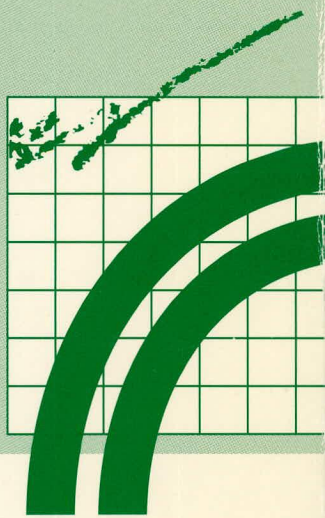


ÉTUDES ET
RECHERCHES
EN TRANSPORTS

**INFLUENCE DE LA FRACTION DE SABLE ($80\ \mu\text{m}$ -2,5 mm)
DES GRANULATS ET DU FILLER MINÉRAL ($< 80\ \mu\text{m}$)
SUR LA RÉSISTANCE À L'ORNIÉRAGE
DES CHAUSSÉES ROUTIÈRES**

MARC-ANDRÉ BÉRUBÉ
MICHEL PARADIS

ESSAIS
ET MATÉRIAUX



CANQ
TR
PT
IT
173

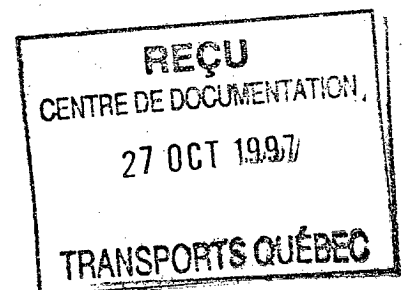
Québec 

462 292

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

**INFLUENCE DE LA FRACTION DE SABLE (80 μ m-2,5 mm)
DES GRANULATS ET DU FILLER MINÉRAL (< 80 μ m)
SUR LA RÉSISTANCE À L'ORNIÉAGE
DES CHAUSSÉES ROUTIÈRES**

CANQ
TR
PT
IT
173



La présente recherche a été préparée par le Département de géologie et de génie géologique de la Faculté des sciences et de génie, à l'Université Laval:

Auteurs

Marc-André Bérubé
Michel Paradis

Collaboration

Pierre Langlois, ministère des Transports du Québec
Guy Tremblay, ministère des Transports du Québec
Jean-Pierre Tremblay, Université Laval
Marius Roy, Université Laval
Pierre Larochelle, Université Laval



