avant 3)	après 4)	appréciation	avant 5)	après 6)	appréciation
Modification masse 163° C	0.46	0.46	→	0.065	0.25	↗	0.46	0.59	⇗
Cendres	1.09	1.12	→	0.09	0.22	↗	1.09	1.04	→
Ductilité	--	--	↘	> 1500	> 1500	--	--	--	↗
Asphaltènes	23.7	26.9	↗	16.2	20.3	↗	23.7	22.6	⇘
Désenrobage % sur enrobé	77	72	→	61	40	↘	77	47	↘
IP	-0.1	+0.3	↗	-0.9	-0.8	→	-0.1	-0.3	⇘

Légendes : flèches pleines : tendance significative
flèches traitillées : tendance non significative

1) Caractéristiques du liant récupéré de l'enrobé en place
2) Caractéristiques du liant récupéré de l'enrobé réchauffé et scarifié
3) Caractéristiques du liant de l'enrobé d'apport avant fabrication
4) Caractéristiques du liant de l'enrobé d'apport après fabrication
5) Caractéristiques du liant récupéré de l'enrobé en place
6) Caractéristiques du liant récupéré de l'enrobé final (thermorégénéré)

L'augmentation moyenne de la ductilité apparaît comme le paramètre évoluant positivement.

Par contre, la diminution appréciable de surface enrobée dans l'essai de désenrobage nous amène à recommander l'ajout d'un dope lors du traitement.

7. CONCLUSIONS

La présente recherche nous a permis de mettre en évidence des lois d'évolution aux différentes étapes de la thermorégénération, à savoir :

- étape a) réchauffage et scarification
- étape b) fabrication de l'enrobé d'apport
- étape c) malaxage des enrobés et du régénérant, mise en oeuvre.

Pour la plupart, les paramètres liés à la viscosité du liant qu'Heukelom a regroupé sur un seul abaque, soit :

- Fraass
- pénétration à 15°C et 25°C
- viscosité dynamique à 60°C et 130°C

sont présentés sous forme d'abaques à la fin des conclusions.

Aucune des lois ne fait appel à l'épaisseur d'enrobé scarifié, ni à la teneur en liant, ni aux températures, pour autant que celles-ci soient conformes aux prescriptions des normes en vigueur (ce qui est le cas).

De plus, l'entreprise prescrit une température minimale de 110°C avant compactage, ce qui est respecté pour tous les chantiers étudiés (voir tableau § 4.3).

Il est donc possible, pour les paramètres concernés, de déterminer leurs valeurs aux divers stades d'une thermorégénération in situ en fonction de :

- la valeur initiale mesurée sur bitume récupéré de l'enrobé en place avant réchauffage
- la valeur initiale mesurée sur bitume de l'enrobé d'apport avant fabrication
- la proportion de bitume issu de l'enrobé scarifié et de l'enrobé d'apport dans le mélange final
- du pourcentage de liant régénérant.

Concernant les autres paramètres déterminés, leur évolution globale (comparaison des valeurs avant/après thermorégénération) n'évoluent pas de manière significative, à l'exception de la ductilité qui augmente et de la surface enrobée après essai de désenrobage EMPA, qui diminue.

Ce dernier constat, cela nous amène à considérer qu'il conviendrait probablement d'ajouter lors de la thermorégénération un dope d'adhésivité.

L'objectif de l'étude qui consistait à mette en évidence des lois d'évolution des caractéristiques intrinsèques des bitumes aux divers stades de la thermorégénération in situ des bétons bitumineux est donc atteint.

Nous devons cependant relever que ces lois ont peut-être un caractère restrictif, dans la mesure où 9 chantiers sur les 10 sélectionnés pour l'étude ont été réalisés par la même entreprise et la même machine, et que le 10e a été réalisé par une machine du même fabricant mais d'un modèle différent.

Cette situation ne résulte pas de notre volonté, puisque notre procédure de sélection des chantiers s'était faite dans le but d'avoir la meilleure représentativité des thermorégénérations réalisées in situ sur l'ensemble de la Suisse (sélection des chantiers après enquête auprès des départements des travaux publics cantonaux, selon l'importance et la localisation géographique).

Il se trouve en fait qu'une seule entreprise en Suisse était suffisamment bien équipée pour réaliser, cette année-là du moins, la plupart des chantiers de thermorégénération cantonaux en adjudication directe ou en sous-traitance.

Les lois d'évolution obtenues ne doivent être appliquées qu'avec précaution à des chantiers à réaliser avec d'autres équipements.

Ertec S.A., Le Mont

ANNEXE I

MANDAT O F R

Réfection de chaussées par thermorégénération
Evolution des caractéristiques intrinsèques du bitume

QUESTIONNAIRE N° 1 AU MAITRE D'OUVRAGE

Fiche signalétique des chantiers prévus en 1991
(Remplir 1 questionnaire par chantier)

I) Renseignements généraux

Chantier N° :
Lieu :
Début (point de repère) * :
Fin (point de repère) * :
Longueur :
Largeur :
Surface traitée :
Date d'exécution :
Surveillant/responsable : N° tél. :

II) Entreprise

Entreprise chargée des travaux :
Adresse :
N° tél. :
Personne responsable :
(Chef de centre)

* si possible, joindre plan de situation avec repère du tronçon

III) Caractéristiques techniques

a) Enrobé en place

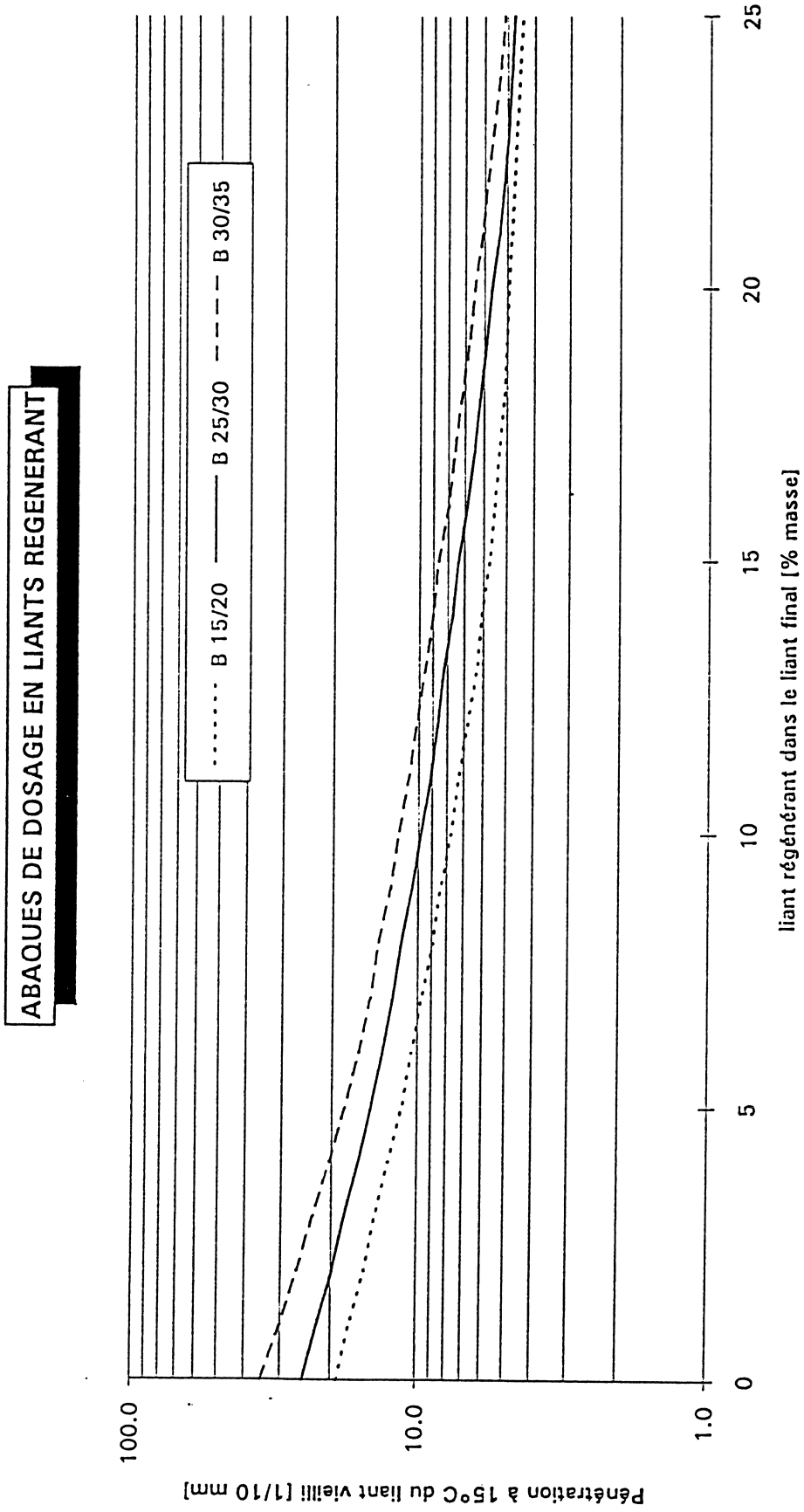
Profondeur de traitement (scarification) :
Nombre de couches traitées :
Type(s) d'enrobé(s) traité(s) :
Teneur en liant mélange traité :
Pénétration du bitume avant traitement :

