

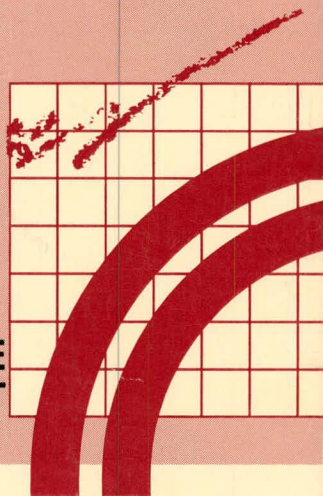
ÉTUDES ET
RECHERCHES
EN TRANSPORTS



LA PERFORMANCE RELATIVE DES COUCHES D'USURE EN BÉTON BITUMINEUX POSÉES AU QUÉBEC ENTRE 1977 ET 1985

MARC-ANTOINE LAFORTE

GÉNIE
ET ENVIRONNEMENT



CANQ
TR
287

Québec 

22/093

LA PERFORMANCE RELATIVE DES COUCHES D'USURE EN
BÉTON BITUMINEUX POSÉES AU QUÉBEC ENTRE 1977 ET 1985

Dor-Len-Mon

CANQ

TR

287

MINISTÈRE DES TRANSPORTS
CENTRE DE DOCUMENTATION
700, BOUL. RENÉ-LÉVESQUE EST,
21^e ÉTAGE
QUÉBEC (QUÉBEC) - CANADA
G1R 5H1

Dépôt légal, 1er trimestre 1990
Bibliothèque nationale du Québec
ISBN 2-550-20425-5



Titre et sous-titre du rapport La performance relative des couches d'usure en béton bitumineux posées au Québec entre 1977 et 1985		N° du rapport Transports Québec RTQ-89-29					
		Rapport d'étape ☐ An Mois Jour Rapport final ☒ 8 9 0 6					
Auteur(s) du rapport Marc-Antoine Laforte		N° du contrat Date du début d'étude Date de fin d'étude Coût de l'étude					
Étude ou recherche réalisée par (nom et adresse de l'organisme) Centre de recherche et de contrôle appliqué à la construction (1986) inc. 3800, boul. Crémazie Est Montréal (Québec) H2A 1B8		Étude ou recherche financée par (nom et adresse de l'organisme) Ministère des Transports du Québec 700, boul. Saint-Cyrille Est Québec (Québec) G1R 5H1					
But de l'étude, recherche et renseignements supplémentaires Cet article résume la recherche effectuée par CRCAC Inc. pour le compte du ministère des Transports du Québec qui avait pour objectif de comparer les mélanges bitumineux utilisés en couche d'usure dans l'environnement québécois, soit les mélanges de type MB-4, MB-5, recyclés et non-recyclés, puis Skip Mix (à granulométrie discontinue).							
Résumé du rapport La comparaison portait sur la résistance à la fissuration, à l'orniérage et à la glissance. Un relevé visuel fut d'abord effectué sur 112 tronçons totalisant 203 km de longueur, divisés en 1 054 sections de 200 mètres. Quarante sections représentatives tirées de ces tronçons furent ensuite étudiées en détail par prélèvement d'échantillons et par des relevés in situ. Les variables, divisées en quatre grandes familles, furent analysées de façon statistique. Les principales conclusions sont que certains facteurs dont l'âge, le trafic accumulé et les caractéristiques des granulats affectent davantage le rendement des revêtements que les caractéristiques des mélanges eux-mêmes. La typologie des granulats, formant 85% du volume, ressort comme la variable la plus importante, expliquant jusqu'à 40% de la variation observée. Les granulats jouent un rôle à tous les plans, influençant l'adhérence (résistance à la glissance), la rigidité et la fragilité des mélanges. La typologie des mélanges explique entre 10 et 35% des variations observées. Cependant, les caractéristiques reliées au bitume ressortent assez peu. Le choix d'un mélange optimal nécessite une pondération entre la résistance à la fissuration ou à l'orniérage, les mélanges acceptables pour l'une des caractéristiques ne l'étant pas pour l'autre. Cependant, il existe une relation de cause à effet entre l'un et l'autre type de dégradation. L'étude fait ressortir qu'un mélange du type MB-5 est un mélange acceptable toutes catégories, le cédant au MB-4 pour la résistance à la fissuration et au Skip Mix sur le plan de l'orniérage. En plus des comparaisons touchant la durabilité, les analyses ont permis de relier diverses variables ou caractéristiques de rendement.							
Nbre de pages	Nbre de photos	Nbre de figures	Nbre de tableaux	Nbre de références bibliographiques	Langue du document	Autre (spécifier)	
					☒ Français ☐ Anglais		
Mots-clés mélanges bitumineux, MB-4, MB-5, Skip Mix, couche d'usure				Autorisation de diffusion ☒ Diffusion autorisée ☐ Diffusion interdite			
				Signature du directeur général		Date 80 0 1 1 1	

TABLE DES MATIÈRES

1.	INTRODUCTION	1
2.	MÉTHODOLOGIE	3
3.	RÉSULTATS DES ANALYSES	7
4.	CORRÉLATIONS GÉNÉRALES	13
5.	COMMENTAIRES FINAUX ET CONCLUSIONS	17
	<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	23
TABLEAU 1	ESSAIS DE LABORATOIRE <u>ORGANIGRAMME DES ESSAIS RÉALISÉS</u>	25
TABLEAU 2	FACTEURS SIGNIFICATIFS TROUVES (*) PAR L'ANALYSE DES TABLEAUX DE CORRELATION	27
TABLEAU 3	ANALYSE DE VARIATION MULTIVARIABLES (ANOVA)	29
TABLEAU 4	ANALYSE DE VARIATION MULTIVARIABLES (ANOVA)	31
TABLEAU 5	CORRÉLATIONS DES PARAMETRES DU BITUME	33
TABLEAU 6	CORRÉLATIONS DES PARAMETRES DU BITUME	35
TABLEAU 7	ASSOCIATION ENTRE LA COMPACTITE ET LA PENETRATION RESIDUELLE .	37
TABLEAU 8	CORRÉLATIONS GÉNÉRALES LES PLUS SIGNIFICATIVES VIS-A-VIS DES CRITERES DE PERFORMANCE	39
TABLEAU 9	MATRICE DE CORRELATION RELATIVE AUX CRITERES DE PERFORMANCE ET AUX CARACTERISTIQUES GÉNÉRALES DES MELANGES OU DE L'ENVIRONNEMENT	43
FIGURE 1:	TENDANCE DE L'ÉVOLUTION DES DÉFAUTS RELEVÉS DANS 112 SECTIONS AYANT 203 KM DE LONGUEUR	45
FIGURE 2:	RELATION ENTRE LES DIVERSES POPULATIONS ÉTUDIÉES LORS DU RELEVÉ GLOBAL OU DÉTAILLÉ	47
FIGURE 3:	TENDANCE OBSERVÉE SELON L'ÂGE, LA PÉNÉTRATION ORIGINALE ET L'INDICE DE VIDES MESURÉ SUR LES ÉCHANTILLONS PRÉLEVÉS (40 SECTIONS)	49
FIGURE 4:	RELATION NOTÉE ENTRE LE DEGRÉ DE FISSURATION LONGITUDINALE, LA DÉFLEXION CARACTÉRISTIQUE ET LE TRAFIC CUMULÉ (40 TRONÇONS ÉTUDIÉS)	51

1. INTRODUCTION

En février 1988, le ministère des Transports du Québec confiait à CRCAC Inc. le mandat de faire le point sur les mélanges bitumineux posés depuis 1974 en couches d'usure au Québec.

Cette étude visait à comparer entre eux les quatre types de mélanges bitumineux MB-4, MB-4 recyclé, MB-5 et Skip Mix) les plus utilisés entre 1978 et 1985, afin de pouvoir mieux juger de leur rendement et de leur utilisation dans un environnement donné. C'est ainsi que 70% des contrats étudiés se situaient dans l'axe Québec-Montréal alors que 30% portaient sur des mélanges posés dans des régions géographiquement et géologiquement différentes.

Le rendement fut jugé selon la résistance à la fissuration (transversale, longitudinale et en traces de roues), à l'orniérage normal (dû à la mauvaise performance de la couche et de ces composantes) et à l'adhérence (essai au pendule britannique).