FICHE ANALYTIQUE
DE RAPPORT

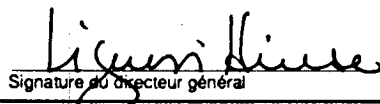
Titre et sous-titre du rapport INFLUENCE DE LA FRACTION DE SABLE (80 µm - 2,5 mm)				N° du rapport Transports Québec RTQ-97-02		
DES GRANULATS ET DU FILLER MINÉRAL (80 µm) SUR LA				Rapport d'étape ☐ An Mois Jour		
RÉSISTANCE À L'ORNIÉPAGE DES CHAUSSÉES ROUTIÈRES				Rapport final ☒ 1997 09 29		
Auteur(s) du rapport Marc-André Bérubé et Michel Paradis				N° du contrat (RRDD-AA-CCXX)		
Chargé de projet				Date du début d'étude Date de fin d'étude		
Coût de l'étude						
Etude ou recherche réalisée par (nom et adresse de l'organisme) Département de géologie et de génie géologique Faculté des sciences et de génie Université Laval Sainte-Foy (Québec) G1K 7P4				Etude ou recherche financée par (nom et adresse de l'organisme) Ministère des Transports du Québec Service des matériaux de chaussées 2700, rue Einstein Sainte-Foy (Québec) G1P 3W8		
But de l'étude, recherche et renseignements supplémentaires Cette étude a pour objet de déterminer l'influence de la fraction 80 µm - 2,5 mm des granulats sur la résistance à l'orniérage des enrobés bitumineux.						
Résumé du rapport L'orniérage peut être défini par la déformation permanente de la chaussée qui se crée sous le passage répété des roues. Il peut être associé à l'instabilité de l'enrobé, à l'usure du revêtement ou à la capacité structurale insuffisante de la chaussée. Ce phénomène est fréquemment observé sur les routes à fort trafic ou sur celles où circulent un pourcentage élevé de véhicules lourds. Les caractéristiques suivantes de l'enrobé peuvent être en partie responsables de la formation d'ornières par fluage : le pourcentage et la qualité du bitume, le pourcentage de vide, la granulométrie et la qualité des granulats. Plusieurs caractéristiques de la fraction 0 - 2,5 mm du granulat fin de l'enrobé ont fait l'objet d'une analyse afin de connaître davantage leur influence sur la résistance à l'orniérage des enrobés : le type de filler (0 - 80 µm), la teneur en filler (angularité), la texture superficielle (rugosité) et la porosité de la fraction 80 µm - 2,5 mm. Les paramètres liés au bitume (type 80 - 100, pourcentage de 5 %) et au mélange (granulométrie, compacité de 95%) sont demeurés constants tout au long de l'étude. Principaux résultats Il s'avère que l'orniérage résulte d'une combinaison de plusieurs facteurs. Pour les dix granulats analysés, la profondeur des ornières a tendance à diminuer si la résistance à l'usure et à la fragmentation des gros granulats est bonne, si la rugosité de surface des particules de sable est forte, si la forme des particules n'est pas sphérique ou cubique, si le coefficient d'écoulement est élevé et si le granulat absorbe bien le bitume. Le coefficient de corrélation est faible pour chaque paramètre pris séparément, mais atteint une valeur de $r = 0,86$ à $0,89$ pour certaines combinaisons de ces paramètres. L'influence plus grande d'un facteur, par rapport à un autre facteur, sur le comportement à l'orniérage dépend de l'ensemble des caractéristiques du granulat. Il semble préférable d'utiliser un filler de même composition minéralogique que la fraction de sable et ayant un indice de plasticité faible.						
Nbre de pages 121	Nbre de photos 22	Nbre de figures 33	Nbre de tableaux 9	Nbre de références bibliographiques	Langue du document ☒ Français ☐ Anglais	Autre (spécifier)
Mots-clés Chaussée ; Coefficient d'écoulement ; Coefficient de corrélation Enrobé ; Filler ; Fraction de sable ; Granulat ; Granulométrie ; Orniérage.				Autorisation de diffusion ☒ Diffusion autorisée ☐ Diffusion interdite  Signature du directeur général 97-09-25 Date		

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES PHOTOS	xi
INTRODUCTION	1
REVUE DE LA DOCUMENTATION	3
Causes de l'orniérage	3
Mécanisme de formation des ornières	5
Granulats grossiers	6
Granulats fins	8
PÉTROGRAPHIE DES GRANULATS	11
Localisation géographique des granulats	11
Description pétrographique	11
TRAVAUX D'ANALYSE D'IMAGES (FORME ET RUGOSITÉ)	31
Microscopie électronique à balayage et analyse d'images	31
Paramètres mesurés	32
Séparation et élimination des particules parasites	34
ESSAIS DE CARACTÉRISATION PHYSICO-MÉCANIQUE ET D'ORNIÉRAGE ..	37
Essais physico-mécaniques	37
Résistance à l'abrasion (essai Los Angeles) (BNQ 2560-400)	37
Abrasion (essai Micro-Deval humide) (BNQ 2560-070)	38
Détermination du coefficient d'écoulement des granulats fins (BNQ 2560-075) ..	38
Durabilité au sulfate de magnésium (BNQ 2560-450)	39
Absorptivité et surface spécifique	39
Essai avec le bleu de méthylène (BNQ 2560-255)	39
Essai avec l'éthylène glycol	42
Microporosimétrie (absorption du mercure)	44
Densité et absorptivité (BNQ 2560-065-067)	44
Essais à l'orniéreur	45
Conception du mélange	45
Fabrication des plaques de béton bitumineux	47
Essais	47
DISCUSSION DES RÉSULTATS	53
Caractéristiques texturales et morphologiques mesurées au MEB	53
Circularité	53
Rugosité	53
Rapport de forme	54