b) Enrobé d'apport

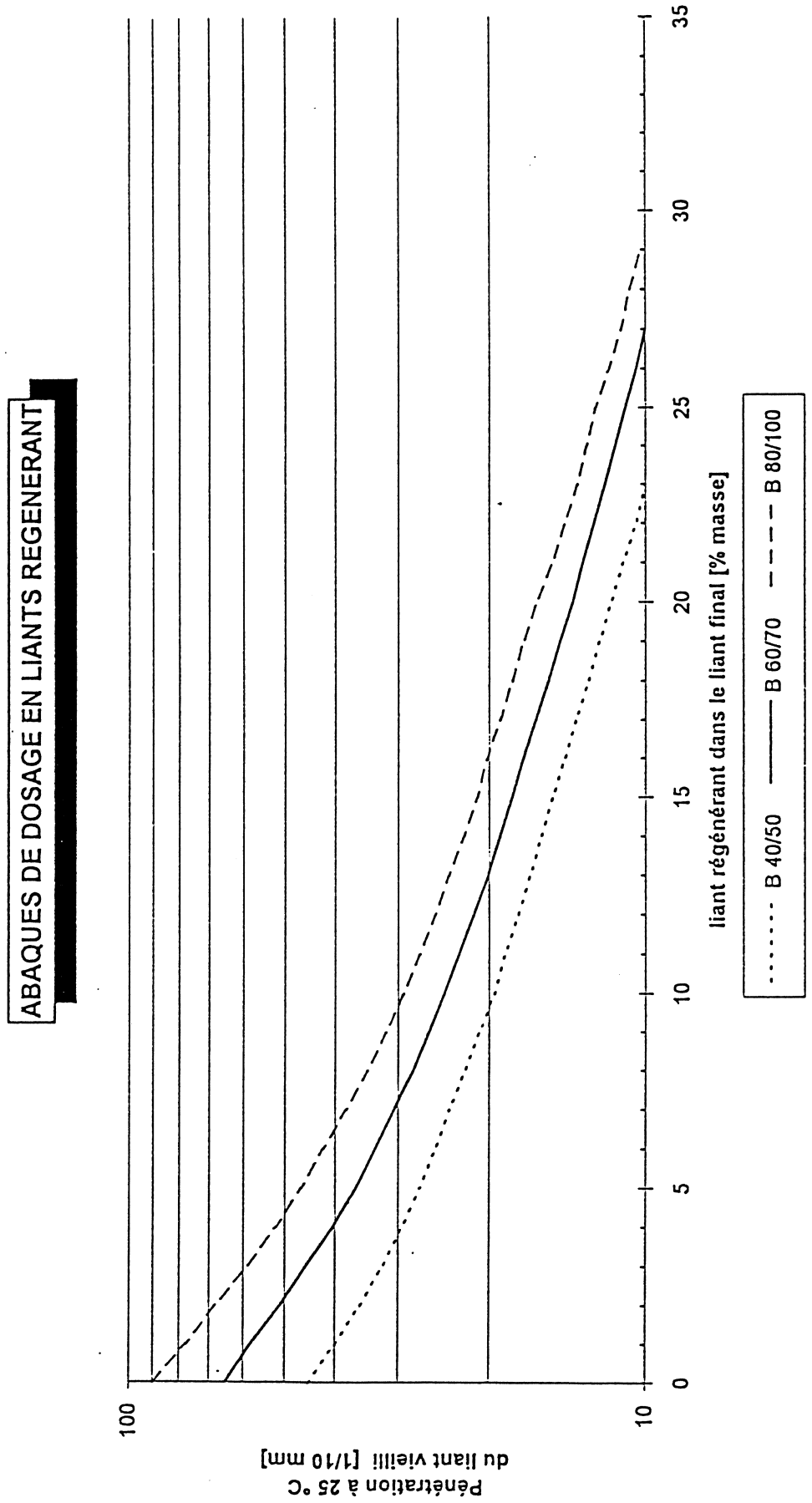
Quantité d'apport (kg/m²) :
Type d'enrobé :
Type de liant :
Dosage :