2. MÉTHODOLOGIE

L'absence de dossiers antérieurs à 1977 n'a pas permis d'étudier l'usure des couches plus vieilles que dix ans. Au départ, il était essentiel de posséder des données assez complètes sur la pose et la qualité des revêtements étudiés afin d'éliminer les sections où des problèmes évidents de conception, de construction ou de contrôle pouvaient être décelés.

L'étude proprement dite se fit en deux étapes:

- 1) Une inspection visuelle fut d'abord effectuée sur tous les tronçons sélectionnés pour définir l'état actuel et le rendement relatif des mélanges;
- 2) Un relevé détaillé avec prélèvement d'échantillons et analyse complète a suivi. Les sections-types étudiées étaient extraites des tronçons représentatifs et présentaient une échelle de rendement associable aux propriétés globales des mélanges bitumineux utilisés en couche de roulement.

Le relevé global comprenait 112 tronçons totalisant 203,2 km. Ces tronçons furent tirés de contrats de resurfacement différents effectués entre 1978 et 1985. Ils couvraient cinq régions du Québec: Bas St-Laurent, Saguenay, Québec, Trois-Rivières/Estrie et Montréal. Lors des relevés, chaque tronçon fut divisé en sections de 200 m et chaque section fut examinée à partir d'une grille de 12

types de défauts (de surface, gélivité, structuraux, de construction). La comparaison de ces relevés a permis le choix de 40 sections qui furent soumises à une étude détaillée.

En seconde partie, une inspection visuelle détaillée fut faite sur la section représentative du tronçon choisi et des échantillons de la couche d'usure furent prélevés près de la ligne de centre, en traces de roues et au centre de la voie souvent la plus utilisée. Cette section présentait surtout des problèmes associés aux revêtements, car les sections où les problèmes apparents étaient causés par la déficience structurale, la gélivité des sols et les défauts de construction avaient d'abord été éliminés.

Après les essais courants sur les bitumes, les granulats ou les mélanges, dont la liste est donnée au tableau 1, une étude statistique fut réalisée pour comparer le rendement des mélanges selon quatre grandes catégories de facteurs: l'environnement incluant l'âge et le trafic, la stabilité et la portance, les propriétés du bitume et les propriétés du mélange, y compris celles des granulats.

Cette étude, utilisant les techniques des analyses en composantes principales ou de correspondance, fut complétée par des analyses de moyennes et de variance et le développement des matrices de corrélation. Finalement, on a effectué des études mettant en corrélation les variables les plus significatives à l'intérieur d'une catégorie ou en relation avec les catégories dépendantes, et des analyses de corrélation par groupes, comparant les grandes familles de données.

Bien qu'il y ait eu plusieurs types de bitumes (pénétration originale 85/100, 120/150 et 150/200), l'utilisation de caractéristiques comme la pénétration résiduelle, la température au point de ramollissement $T_{R\&B}$, la viscosité à 135 C) a permis de tracer la courbe viscosité- température de chaque type et ainsi, de les comparer sur une base identique et de réduire les variations reliées à ce facteur.

De même, les mélanges furent comparés sur une base équivalente, en relation avec les caractéristiques fondamentales (pourcentage de bitume, VAM, SSG, équation granulométrique, passant tamis nos 5, 50, 200, filler récupéré, rapport bitume/fines, pourcentage de vides remplis de bitume, stabilité, fluage, portance, compression à 60 et à 40 C) avec, lorsque c'était possible, dans et à l'extérieur des traces de roues (densité brute, glissance BPN, texture, tache de sable, pourcentage de vides).

3. RÉSULTATS DES ANALYSES

1) L'analyse du relevé global des 112 tronçons, permet les constatations suivantes:

Des tronçons examinés, 80% ont des problèmes reliés à l'environnement (fissuration transversales, lézardes), 15% à la capacité structurale (fissures longitudinales, ornières) et 5% ont des problèmes de construction. Ces facteurs déterminent la durabilité de la route et, comme l'illustre la figure 1, limitent la durée effective du revêtement à 8 ou 12 ans.

La situation géographique est très significative car certaines chaussées, construites au Saguenay et dans le Bas St-Laurent en même temps que d'autres ailleurs dans la province, sont plus endommagées.

2) Le relevé de détail fourni les renseignements suivants:

Comme les 40 sections choisies pour l'étude détaillée ne sont pas affectées par des problèmes évidents d'origine environnementale ou structurale, elles ne représentent qu'environ 27% des sections de 200 m relevées par l'étude globale (voir AA de la figure 2). Ce sont des sections de route droite horizontale et les autres conclusions s'appliquent surtout à ce type de sections. Une étude supplémentaire est toutefois nécessaire pour vérifier l'applicabilité des résultats aux autres types de section, mais l'étude statistique préliminaire montre qu'en première approximation, ces résultats sont applicables pour tous les types de section de géométrie normale (pente de $\pm 5\%$, sections à rayons

acceptables pour routes de 90 km/h et plus).

Les sections étudiées se différencient très peu quant à l'âge moyen mais considérablement quant au trafic (cumulé AADT ou équivalent ECSES)¹ et à la capacité structurale. Les tronçons recouverts de mélange type MB-5 et MB-4 sont les moins utilisés, ont les moins grandes capacités structurales et se distinguent ainsi grandement des revêtements Skip Mix.

Les tronçons sont généralement peu différenciés quant aux propriétés générales des mélanges et des bitumes récupérés. Cependant, les quatre types de mélange se distinguent par une variation moyenne de 10% de la granulométrie des échantillons.

Comme montré au tableau 2, l'analyse des corrélations regroupe les fissures longitudinales (simples ou multiples en dehors des traces de roues) et la fissuration transversale avec les facteurs environnementaux (âge, indice de gel). De même, la dureté du granulat, le trafic, la fissuration dans les traces de roues et l'orniérage sont corrélés, indiquant l'influence importante de l'usure sur le degré d'orniérage.

Dans l'ensemble, on note peu de différences significatives entre le rendement des mélanges échantillonnés dans les traces de roues et celui des mélanges échantillonnés en dehors, quant à la densité brute, la texture ou l'adhérence. La différence est plus marquée pour l'indice de vides (indice inférieur en

¹ECSES: Equivalent de charge sur essieu simple 80 kN.

moyenne dans les traces de roues). Cela indiquerait qu'une partie de l'orniérage mesuré pourrait être le résultat du compactage par le trafic.

On note aussi peu de différences significatives entre les résultats des données de construction et les mesures faites sur les échantillons, surtout quant à la composition granulométrique et à la teneur en bitume. Les différences mesurées pour ces paramètres pourraient être expliquées par la différence d'échantillonnage.

Cependant, on note une diminution significative de la rigidité calculée à 60 C (rapport stabilité/fluage), sauf pour le MB-4 recyclé. Dans tous les cas, on observe une augmentation significative du degré de compactage.

En rapport avec les critères de rendement utilisés, l'influence de quatre facteurs est significative et constante: l'âge, le type de granulat, le trafic cumulé ECSES et le type de mélange. Notons que le trafic et l'âge ne sont pas complètement indépendants, le coefficient de corrélation intervariable r variant entre 0,35 (MB-4 recyclé ou non) et 0,80 (Skip Mix).

Le tableau 3, donnant les résultats de l'analyse de variation multivariable, permet ainsi de vérifier les faits suivants:

- En rapport avec la performance vis-à-vis la fissuration, les trois premiers facteurs expliquent 53% de la variation observée pour la fissuration transversale et la fissuration dans les traces de roues et 26% de celle observée pour la fissuration longitudinale.

La variation expliquée par le type de mélange est respectivement de 23% (fissuration transversale), 12% (fissuration dans les traces de roues) et 10% (fissuration longitudinale).

- En rapport avec l'orniérage, les quatre facteurs précités expliquent 80% de la variation observée, dont 12% par le type de mélange. Notons cependant que vis-à-vis ce paramètre, les tronçons structuralement déficients avaient été éliminés et que l'analyse du tableau montre que l'usure (le granulat expliquant 33% de la variation), plus que les déformations reliées à la stabilité du mélange, pourrait être une cause importante de l'orniérage mesuré. Cet orniérage correspond aussi à un indice de vides souvent moins élevé dans les traces de roues, d'où également une influence probable du compactage par un trafic concentré.