Rapport des périmètres (réel/convexe)	54
Essais physico-mécaniques	57
Abrasion (essai Los Angeles)	57
Abrasion (essai Micro-Deval humide)	57
Coefficient d'écoulement	57
Durabilité au sulfate de magnésium ($MgSO_4$)	59
Absorptivité et surface spécifique	59
Valeur au bleu de méthylène	59
Éthylène glycol	61
Microporosimétrie (absorption du mercure)	61
Absorptivité (eau)	63
Comparaison des résultats d'absorptivité et de surface spécifique	63
Résumé de l'influence individuelle des paramètres considérés	65
Combinaison de paramètres	65
Choix des paramètres	65
Relation analytique	68
Comparaison des résultats obtenus au MEB et avec le coefficient d'écoulement . . .	70
Effets des fillers	75
Revue des granulats	79
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	83
Conclusions	83
Recommandations	85
BIBLIOGRAPHIE	87
 ANNEXE A Programmes informatiques	
 ANNEXE B Résultats obtenus au MEB	
 ANNEXE C Courbe granulométrique du mélange	
 ANNEXE D Formules des mélanges	
 ANNEXE E Résultats d'orniérage bruts	

LISTE DES FIGURES

Figure 1A	Enrobé ne montrant pas d'orniérage excessif	7
Figure 1B	Enrobé montrant un orniérage excessif	7
Figure 2	Provenance des granulats	12
Figure 3	Résumé des fonctions utilisées au MEB	35
Figure 4	Caractéristiques des mélanges utilisés	46
Figure 5	Conditions d'essai pour l'orniéreur	49
Figure 6	Principe de l'appareil utilisé	49
Figure 7	Orniérage en fonction du nombre de cycles (filler calcaire)	52
Figure 8	Orniérage en fonction du nombre de cycles (filler de même composition que le sable)	52
Figure 9	Profondeur d'ornière versus circularité	55
Figure 10	Profondeur d'ornière versus rugosité	55
Figure 11	Profondeur d'ornière versus rapport de forme	56
Figure 12	Profondeur d'ornière versus rapport des périmètres (réel/convexe)	56
Figure 13	Profondeur d'ornière versus pertes à l'essai Los Angeles	58
Figure 14	Profondeur d'ornière versus pertes à l'essai Micro-Deval humide	58
Figure 15	Profondeur d'ornière versus coefficient d'écoulement	59
Figure 16	Profondeur d'ornière versus pertes au $MgSO_4$	60
Figure 17	Profondeur d'ornière versus valeur au bleu	60
Figure 18	Profondeur d'ornière versus adsorption de l'éthylène glycol	62
Figure 19	Profondeur d'ornière versus microporosité	62
Figure 20	Profondeur d'ornière versus absorption de l'eau	63
Figure 21	Valeur au bleu versus adsorption de l'éthylène glycol	67

Figure 22	Valeur au bleu versus adsorption de l'éthylène glycol (sans GRL et SCO)	67
Figure 23	Profondeur d'ornièrre versus multiplication de paramètres (filler calcaire constant)	69
Figure 24	Profondeur d'ornièrre versus multiplication de paramètres (filler de même composition que le sable)	69
Figure 25	Coefficient d'écoulement versus circularité	72
Figure 26	Coefficient d'écoulement versus rapport de forme	72
Figure 27	Coefficient d'écoulement versus rugosité	73
Figure 28	Coefficient d'écoulement versus rapport des périmètres	73
Figure 29	Profondeur d'ornièrre versus multiplication de paramètres (filler calcaire constant)	74
Figure 30	Profondeur d'ornièrre versus multiplication de paramètres (filler de même composition que le sable)	74
Figure 31	Comparaison de la résistance à l'orniérage en fonction du type de filler utilisé dans les mélanges (30 000 cycles)	77
Figure 32	Comparaison des profondeurs d'ornièrre versus l'indice de plasticité pour des fillers de même composition que le sable (FD) et pour un filler calcaire constant (FC)	78
Figure 33	Relation entre les profondeurs d'ornièrre et l'indice de plasticité pour des fillers de même composition que le sable (FD)	78

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Abréviations employées pour les granulats	13
Tableau 2	Description pétrographique des dix granulats	16
Tableau 3	Analyse chimique des dix granulats	17
Tableau 4	Résultats obtenus au MEB pour les facteurs de forme et de rugosité	35
Tableau 5	Résultats des essais physico-mécaniques	40
Tableau 6	Résultats des essais d'absorptivité et de surface spécifique	43
Tableau 7	Profondeurs d'ornièrre (mm) à 17 000 et à 30 000 cycles pour les deux séries de plaques (fillers différents et filler calcaire constant)	51
Tableau 8	Facteurs de corrélation entre les différents paramètres	64
Tableau 9	Caractéristiques des fillers minéraux	76