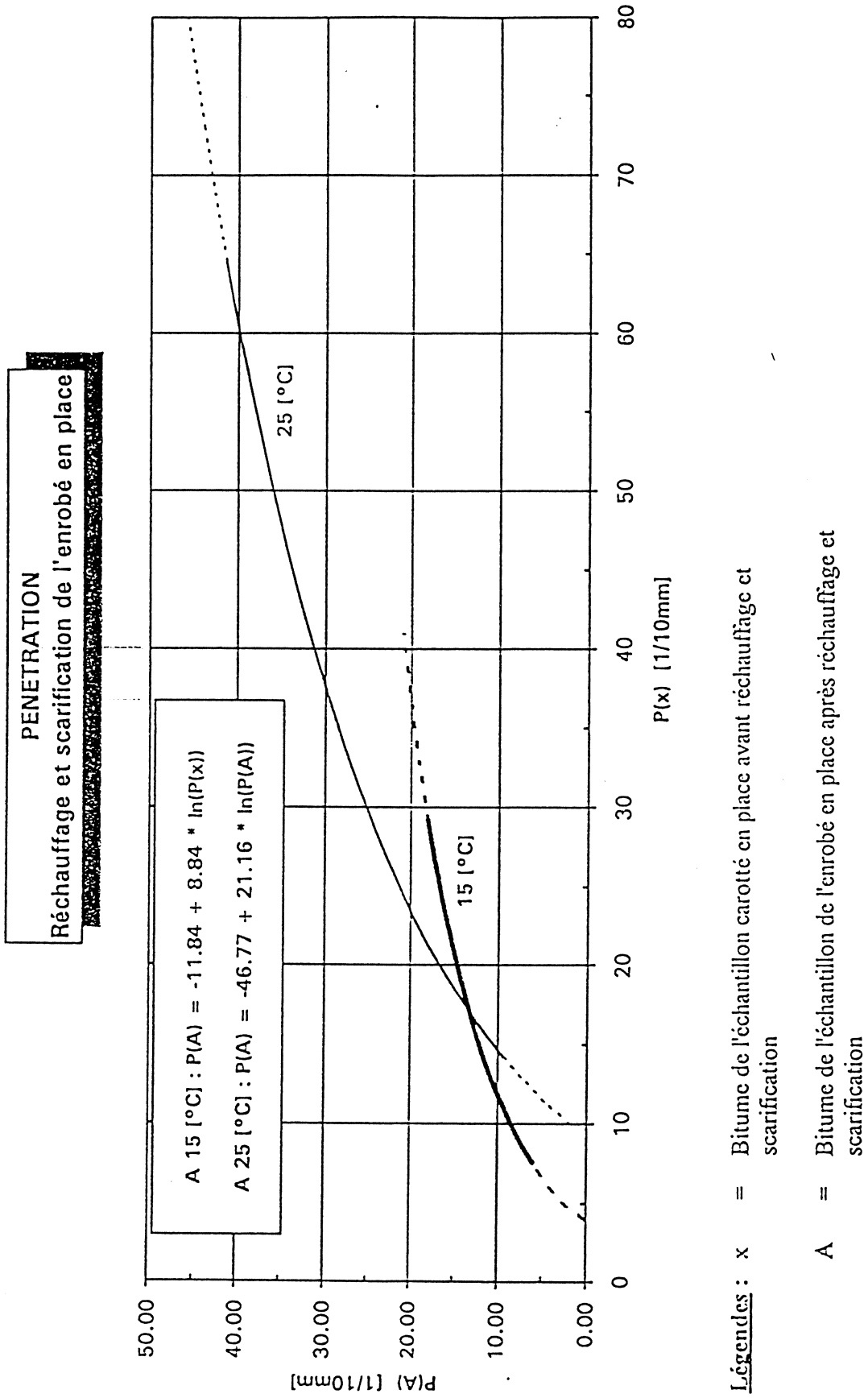
c) Liant régénérant

Quantité d'apport (g/m²) :
Type :
Fabricant :
Fournisseur :

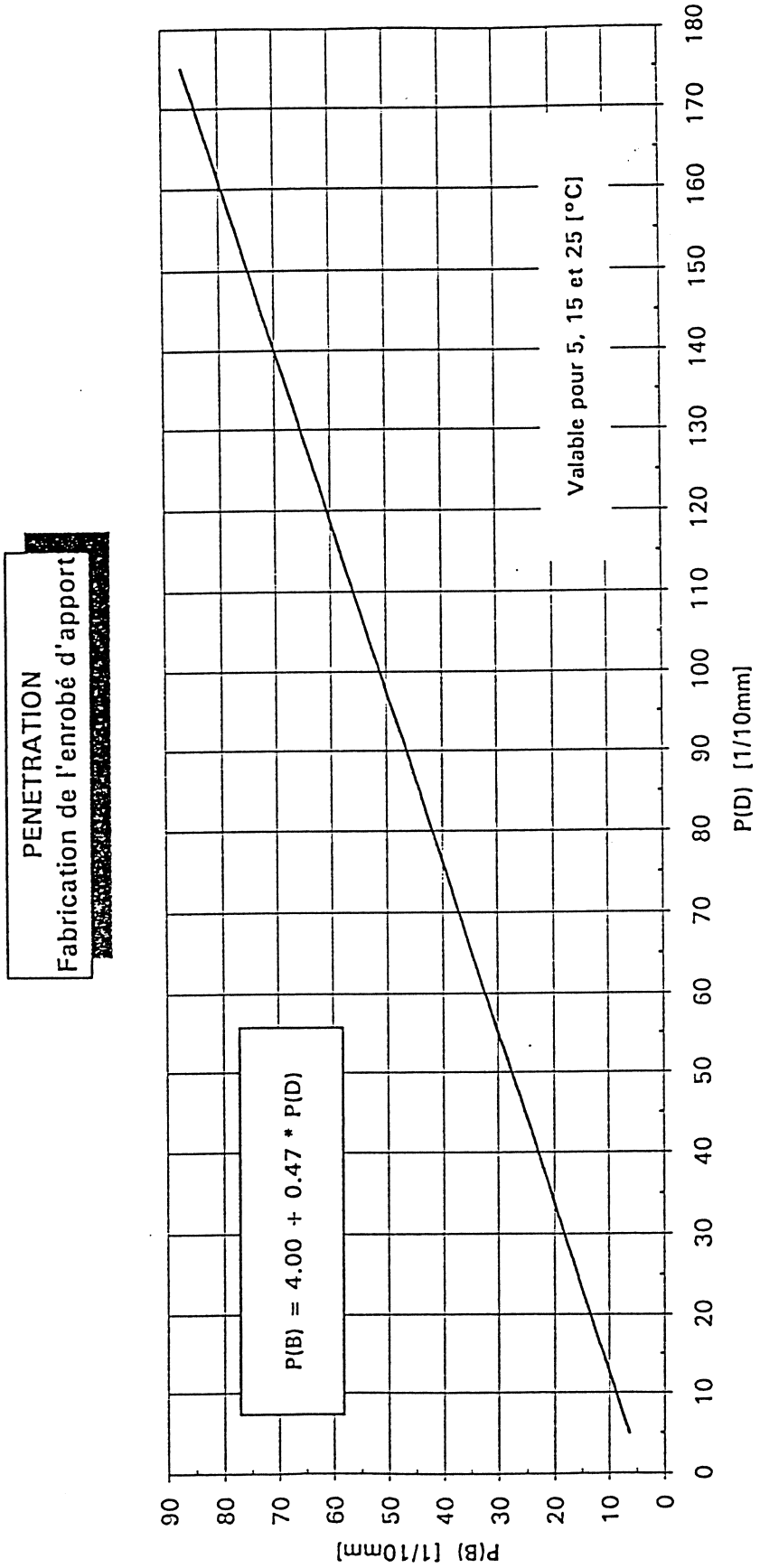

ABAQUES DE DOSAGE EN LIANTS REGENERANT
B 15/20
B 25/30
B 30/35
100.0
10.0
1.0
Pénétration à 15°C du liant vieilli [1/10 mm]
0
5
10
15
20
25
liant régénérant dans le liant final [% masse]

ANNEXE II


ABAQUES DE DOSAGE EN LIANTS REGENERANT
Pénétration à 25 °C
du liant vieilli [1/10 mm]
100
10
0
5
10
15
20
25
30
35
liant régénérant dans le liant final [% masse]
B 40/50
B 60/70
B 80/100