Comme montré au tableau 4, le type de granulat explique aussi respectivement 72% de la variation dans le cas des mesures de glissance et 66% dans le cas des mesures de texture (en laboratoire en carotte ou en chantier).

Le trafic explique 16,4% de la variation totale de l'adhérence et le type de mélange 8%.

Le type de mélange est plus significatif dans le cas de la texture, car il explique alors 24% de la variation observée, contre 5% environ expliquée par le trafic.

L'effet de l'hiver (mesuré par la différence entre le taux moyen de fissuration à l'automne 1988 et au printemps 1989) est surtout marqué par une augmentation significative du nombre de fissures multiples (longitudinales ou transversales), la déformation prononcée de la surface de certaines sections et l'ouverture relative des fissures. Les mélanges se distinguent peu l'un par rapport à l'autre, mais les mélanges de type MB-4 recyclé et Skip Mix semblent légèrement plus affectés. Ces mélanges sont par ailleurs les plus fissurés transversalement.

4. CORRÉLATIONS GÉNÉRALES

Plusieurs corrélations bivariables ou multivariables significatives ($r > 4$ fois son écart-type) ont été développées reliant les diverses caractéristiques des mélanges entre elles ou avec les autres facteurs étudiés.

Les principales corrélations sont données aux tableaux 5 et 6: elles relient d'abord les paramètres du bitume entre eux, permettant de définir une propriété par une autre (tableau 5). Les autres relient diverses propriétés ou mesures faites sur les mélanges à des caractéristiques d'environnement ou de trafic (tableau 6).

Plusieurs tendances qui ne sont pas directement présentables sous forme d'équations ressortent: elles sont présentées sous forme de tableaux associatifs ou de courbes générales dont le tableau 7 et la figure 3 sont des exemples.

Les résultats des corrélations générales les plus significatives vis-à-vis des critères de performance sont présentés pour chaque type de mélange au tableau 8. De façon plus générale, les corrélations-types entre les principaux groupes de caractéristiques des mélanges (bitume, stabilité, paramètres du mélange) et l'âge ou le trafic permettent d'établir la matrice de corrélation montrée au tableau 9. Notons que les groupes de variables relatives au mélange, au bitume et à la stabilité ne sont pas complètement indépendants, tout comme ceux relatifs à l'âge ou au trafic.

Ce tableau indique clairement que les variables reliées directement aux mélanges expliquent au maximum 33% du rendement des revêtements bitumineux des sections. Par contre, comme le démontre le tableau 8, une variable granulométrique, soit l'exposant B de la relation $\% \text{ passant} = A (\text{tamis})^B$, peut expliquer à elle seule 32% de l'orniérage normalisé (orniérage/1 000 000 passages essieu 80 kN).

Il y a certes d'autres facteurs qui ne sont pas étudiés dans cette étude. Celle-ci porte essentiellement sur la couche d'usure et non sur les propriétés de tout le revêtement car elles ne sont peut-être pas toutes reliées au rendement ou aux propriétés de la couche d'usure qui agissent pour produire le rendement global mesuré. Plusieurs de ces facteurs, comme le drainage, la gélivité, la capacité structurale des couches inférieures et la qualité de la construction, ont été minimisés lors du choix des sections, mais ils sont aussi difficilement quantifiables, par exemple transposables en variables mathématiques utilisables. Chaque facteur pris indépendamment est peu relié à l'ensemble, mais il agit en synergie avec les autres pour produire à la fin des effets notés, soit localement, soit globalement.

Ce fait est illustré à la figure 4 qui montre l'interaction observable entre le trafic cumulé, la capacité structurale (exprimée par la déflection D_{98} du tronçon) et le degré de fissuration longitudinale (tous les types).

Bien que l'erreur du diagramme soit près de la demi-distance entre les lignes de déflection, elle indique un type d'interaction prévisible.

De même, l'analyse des sections ayant de l'orniérage supérieur à 10 mm ou des fissurations dans les traces de roues à un taux supérieur à 0,05 m lin./m², permet de développer les équations suivantes ($r > 0,99$) entre la déflexion limite acceptable ($D_{L(98)}$) et le trafic accumulé, minimisant l'orniérage ou la fissuration.

Fissuration dans les traces de roues < 0.05 m lin./m²

$$D_{L(98)} = 7.4 - \log \text{ECSES} \quad (\text{Den mm})$$

Orniérage maximum < 0.1 cm

$$D_{L(98)} = 4.887 - 0.694 \log \text{ECSES} \quad (\text{Den mm})$$

Ces équations montrent l'importance de la capacité structurale dans le développement de ce type de dommages pour les sections étudiées en relation avec le trafic cumulé.

Malgré cela, les analyses permettent d'établir un tableau de rendement relatif à l'utilisation de chaque type de mélange étudié. Ce tableau a été tiré de l'étude des variations multiples, à partir des explications des variations observées pour chaque type de mélange particulier.

En supposant que le MB-5 est un mélange de qualité 1, on obtient la matrice de performance qui suit:

	Orniérage	Fissures traces de roues	Fissures longitu- dinales	Fissures trans- versales
MB-5	1	1	1	1
MB-4	3.07	0.43	0.75	0.9
MB-4 recyclé	0.91	0.375	2.22	1.6
Skip Mix	0.72	2.4	4.00	5.6

Une augmentation de l'indice indique un moins bon rendement quant au défaut observé.

Ainsi, le mélange de type MB-4, plus grossier, est le pire vis-à-vis l'orniérage, mais le meilleur vis-à-vis la fissuration. Cela pourrait être attribuable aux gros granulats qui réduisent les fissures.

Le mélange de type MB-4 recyclé est mauvais vis-à-vis la fissuration et acceptable vis-à-vis l'orniérage (où il se compare au MB-5).

Enfin, le Skip Mix est le meilleur mélange vis-à-vis l'orniérage, mais résiste mal à la fissuration, en particulier celle reliée à l'environnement. Notons sur ce point que malgré que le bitume soit plus qu'acceptable du point de vue de la pénétration résiduelle, l'abondance de fines (plus de 9%) et la forte teneur en filler fait que le résidu filler-bitume pourrait être une cause de la fissuration transversale élevée de ce type de mélange.

5. COMMENTAIRES FINAUX ET CONCLUSIONS

D'abord il faut dire que le rendement des sections étudiées est généralement bon dans l'ensemble et qu'aucune section n'est très mauvaise. Dans ce cas, des problèmes vraisemblablement reliés à d'autres causes que ceux provenant de la couche de surface surviennent.

L'étude nous apprend d'abord que trois facteurs (âge, trafic accumulé, type de granulats) sont plus significatifs que la typologie des mélanges vis-à-vis la performance mesurée.

Ainsi, la typologie des granulats ressort comme une des variables les plus importantes car elle explique jusqu'à 40% de la variation observée vis-à-vis les facteurs de performance et près de 75% de cette variation vis-à-vis la l'adhérence et la texture de surface. Par contre, cette variable est difficile à quantifier et à mettre en relation dans les équations de régression multiple bien qu'elle ait de nombreuses implications.

Les granulats durs, qui ont le meilleur rendement, sont le plus souvent bitumophobes (quartzite, granites) et cela occasionne par ailleurs des problèmes associés à la liaison bitume-granat (désenrobage sévère et texture plus grossière pour les mélanges contenant ces granulats).

De même, les granulats (gros ou fins), à cause de la forme de leurs grains, contrôlent la résistance (rigidité ou stabilité) des mélanges, particulièrement à moyenne et à basse température (sous le point de

ramollissement): ils contrôlent les paramètres reliés à l'angle de frottement interne (fluage) et à la granulométrie (compactabilité).

Enfin, la fragilité des granulats, qui se traduit par leur propension à créer des fines lors de la manipulation et du malaxage, influence la qualité du bitume, car ces fines, se mélangeant au liant, créent un nouveau matériau (filler-bitume) plus rigide que le bitume lui-même. De ce fait, cette fragilité s'ajoute à celle du mélange à basse température et diminue d'autant sa résistance à la fissuration transversale. Elle agit également sur l'orniérage car le mélange filler-bitume est plus rigide à haute température et de ce fait, a une meilleure résistance.