LISTE DES PHOTOS

Photo 1	Gravier granitique de Lac-Saint-Charles (L.N.)	21
Photo 2	Gravier granitique de Lac-Saint-Charles (L.P.)	21
Photo 3	Calcaire de Charlesbourg (L.N.)	22
Photo 4	Calcaire de Charlesbourg (L.P.)	22
Photo 5	Grès de Saint-Jean-Chrysostome (L.N.)	23
Photo 6	Grès de Saint-Jean-Chrysostome (L.P.)	23
Photo 7	Gravier lithique de Saint-Victor-de-Beauce (L.N.)	24
Photo 8	Gravier lithique de Saint-Victor-de-Beauce (L.P.)	24
Photo 9	Scorie d'acier de Contrecoeur (L.N.)	25
Photo 10	Scorie d'acier de Contrecoeur (L.P.)	25
Photo 11	Phonolite de Varennes (L.N.)	26
Photo 12	Phonolite de Varennes (L.P.)	26
Photo 13	Syénite à néphéline de Mont-Saint-Hilaire (L.N.)	27
Photo 14	Syénite à néphéline de Mont-Saint-Hilaire (L.P.)	27
Photo 15	Cornéenne du Parc de conservation du Mont-Saint-Bruno (L.N.)	28
Photo 16	Cornéenne du Parc de conservation du Mont-Saint-Bruno (L.P.)	28
Photo 17	Schiste à quartz-chlorite-épidote de Sherbrooke (L.N.)	29
Photo 18	Schiste à quartz-chlorite-épidote de Sherbrooke (L.P.)	29
Photo 19	Dolomie gréseuse de Coteau-du-Lac (L.N.)	30
Photo 20	Dolomie gréseuse de Coteau-du-Lac (L.P.)	30
Photo 21	Microscope électronique à balayage et analyseur d'images	31
Photo 22	Ornièreur du type LPC	48

INTRODUCTION

L'orniérage est un problème que l'on rencontre fréquemment sur les routes du Québec où l'on utilise l'enrobé bitumineux comme revêtement des chaussées. De nombreuses études ont été réalisées sur le sujet, mais le problème de l'orniérage se révèle très complexe, et il existe plusieurs causes possibles pour expliquer le comportement des enrobés bitumineux dans ce cas précis.

L'orniérage peut être défini par la déformation permanente longitudinale de la chaussée qui se crée sous le passage répété des roues (Tessier, 1990). C'est donc la diminution relative de la chaussée mesurée dans le sentier des pneumatiques. On peut rencontrer ce phénomène principalement sur les routes où le trafic est très important et où les véhicules lourds abondent. En effet, c'est surtout le trafic lourd qui modifie le plus les conditions routières. Les principales causes de l'orniérage sont expliquées au chapitre *Revue de la documentation*. Il est à noter que l'orniérage, s'il n'est pas corrigé, peut mener à la fissuration ainsi qu'à l'aquaplanage (accumulation d'eau dans les ornières provoquant une perte de maîtrise du véhicule).

L'objectif premier de la présente recherche consiste à établir les caractéristiques des granulats, et plus précisément ceux de la fraction de sable comprise entre 80 μm et 2,5 mm (dimension du sable), qui sont les plus influentes pour ce qui est de la résistance à l'orniérage. L'influence des fillers minéraux sera également vérifiée. Le deuxième objectif est de définir une méthode pour la caractérisation des facteurs de forme et de rugosité à l'aide du microscope électronique à balayage couplé avec un analyseur d'images. Il sera possible ensuite de comparer ces résultats avec ceux qui sont obtenus avec l'essai en laboratoire d'écoulement des granulats.

En outre, une analyse plus poussée sera effectuée en ce qui a trait, surtout, aux caractéristiques des granulats fins utilisés pour la conception des mélanges bitumineux. L'effet des fillers minéraux sera également vérifié. Pour mener à bien la recherche, un total de dix granulats provenant de différentes régions du Québec ont été échantillonnés et, par la suite, tamisés afin d'obtenir des pourcentages précis pour chaque tranche granulométrique entrant dans les mélanges.