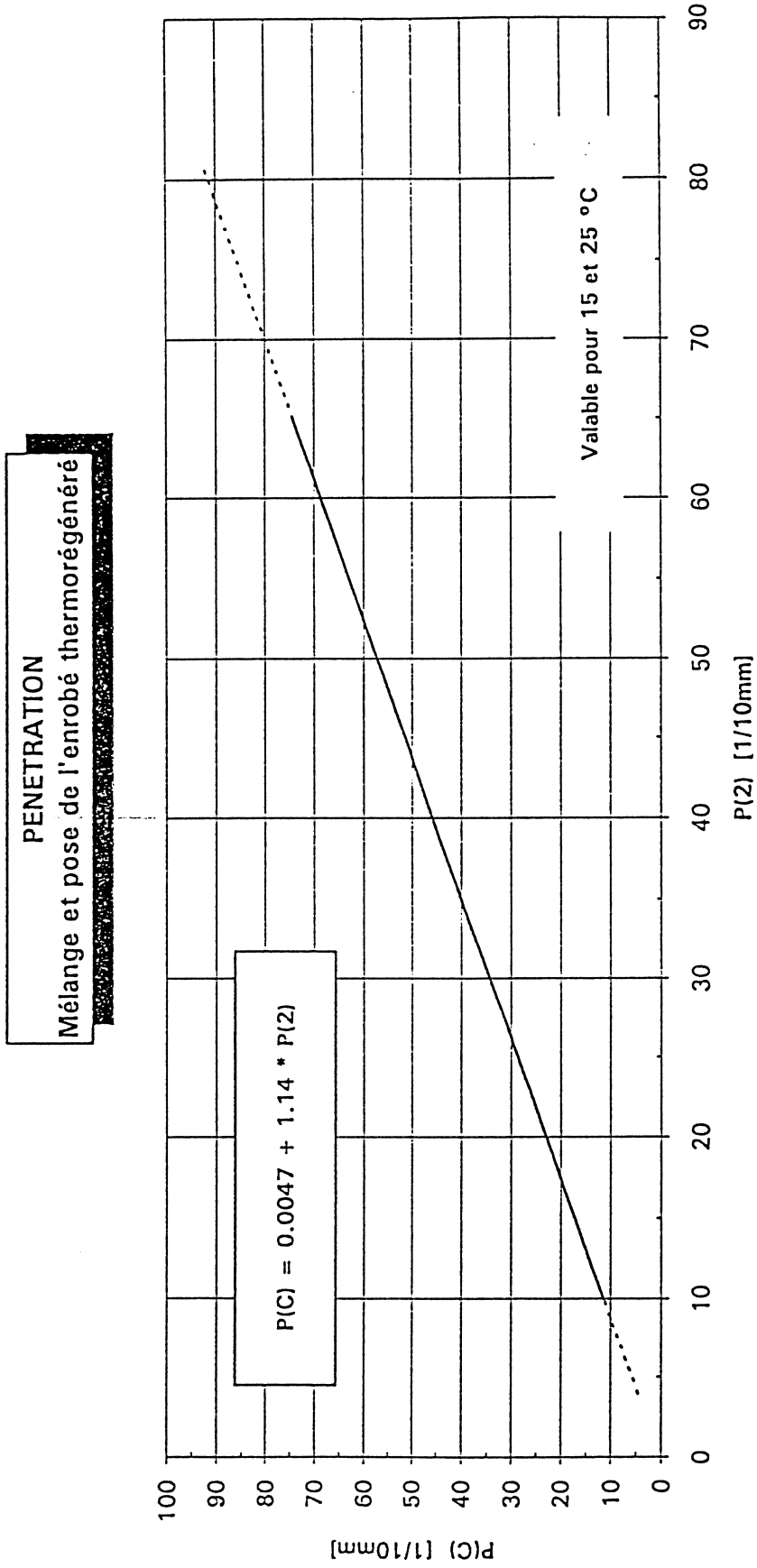

PENETRATION
Réchauffage et scarification de l'enrobé en place
A 15 [°C] : P(A) = -11.84 + 8.84 * ln(P(x))
A 25 [°C] : P(A) = -46.77 + 21.16 * ln(P(A))
25 [°C]
15 [°C]
P(A) [1/10mm]
50.00
40.00
30.00
20.00
10.00
0.00
0
10
20
30
40
50
60
70
80
P(x) [1/10mm]
Légendes : x = Bitume de l'échantillon carotté en place avant réchauffage et scarification
A = Bitume de l'échantillon de l'enrobé en place après réchauffage et scarification

ANNEXE III



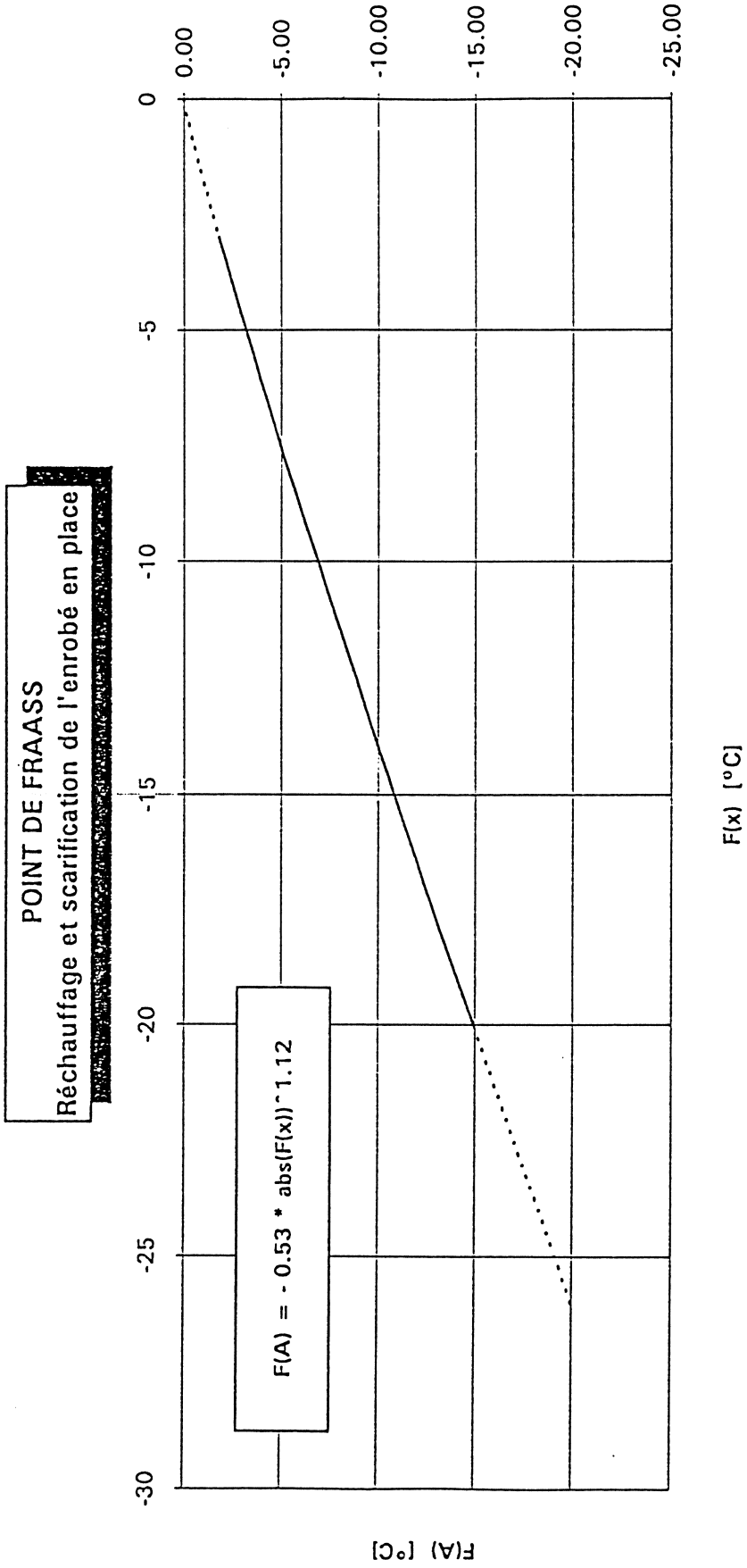
Légendes : D = Bitume de l'enrobé d'apport après fabrication