L'âge et le trafic accumulé sont deux variables souvent reliées, en particulier pour les routes à fort trafic (Skip Mix, $r = 0,8$ entre âge et trafic). Cependant, pour les échantillons analysés des autres mélanges, la corrélation âge-traffic est faible et presque négligeable.

Les effets du trafic sont notables sur les sections recouvertes de MB-4 recyclé et de Skip Mix car elles ont accumulé plus de trafic que les sections recouvertes d'autres types de mélanges, même si celles-ci sont plus anciennes. Les sections recouvertes de MB-4 recyclé et de Skip Mix sont souvent les plus fissurées ce qui explique la relation observée trafic-fissuration.

L'âge moyen est à peu près le même pour les quatre types de mélanges. Cependant, les mélanges de type MB-5, relativement plus vieux que les autres types de mélanges, ont connu moins de circulation et sont moins fissurés. Les sections ont aussi un orniérage moyen et souvent de type structural (corps de

chaussée), car le degré de déflexion des sections est de beaucoup supérieur à la moyenne.

La typologie des mélanges explique entre 10 et 35% de la variation observée. Cette typologie se résume à des variations notables des compositions granulométriques et des indices SSG et VAM, les teneurs en bitume ne présentant pas de différences significatives, à l'exception du Skip Mix. Ainsi, à l'exception des mélanges type Skip Mix qui sont très différents (passant no 50, no 200, teneur en bitume, SSG, VAM, etc.), les mélanges sont assez peu différenciés, ce qui peut expliquer le faible pourcentage de variation observé.

L'étude nous apprend par ailleurs que les meilleurs mélanges vis-à-vis de la fissuration sont moins bons vis-à-vis de l'orniérage, que les mélanges type MB-4 recyclé réagissent plus souvent comme des mélanges MB-5 que des mélanges de type MB-4 et qu'en général, ils ont un moins bon rendement vis-à-vis de la fissuration ou de l'orniérage.

Il n'existe donc pas de meilleurs mélanges car des facteurs extérieurs aux mélanges viennent de toute évidence influencer le rendement d'un type particulier.

Une bonne conception structurale de la chaussée, une protection adéquate contre le gel et un bon drainage jouent un rôle important dans le rendement des mélanges. D'autre part, l'adhérence n'est que peu reliée au type de mélange et la qualité du granulat disponible localement détermine, influence ce facteur.

Parmi les facteurs contrôlables par le choix du type de revêtement, le concepteur doit pondérer entre une bonne résistance à la fissuration ou à l'orniérage.

Pour une source de bitume donnée (indice de pénétration à peu près constant), la résistance dépendra de la classe du bitume utilisé ou des agents correcteurs (additifs, polymères) qui pourront améliorer la courbe viscosité- température du bitume original choisi. Le premier de ces facteurs est la nature et le type de filler, car il s'agit du premier type (ou seul type) d'additifs ajoutés au bitume.

La granulométrie des granulats et les facteurs contrôlant la stabilité forment la base de la formule du mélange choisi. Sa compactabilité à la température de service ($T > 30\text{ C}$) est primordiale pour obtenir une bonne résistance à l'orniérage.

Cette compactabilité est reliée à des facteurs internes (point de ramollissement du bitume et granularité des granulats), mais aussi à des facteurs externes (trafic en période chaude, épaisseur totale de la couche posée) qui affecteront la résistance du mélange. Le concepteur ne peut agir cependant que sur les facteurs internes.

La durabilité du mélange (durcissement du bitume, compactage par le trafic), dépend ensuite des conditions de pose et de la compacité atteinte lors de la construction. Si le compactage à la pose n'est pas suffisant, le mélange sera compacté par le trafic, ce qui provoque de l'orniérage. La perte de vides

variera entre 2 et 6% dans les traces de roues et produira une diminution de l'épaisseur de la chaussée équivalente.

Enfin, un mélange mal compacté vieillira toujours plus vite. Cependant, les courbes présentées montrent que la relation entre le vieillissement et le degré de compactage n'est pas tranchée. Les cinq premières années sont critiques dans l'évolution du bitume, celui-ci ne vieillissant presque plus après cette période.

L'étude nous apprend que le point d'inflexion dans la courbe d'évolution de l'orniérage survient après que le degré de fissuration transversale ait atteint un niveau presque limite (voir figure 1).

Cette observation est aussi appuyée par les bonnes corrélations trouvées entre l'orniérage et le degré de fissuration pour toutes catégories de mélange. Cela porte à croire qu'un contrôle de la fissuration influencera l'apparition ultérieure de l'orniérage qui peut, dans le cas des chaussées souples étudiées, devenir structural (infiltration d'eau et perte d'homogénéité de la dalle de revêtement), tout en s'ajoutant à l'usure et au compactage produits par le trafic répété.

Parmi les types de mélanges étudiés, l'analyse nous apprend que le mélange de type MB-5 est un mélange adéquat pour tous les types de chaussées. Le mélange de type MB-4 est le plus résistant à la fissuration et celui de type Skip Mix à l'orniérage. Ces deux derniers mélanges sont par contre moins résistants aux autres dommages où le mélange MB-5 excelle.

BIBLIOGRAPHIE

Laforte, Marc-Antoine; Performance relative des couches d'usure posées au Québec entre 1977 et 1985. Rapport final. Contrat de recherche numéro 1140-85-179. CRCAC (1986) Inc. Juin 1989

TABLEAU 1

ESSAIS DE LABORATOIRE

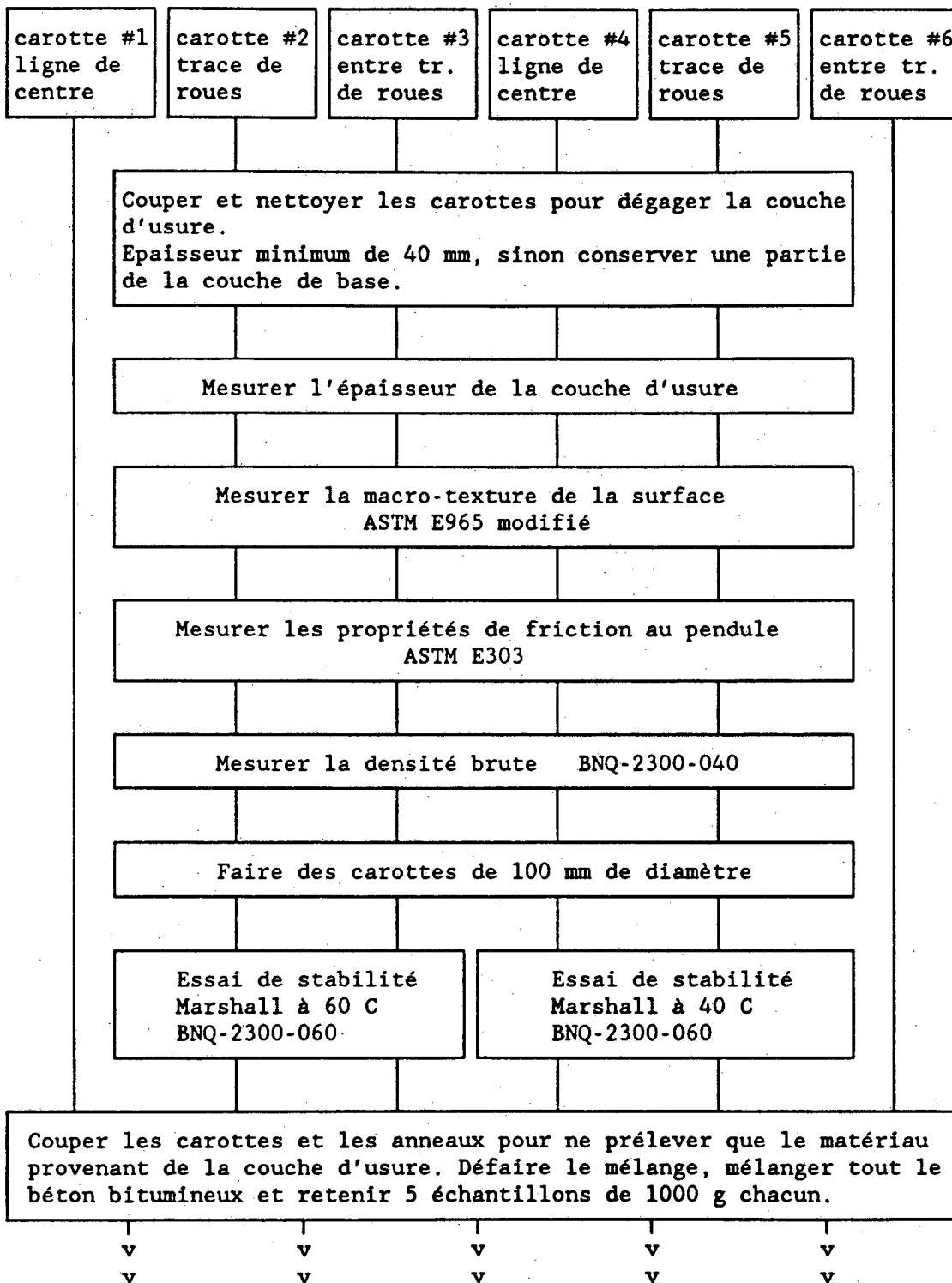
Organigramme des essais réalisés

TABLEAU 1 (suite)