Dans un premier temps, l'analyse de paramètres de rugosité et de forme des granulats fins a été effectuée à l'aide du microscope électronique à balayage. Ainsi, la méthode de calcul des facteurs de forme et de rugosité des dix granulats sélectionnés a pu être définie.

Dans un deuxième temps, des tests physico-mécaniques décrivant la résistance des granulats à différents points de vue, tels que la ténacité, la dureté et l'absorptivité, ont été réalisés. La forme et la rugosité des granulats ont été également évaluées indirectement par l'essai portant sur le coefficient d'écoulement. Les caractéristiques d'absorptivité et de surface spécifique proviennent d'essais faits avec différents produits, soit avec l'eau (absorptivité), le bleu de méthylène (surface spécifique), l'éthylène glycol (surface spécifique) et le mercure (microporosimétrie).

Ainsi, une vérification de l'influence de toutes ces caractéristiques sera effectuée en les comparant aux profondeurs d'ornièrre mesurées au cours d'essais à l'ornièrre. Ces essais serviront donc à connaître les comportements des mélanges bitumineux testés dans les conditions routières les plus difficiles, c'est-à-dire à des températures élevées et en tenant compte du trafic lourd.

Causes de l'orniérage

Il existe plusieurs causes de la formation d'ornières sur les chaussées, et ce problème peut être en raison de la combinaison de facteurs différents. La majorité des chercheurs et des auteurs dressent sensiblement la même liste et, parmi les principales causes, les caractéristiques du trafic routier moderne et la pression des pneus jouent un rôle important. En effet, les chargements excessifs des véhicules lourds (surtout en période de dégel) et une pression trop élevée des pneus peut endommager sévèrement non seulement l'état des revêtements, mais aussi celui des fondations et sous-fondations routières.

L'orniérage peut se présenter selon deux aspects : les ornières à faible rayon et les ornières à grand rayon. Durand (1993) donne les causes probables pour chaque type d'ornière. Une couche d'enrobé à stabilité insuffisante, des sollicitations élevées par le trafic lourd et un compactage inadéquat de l'enrobé au moment de sa mise en place peuvent amener la formation d'ornières à faible rayon. Les ornières à grand rayon sont plutôt causées par des sollicitations élevées par le trafic, une capacité structurale insuffisante de la chaussée, un manque de compactage dans les couches de gravier et un drainage inadéquat.

Brown, Crawley et McRae (1989), Brown (1990) ainsi que Brown et Parker (1991) ont établi une liste des facteurs pouvant conduire à l'orniérage en ce qui a trait au mélange bitumineux. Parmi ceux-ci, on retrouve des teneurs en bitume trop élevées, une utilisation excessive de sable naturel ou de matériel passant le tamis de 80 μm , un concassage insuffisant ou inadéquat des particules, une taille maximale trop petite de granulats et une densité trop basse du mélange posé sur le terrain. Ces auteurs mentionnent également que le degré d'orniérage varie géographiquement selon la quantité et la qualité des granulats disponibles dans chaque région. Divers autres facteurs ont été également relevés : une température relativement basse de fonctionnement des usines de béton bitumineux, un taux d'humidité excessif, une forte susceptibilité du bitume aux changements de température, de même que la pose du revêtement à une température trop froide, ce qui mène à une densité trop faible pour le mélange en place.

Dans son chapitre sur les dégradations routières, Tessier (1990) nomme d'autres causes possibles de l'orniérage : le tassement des matériaux de fondation et du revêtement par la circulation concentrée dans les sentiers des roues, le compactage insuffisant et l'instabilité des matériaux, la faiblesse du sol support et, finalement, l'usure provoquée par les différents types de pneus (surtout les pneus à crampons). Par ailleurs, plusieurs chercheurs ont établi que la forme et la granulométrie des granulats, la quantité, la qualité et le grade du bitume sont également des facteurs importants en rapport avec la résistance à l'orniérage, sans oublier l'importance du contrôle de la qualité pendant la construction pour ainsi pourvoir à une compaction adéquate. D'ailleurs, d'importantes déformations et une fissuration précoce se manifesteront avec des compactages marginaux ou inadéquats. Les mélanges qui montrent de bonnes résistances à l'orniérage demandent de plus grands efforts de compactage, donc il faut un plus grand nombre de passages ou de plus gros engins de compactage couplés à des températures de mélanges plus hautes, ce qui aura pour effet de faciliter la compaction.