B = Bitume de l'enrobé d'apport avant fabrication



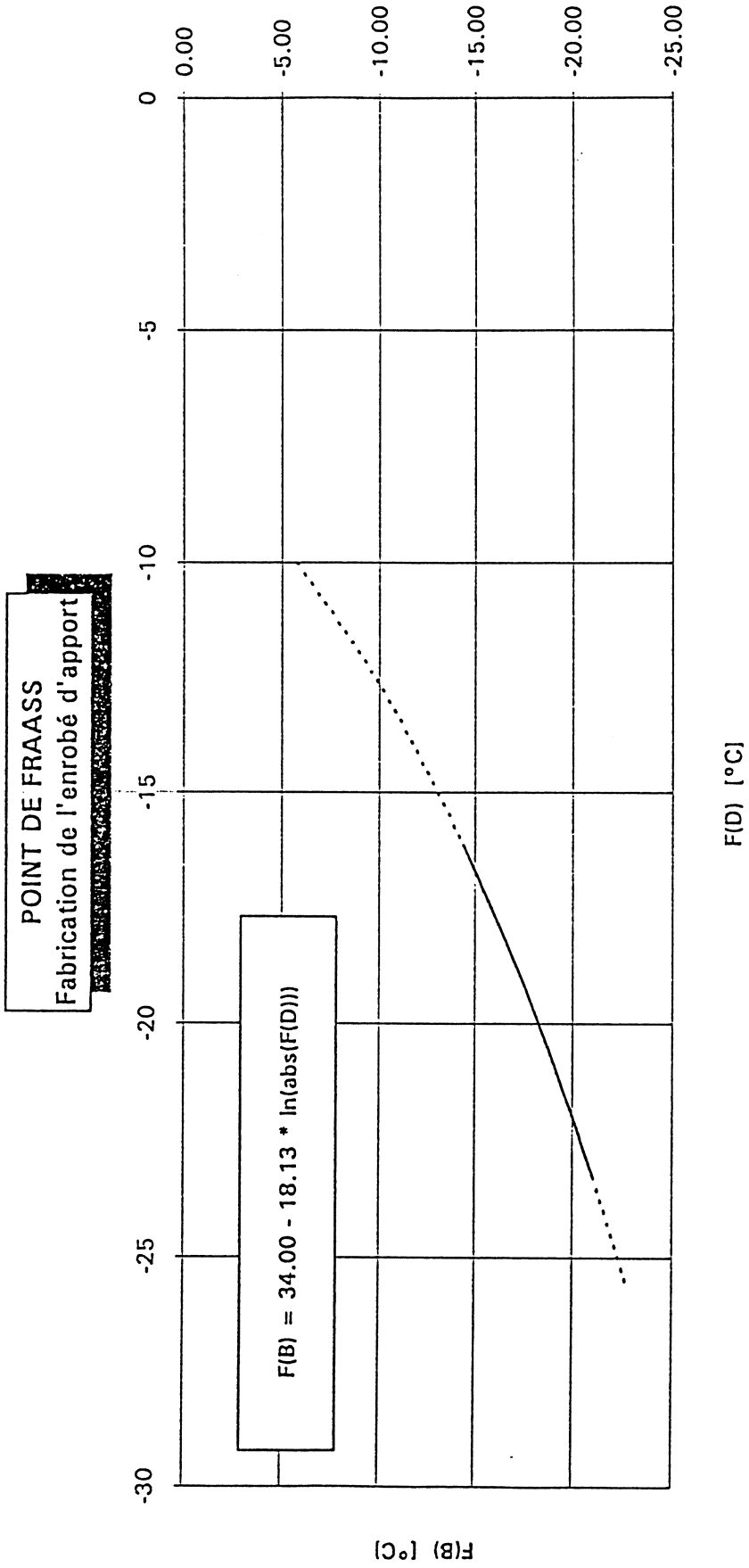
Légendes : (2) = Valeur théorique du mélange enrobé en place, enrobé d'apport, avec liant régénérant

C = Bitume de l'enrobé thermorégénéré



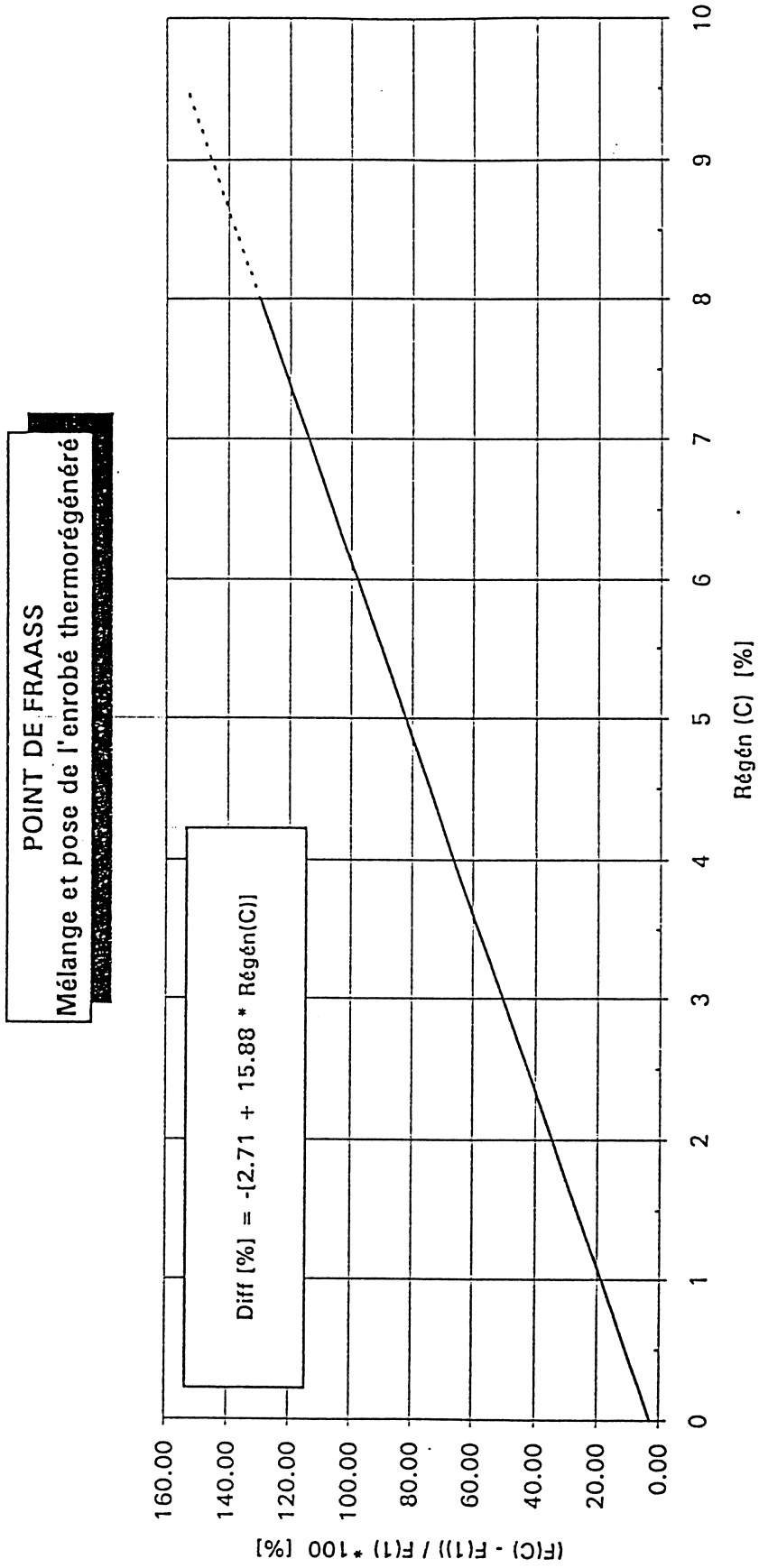
Légendes : x = Bitume de l'échantillon carotté sur l'enrobé en place avant réchauffage et scarification