ESSAIS DE LABORATOIRE

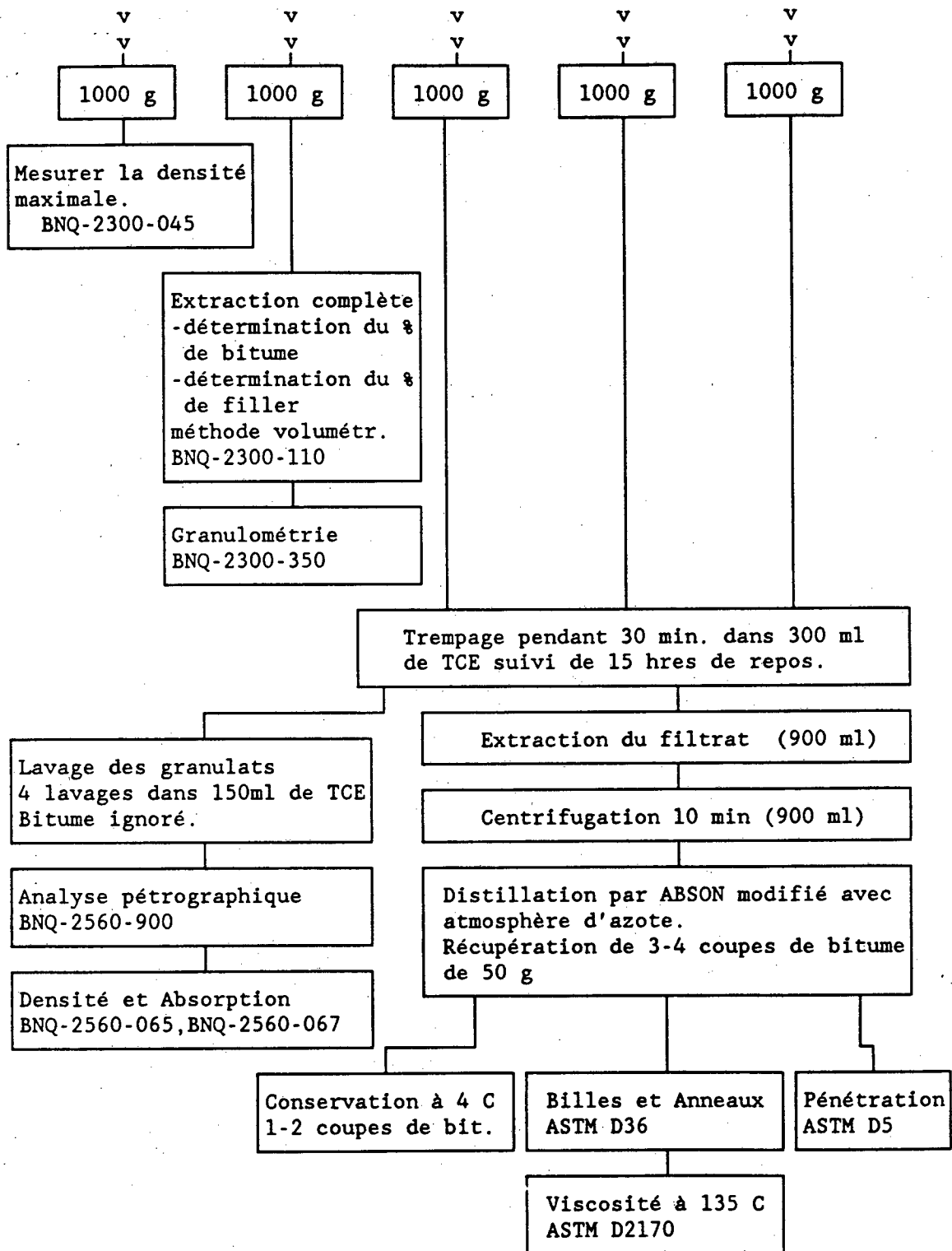
Organigramme des essais réalisés

TABLEAU 2
FACTEURS SIGNIFICATIFS TROUVES (*)
PAR L'ANALYSE DES TABLEAUX DE CORRELATION

ORNIERAGE MAXIMUM	FISSURES DANS LES TRACES DE ROUES	FISSURES LONGITUDINALES	FISSURES TRANSVERSALES
Mélange MB-5			
Orniérage moyen	Fissures longitudinales	Fissures en sentiers de	Péetrographie
Indice de gel	péetrographie	roues ou transversales	Fissures en traces
ECSES, log 10	% bitume		de roues ou
	Passant 0,300 mm		passant
	Passant 0,075 mm		0,300 mm
	Filler dans bitume		SSG
	récupéré SSG		
Mélange MB-4 recyclé			
Compression 60	Texture en TR	Texture en TR	Texture en TR
Orniérage moyen	Densité brute	BPN, TR	BPN, TR
% Compaction	BPN, TR	Stabilité 40 C	Orniérage
ECSES, log 10	Stabilité 40 C	Pente 60-40	Point de ramollis-
			sement
ECSES, x 1000	Compression -20	Point de ramollissement	Passant 0,300 mm
	Teneur en bitume	Penétration	
	% de compaction	Passant 0,075 mm	
	Tc du bitume		
	Teneur en bitume		
	Passant 0,075 mm		
	Filler dans bitume		
	récupéré		
	Fissures transversales		
Mélange MB-4			
Densité brute	Densité brute	Densité brute	Texture TR
Portance 40 C	Texture TR	Déflexion	Densité brute
Fissures longitu-			
dinales	Compression 60 C	BPN Fluage 60 C	Compression 40 C
ECSES, log 10	Uni moyen	Orniérage maximum	Compression -20 C
Passant 0,300 mm	ECSES, log 10	Bitume/fines	Uni
SSG	Epaisseur totale	Fissures Transversales	Penétration
			% de Compaction
			Indice de gel
			Passant 4,75 mm
			Passant 0,075 mm
Skip Mix			
Fluage 60 C	Densité brute	Compression	Portance 40°C
Stabilité 60 C	Orniérage moyen	Fluage 40 C	Pente 60-40
Portance 60 C	Fiss. longitudinales	ECSES, log 10	Compression -20°C
Passant 4,75 mm	Déflexion	Point de ramollissement	Stabilité 40°C
Passant 0,300 mm	Indice de gel	Indice de gel	
Bitume/fines		Passant 0,075 mm	

NOTES *: Analyse bi-variable, significatif à 1%

Coefficient requis > 0,6 pour MB-4, MB-4 rec et MB-5
 > 0,85 pour Skip Mix

TABLEAU 3ANALYSE DE VARIATION MULTIVARIABLES (ANOVA)

Variables	Somme des Carrés	Degré de Libertés	Variances	F _{test}
FISSURATION TRANSVERSALE				
AGE	0,08915	2	0,04458	3,126
PEN RES	0,054554	2	0,02728	1,913
INDICE GEL	0,03736	1	0,03736	2,620
MÉLANGES	0,08915	3	0,02972	2,084
RÉSIDUS	0,199637	14	0,01426	

TOTAL	0,46985			
 $r^2 = 0,5751$ $r_t = 4,35$				
FISSURATION TRANSVERSALE				
PEN RES	0,035011	2	0,01751	0,422
MÉLANGES	0,025445	3	0,00848	0,205
RÉSIDUS	0,206966	5	0,04139	