A = Bitume de l'échantillon de l'enrobé en place après réchauffage et scarification



Légendes : D = Bitume de l'enrobé d'apport après fabrication

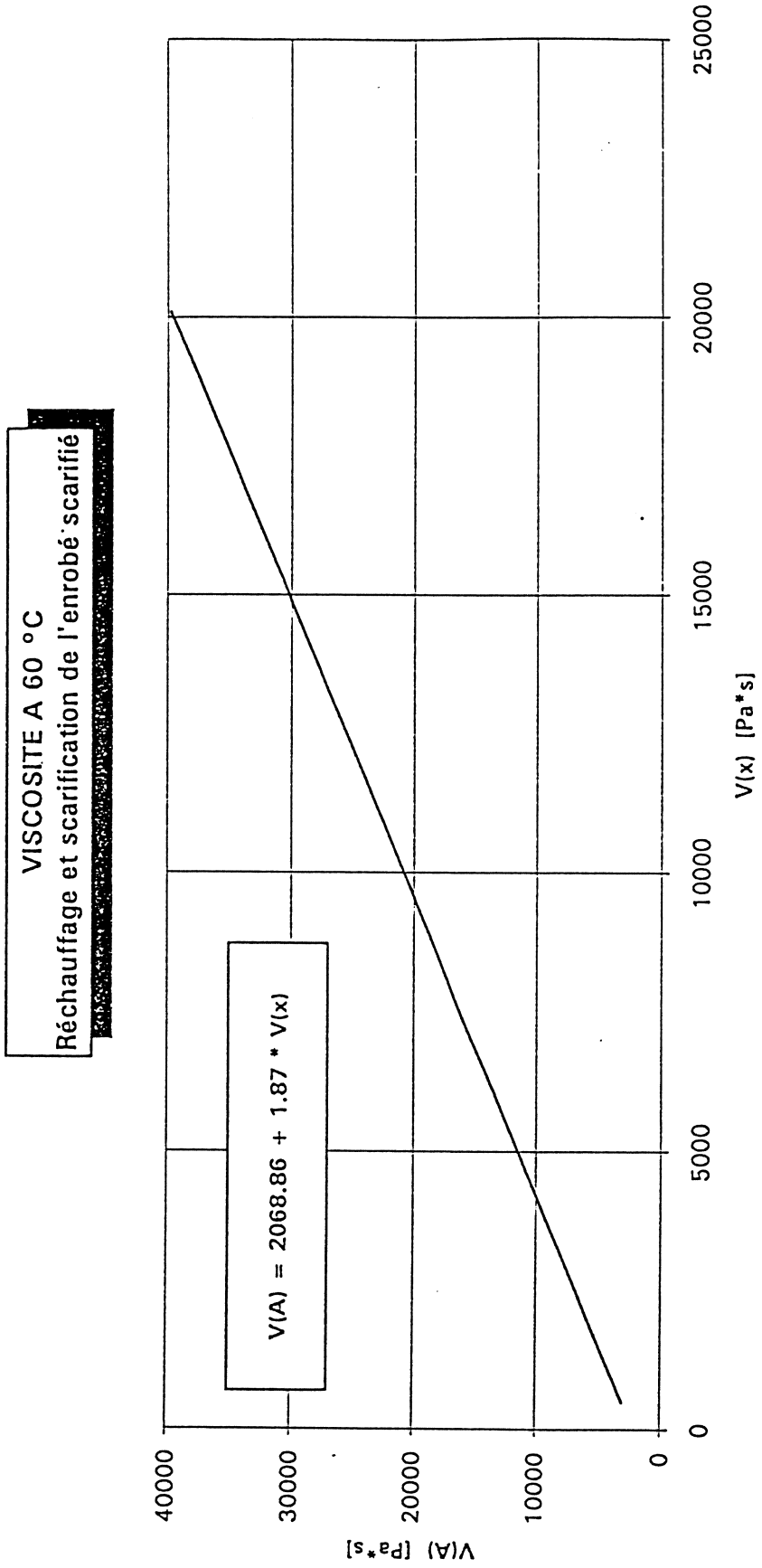
B = Bitume de l'enrobé d'apport avant fabrication



Légendes : Régén (C) = Teneur en liant régénérant

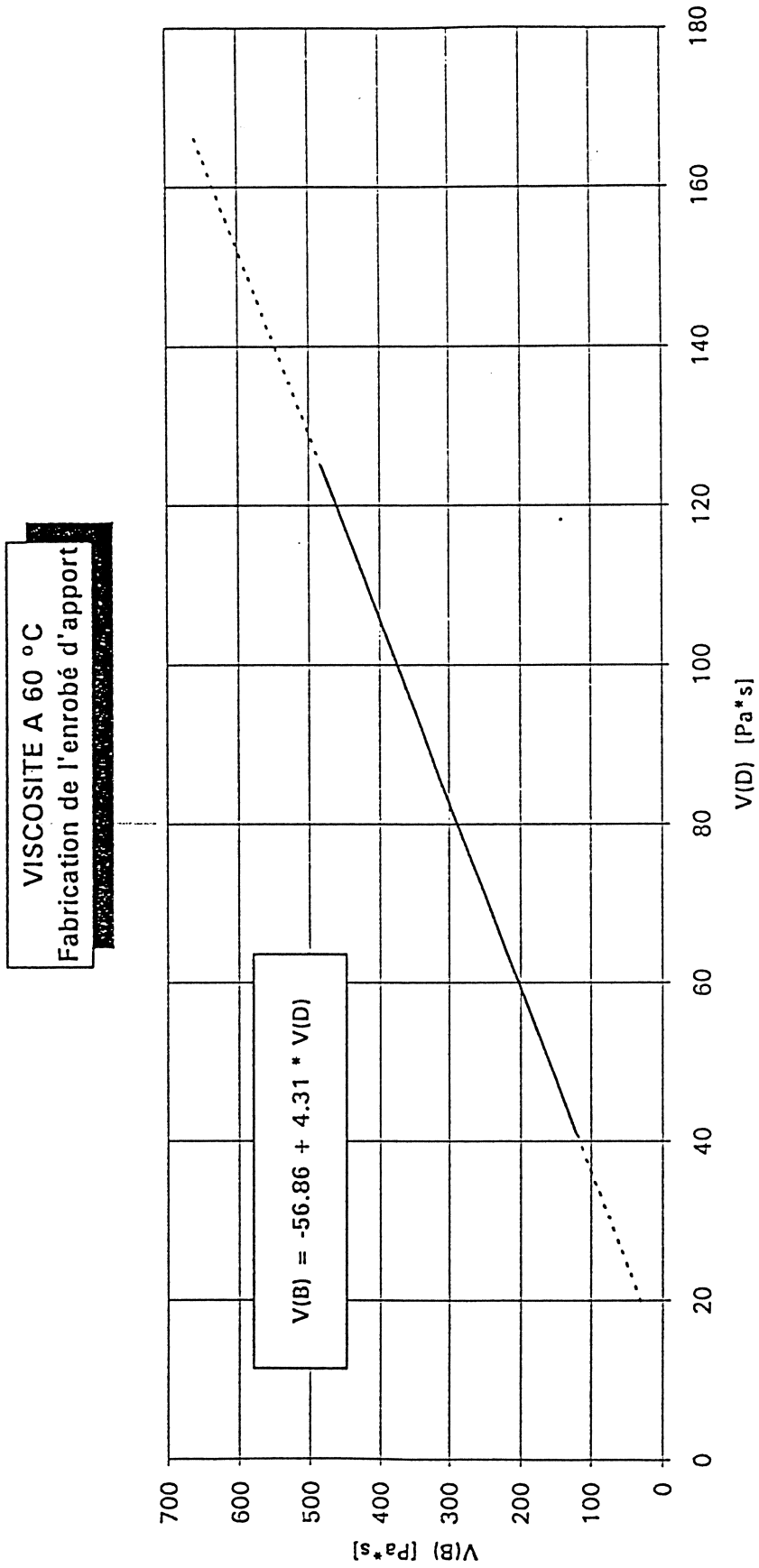
(1) = Valeur théorique du mélange enrobé en place, enrobé d'apport, sans liant régénérant

C = Bitume de l'enrobé thermorégénéré



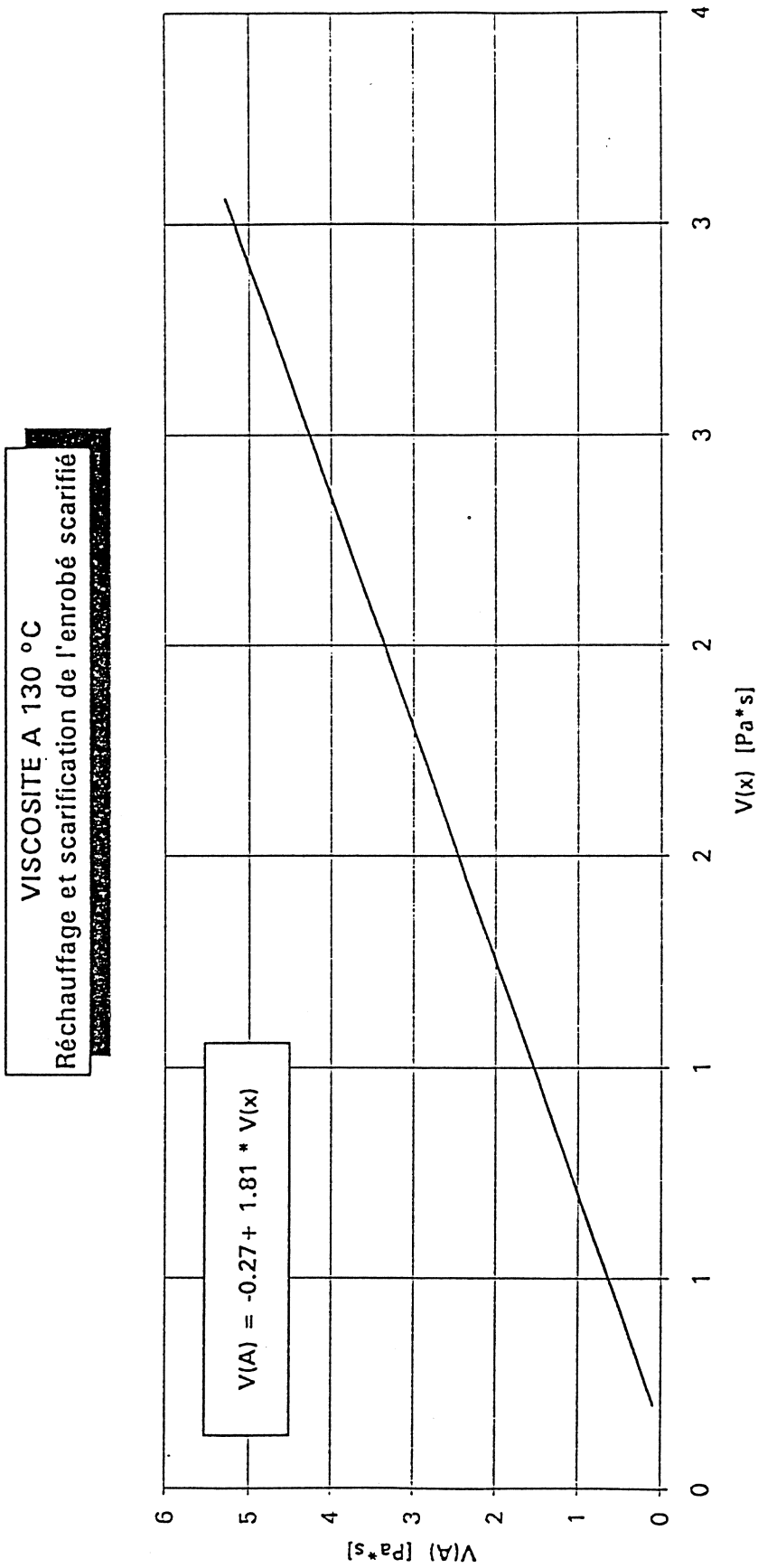
Légendes : x = Bitume de l'échantillon carotté sur l'enrobé en place avant réchauffage et scarification

A = Bitume de l'échantillon de l'enrobé en place après réchauffage et scarification