TOTAL	0,267422			
 $r^2 = 0,2661$ $r_t = 1,36$				
ORNIÉRAGE				
DÉFLEXION	0,38804	1	0,38804	0,793
SÉCURITÉ	0,53478	2	0,2647	0,539
MÉLANGE	0,51728	3	0,17242	0,351
RÉSIDUS	4,404	9	1,489	

TOTAL	5,844			
 $r^2 = 0,246$ $r_t = 1,71$				

TABLEAU 4ANALYSE DE VARIATION MULTIVARIABLES (ANOVA)

<u>Variables</u>	<u>Somme des</u>	<u>Degré de</u>	<u>Variances</u>	<u>F_{test}</u>
		<u>Carrés</u>	<u>Libertés</u>	
FISSURATION TRANSVERSALE				
AGE	0,0936614	2	0,04683	7,086
GRANULATS	0,1543013	1	0,15430	23,348
TRAFIC ECSES	0,0226296	2	0,01131	1,721
MÉLANGES	0,11621	3	0,03874	5,861
RÉSIDUS	0,1189567	18	0,00661	

TOTAL	0,505759			

$$r^2 = 0,76479$$

$$r_t = 7,65$$

FISSURATION LONGITUDINALE

AGE	0,116280	2	0,05814	1,792
GRANULATS	0,050681	1	0,05068	1,562
TRAFIC ECSES	0,0128011	2	0,00640	0,197
MÉLANGES	0,045147	3	0,015049	0,463
RÉSIDUS	0,4541882	14	0,03244	

TOTAL	0,679097			

$$r^2 = 0,33119$$

$$r_t = 2,63$$

TABLEAU 5CORRELATIONS DES PARAMETRES DU BITUME

Les équations suivantes ont été développées par ré- gression pour évaluer les paramètres relatifs au bitume ré- cupéré connaissant l'un d'entre eux (tous types de bitume confondus).

- 1) Point de ramollissement R & B (C), voir figure 20.

$$R \& B = 33.0139 \frac{450}{Pen}^{0.2264} \quad r^2 = 0.9221$$

- 2) Température critique Tc (C), voir figure 21.

$$Tc = -49.9 + 0.672 R \& B \quad r^2 = 0.664$$

$$Tc = -5.65588 - 0.13958 Pen \quad r^2 = 0.785$$

$$Tc_{\text{valeur absolue}} = 8.677 E-6 Pen^{1.212} R\&B^{2.364} \quad r^2 = 0.836$$

$$Tc_{\text{valeur absolue}} = 0.9812 Pen^{0.677} \quad r^2 = 0.795$$

TABLEAU 6CORRELATIONS DES PARAMETRES DU BITUME

$$(\% \text{ vides}) = 9.220035 - 2.43407 \log \text{ECSES} + 0.193163 \text{ R \& B}$$

$$r^2 = 0.618$$

$$\text{d.l.} = 36$$

$$(\% \text{ vides}) = 8.103438 - 2.66473 \log \text{ECSES} + 0.209797 \text{ R\&B} + 0.010656 \text{ épais. (mm)}$$

$$r^2 = 0.658$$

$$\text{d.l.} = 35$$

$$(\% \text{ vides}) = 1.877590 - 1.9567 \log \text{ECSES} + 0.191254 \text{ R\&B} + 0.059801 (\text{pass. \#4})$$

$$r^2 = 0.675$$

$$\text{d.l.} = 35$$

$$(\% \text{ vides}) = 0.08779 + 150.833 \text{ pente}$$

$$r^2 = 0.347$$

$$\text{d.l.} = 38$$

TABLEAU 7

**ASSOCIATION ENTRE LA COMPACTITE
ET LA PENETRATION RESIDUELLE**

<u>Pourcentage de compactage</u>	<u>Pénétration résiduelle</u>		
	<u>< 50</u>	<u>50 à 100</u>	<u>> 100</u>
92%	0,6	-	-
95%	2,0	0,6	-
98%	3,5	2,0	0,7
100%	5,0	3,5	1,8 *

Note *: Portance résiduelle à 40 C.

TABLEAU 8

CORRELATIONS GENERALES LES PLUS SIGNIFICATIVES
VIS-A-VIS DES CRITERES DE PERFORMANCE

1) **Fissuration transversale**(en m lin./m² de surface, toutes catégories).

MB-4

$$-0.26212 - 0.00086 \text{ Pen Res} + 0.00594 \text{ passant \#4.}$$

$$r^2 = 0.878$$

$$\text{d.l.} = 4$$

$$-0.53583 + 0.004763 \text{ passant \#4} + 0.005569 \text{ R\&B}$$

$$r^2 = 0.897$$

$$\text{d.l.} = 4$$

$$2.194351 - 0.00007 \text{ Pen Res} - 0.00873 \text{ âge} - 0.02836 \% \text{ comp.}$$

$$r^2 = 0.741$$

$$\text{d.l.} = 3$$

$$0.008087 \text{ Tc} + 0.198965$$

$$r^2 = 0.512$$

$$\text{d.l.} = 5$$

MB-5

$$0.35506 - 0.0310 \log \text{ECSES} + 0.01053 \text{ pass. \#50} - 0.0036 \text{ R\&B} + 0.00756 \text{ Tc}$$

$$r^2 = 0.632$$

$$\text{d.l.} = 13$$

$$0.82394 - 0.0022 \text{ Pen Res} - 0.0295 \log \text{ECSES} + 0.01077 \text{ pas. \#50}$$

$$- 0.0110 \text{ R\&B} + 0.00393 \text{ Tc}$$

$$r^2 = 0.683$$

$$\text{d.l.} = 12$$

TABLEAU 8 (suite)

MB-4 recyclé, même âge

- 1.8158 - 0.04366 R&B + 0.09639 % Bit. + 0.01204 pass. #4
- 0.2062 (Bit.) - 0.0007 SG
fines

$$r^2 = 0.956$$

$$d.l. = 3$$

- 1.4556 + 0.03909 R&B + 0.01275 passant #4 - 0.00121 SSG
- 0.0139 passant #50

$$r^2 = 0.941$$

$$d.l. = 4$$

- 1.0733 + 0.2238 R&B

$$r^2 = 0.547$$

$$d.l. = 7$$

2)

Fissuration longitudinale

(m lin./m², toutes catégories.

MB-4:

- 1.8094 + 0.01495 âge + 0.22305 logECSES+ 0.00196 R&B +
0.021 D₉₈ + 0.00070 compression.

$$r^2 = 0.9033$$

$$d.l. = 2$$

MB-4 recyclé (même âge):

- 2.8907 - 0.1609 logECSES+ 0.09386 R&B - 0.0033 compression

$$r^2 = 0.663$$

$$d.l. = 5$$

TABLEAU 8 (suite)

MB-5:

-8.9088 + 0.03752 Age + 1.13826 logECSES + 1.62135 log compression
+ 0.00169 SSG

$$r^2 = 0.693$$

$$d.l. = 13$$

3)

Orniérage
(maximum en cm)

MB-4:

-77.95 - 0.014 Pen Res - 0.257 âge + 0.7342 % compaction
+ 1.7666 % Bit.

$$r^2 = 0.859$$

$$d.l. = 2$$

-20.710 - 0.0260 âge + 2.58921 logECSES+ 0.03298 R&B + 2.02
D₉₈ + 0.00491 SSG

$$r^2 = 0.903$$

$$d.l. = 2$$

MB-4 recyclé (même âge)

-12.6764 - 0.7415 % bit. - 0.0061 SSG + 0.7104 log ECSES.

$$r^2 = 0.946$$

$$d.l. = 5$$

-8.5859 + 1.40142 log ECSES - 0.0820 R&B + 0.00701 SSG

$$r^2 = 0.961$$

$$d.l. = 5$$

TABLEAU 8 (suite)

MB-5

-10.01 + 2.1353 logECSES - 0.088 Age - 0.088 R&B + 0.7995
 % Bit. - 0.00484 SSG - 0.022 Pen Res + 0.102 (pass. #200)

$$r^2 = 0.7736$$

$$d.l. = 8$$

$$\text{orniérage} = 9.312^B - 3.9556$$

1 000 000

$$r^2 = 0.474$$

$$d.l. = 16$$

LEGENDE

Tc:	Température critique du bitume
Pén Rés:	Pénétration du bitume récupéré
R&B:	Température au point de ramollissement
Age:	Age en 1988
ECSES:	Equivalent de charge par essieu simple 80 kN
% Bit.:	Teneur en bitume
Pass. no4:	Pourcentage passant 4.75 mm
Pass. no50:	Pourcentage passant 0,300 mm
Pass.no200:	Pourcentage passant 0,075 mm
SSG:	Surface spécifique, en m ² /N
D ₉₈ :	Déflexion caractéristique, en mm.
% comp.	Degré de compactage relatif (densité mesurée/ densité maximum)%
B	Exposant de l'équation granulométrique
d.l.	Degré de libertés

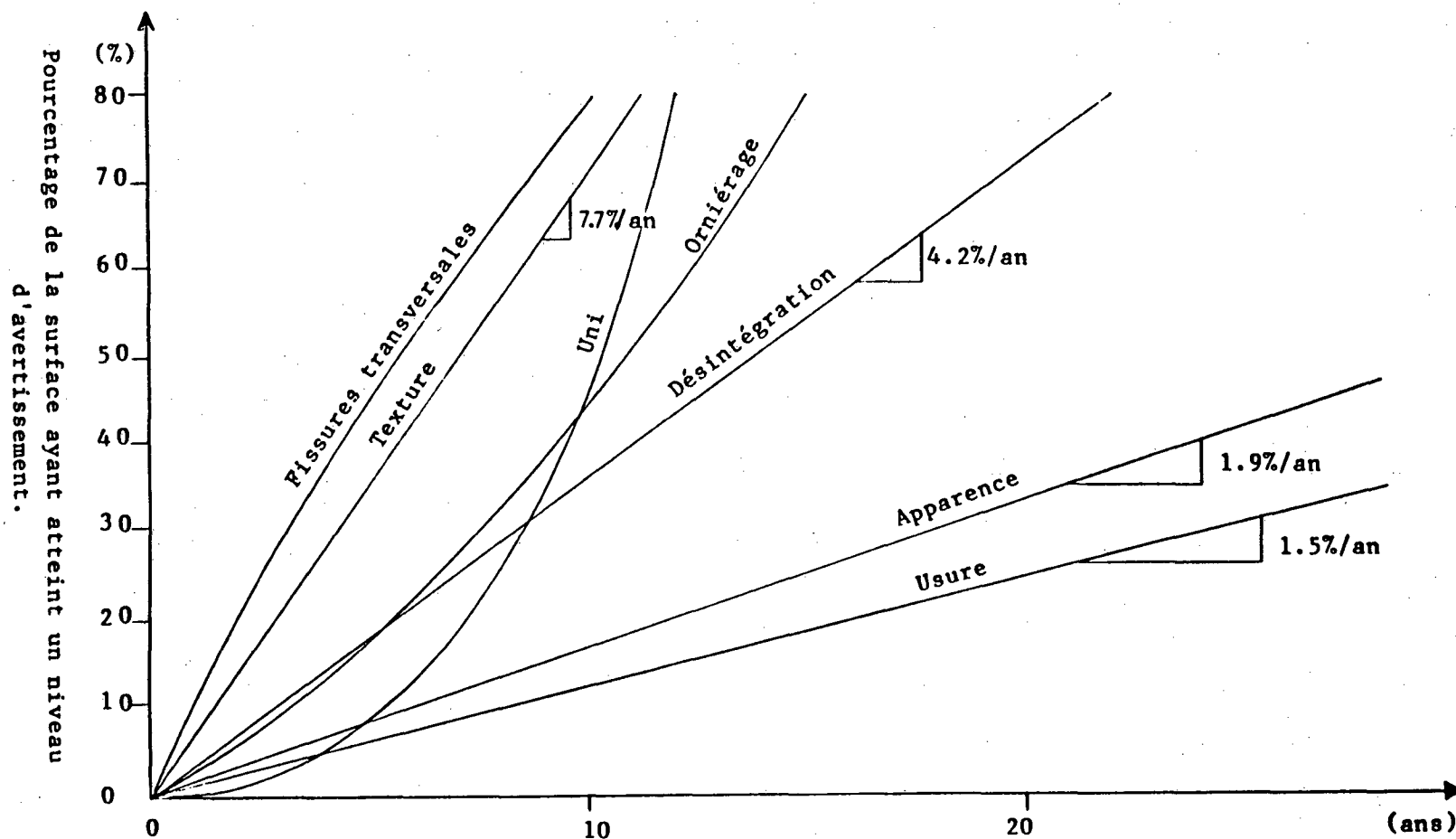
TABLEAU 9

MATRICE DE CORRELATION RELATIVE AUX CRITERES
DE PERFORMANCE ET AUX CARACTERISTIQUES GENERALES
DES MELANGES OU DE L'ENVIRONNEMENT

	COEFFICIENT DE REGRESSION AU CARRE				
	Mélange	Bitume	Stabilité	Age/ trafic	Environ- nement:
Orniérage	0.253	0.013	0.195	0.111	0.123
Fissures dans les traces de roues	0.321	0.082	0.391	0.034	0.147
Fissuration longitudinales	0.304	0.064	0.242	0.131	0.178
Fissures transversales	0.332	0.113	0.270	0.156	0.236
Degré de libertés	27	36	29	37	35

Note: toutes sections confondues, n = 40.

Figure 1: Tendence observée vis-à-vis l'évolution des défauts relevés dans 112 sections ayant 203 km de longueur.



NOTES: Équations:

1. $Uni = \log (\%/an) = 0,198T - 0,306.$
2. $Orniérage = \log (\%/an) = 0,122 T + 0,328.$

Figure 2 : Relation entre les diverses populations étudiées lors du relevé global ou détaillé

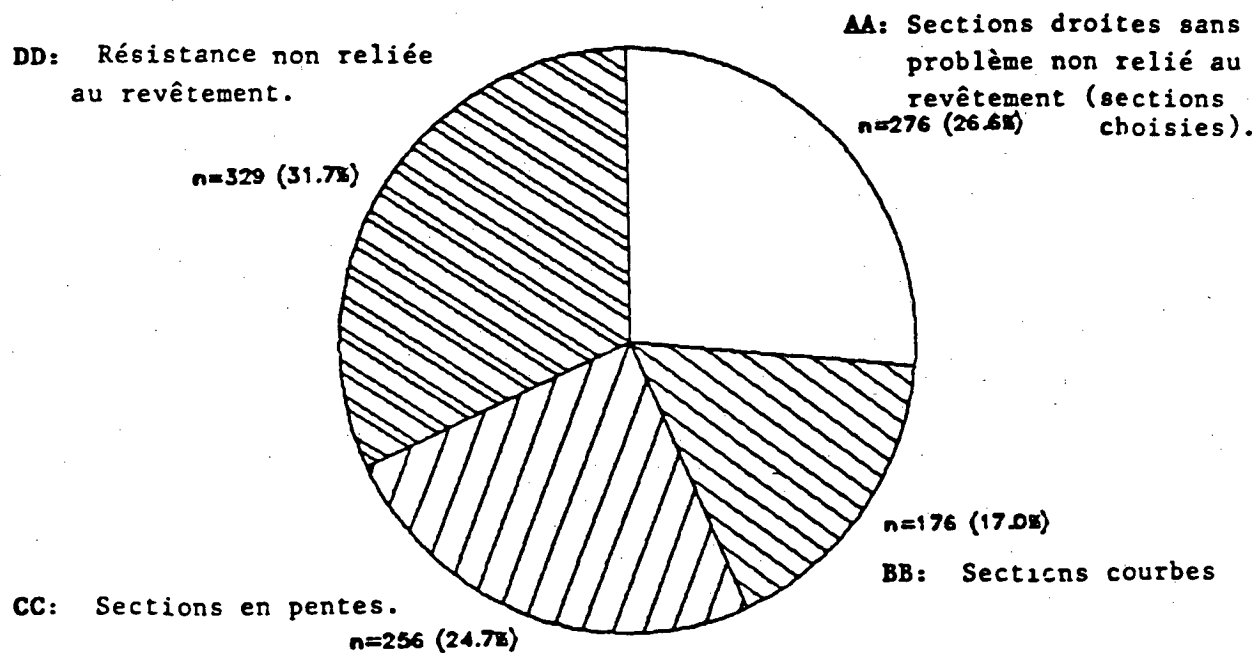


Figure 3: Tendence observée selon l'âge, la pénétration originale et l'indice de vides mesuré sur les échantillons prélevés (40 sections)