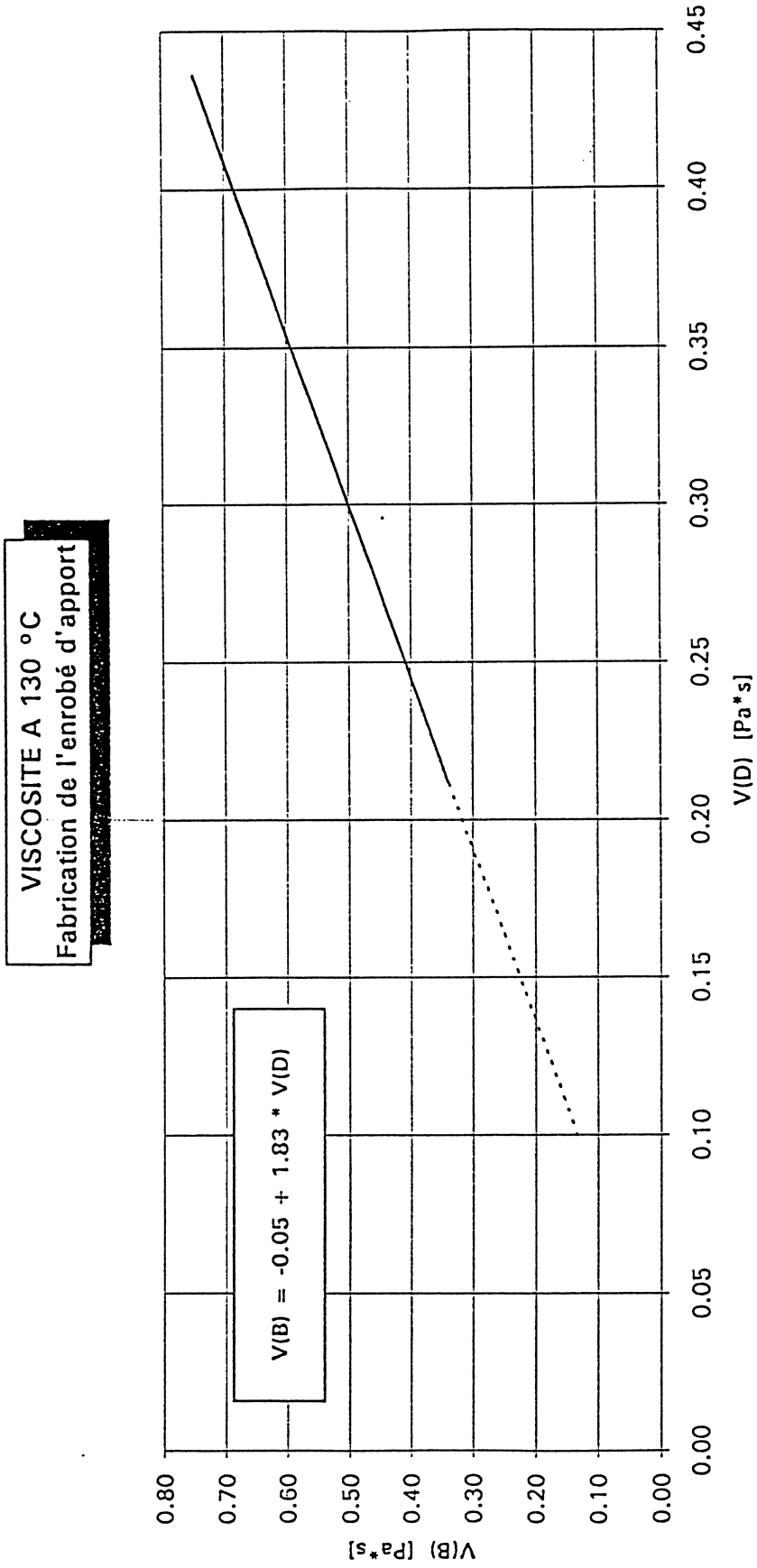
Légendes : D = Bitume de l'enrobé d'apport après fabrication

B = Bitume de l'enrobé d'apport avant fabrication



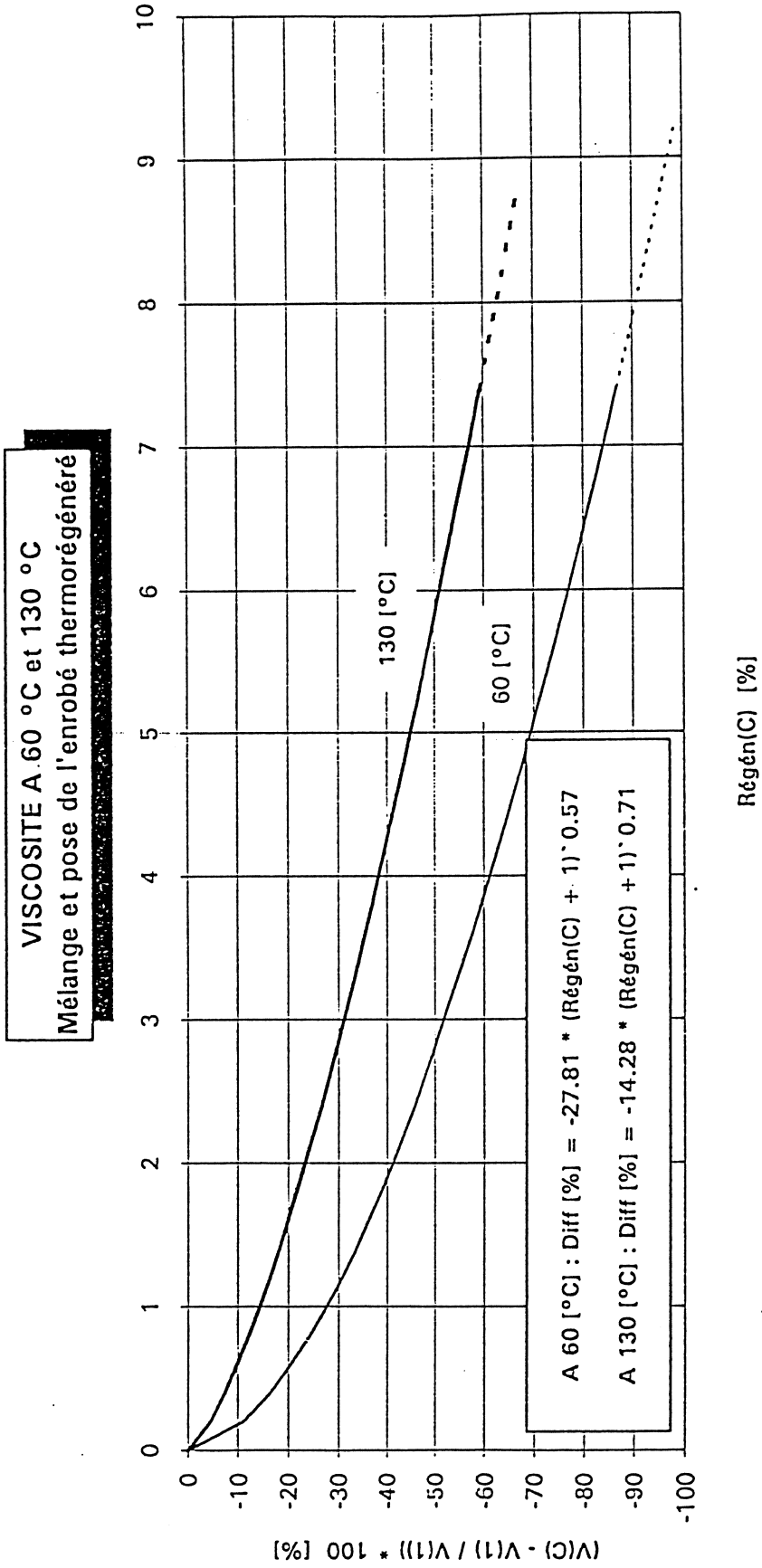
Légendes : x = Bitume de l'échantillon carotté sur l'enrobé en place avant réchauffage et scarification

A = Bitume de l'échantillon de l'enrobé en place après réchauffage et scarification



Légendes : D = Bitume de l'enrobé d'apport après fabrication

B = Bitume de l'enrobé d'apport avant fabrication



Légendes : Régén (C) = Teneur en liant régénérant

(1) = Valeur théorique du mélange enrobé en place, enrobé d'apport, sans liant régénérant

C = Bitume de l'enrobé thermorégénéré