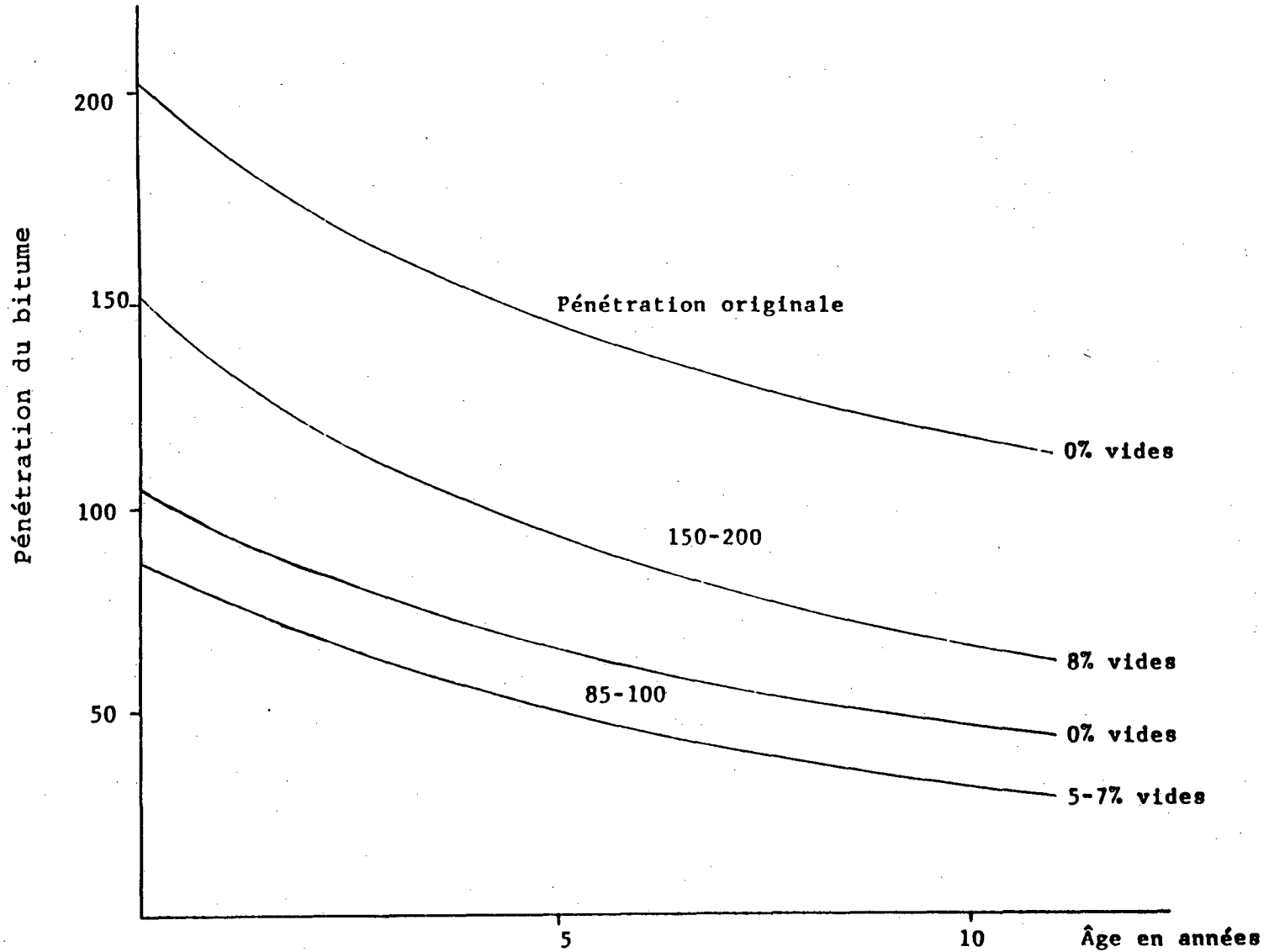
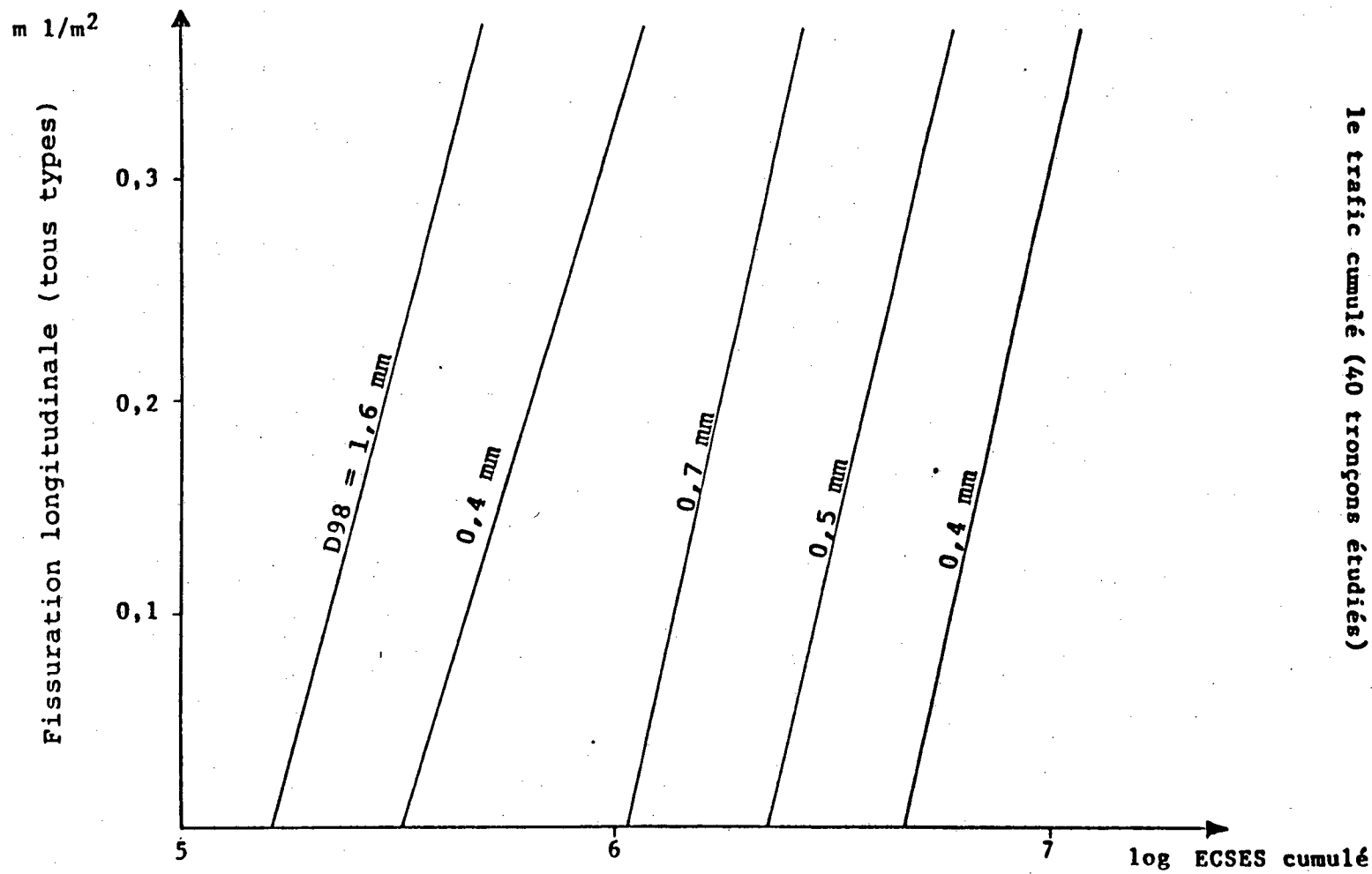


Figure 4 : Relation notée entre le degré de fissuration longitudinale, la déflexion caractéristique et le trafic cumulé (40 tronçons étudiés)





Gouvernement du Québec
**Ministère
des Transports**