Dans leurs recherches effectuées dans l'ouest des États-Unis, Bentenson, Kruegler et Mounce (1985) classent les problèmes de l'orniérage selon trois catégories : la consolidation excessive dans la partie supérieure du revêtement par le trafic ; la déformation plastique causée par la stabilité insuffisante du mélange ; et, l'instabilité causée par le glissement et l'arrachement des couches de béton bitumineux (*stripping*). Les auteurs mentionnent aussi que, pour remédier à ces problèmes, l'on doit utiliser des mélanges appropriés, des systèmes structuraux convenables et exercer un contrôle étroit de la qualité pendant le processus de construction (en ce qui concerne l'élimination du processus de consolidation et des déformations plastiques causées par le trafic). Pour ce qui est du glissement et du manque de cohésion entre deux couches asphaltiques, ils recommandent de diminuer l'exposition du mélange à l'humidité, soit par compaction, par étanchéité ou par un drainage adéquat.

Dans plusieurs autres études, notamment celle de Button, Lytton et Perdomo (1990), les chercheurs concluent majoritairement que l'utilisation de granulats aux formes arrondies et présentant des textures lisses contribuent fortement à la formation d'ornières. Brown et Parker (1991) affirment qu'une granulométrie adéquate, qu'un granulat anguleux, qu'une sélection judicieuse des caractéristiques recherchées pour le béton bitumineux ainsi que des teneurs appropriées en bitume produisent des mélanges bitumineux non seulement résistants à l'orniérage mais également durables et résistants à la fatigue et à la fissuration thermique. À long terme, il faut s'attendre à ce que le trafic lourd, les charges permises et la pression des pneus ne soient pas diminués. D'ailleurs, selon les statistiques, aux États-Unis, 65 % des véhicules routiers soumis à des vérifications affichent un degré de pression

dans les pneus excédant les normes proposées par l'*American Association of State Highway and Transportation Officials*.

Il faudra donc voir à augmenter la résistance des mélanges bitumineux. Cette dernière solution doit être appliquée avec prudence, car des changements bénéfiques pour certaines propriétés peuvent être désastreux pour d'autres. Brown et Parker (1991) citent des exemples types à cet égard. Ainsi, la diminution de la teneur en bitume s'avère bénéfique en ce qui concerne la résistance à l'orniérage, par contre, la résistance à la fatigue en sera diminuée. Dans la même lignée, une augmentation de la viscosité du bitume donnera peut-être un mélange plus rigide, plus résistant à l'orniérage, mais il sera aussi plus susceptible de fissuration thermique.

Toutefois, il est quand même possible de remédier en partie à l'orniérage justement en faisant varier les différents paramètres en cause. Mentionnons qu'en 1984 le ministère des Transports de l'Illinois changea subitement les spécifications de son béton bitumineux servant aux routes à forte circulation et aux autoroutes (Miller, Monroney et Traylor, 1987). Parmi ces changements, on note l'augmentation du VMA (vides dans le granulat minéral) de 11-13 % à 15 % au minimum, l'augmentation du volume des vides de 2,5 % à 4 %, le remplacement complet du sable naturel non concassé par du sable concassé plus grossier, l'augmentation du passant de 80 μm et un changement du type de bitume (bitume plus visqueux : AC20 au lieu de AC10).

Néanmoins, il est évident que certains de ces changements sont plus coûteux, par exemple le concassage du sable. Ces changements ont eu lieu sur une période de trois mois et l'orniérage sur les autoroutes a été pratiquement éliminé. On constate donc l'importance d'étudier attentivement les différents paramètres des granulats et des bitumes qui peuvent avoir des répercussions sur l'orniérage.

Mécanisme de formation des ornières

Brown et Parker (1991) expliquent dans leurs recherches les mécanismes de formation des ornières. Ils décrivent cette formation en deux étapes. Premièrement, les charges répétées sur la chaussée causent une densification jusqu'à 4 % de vides. À ce pourcentage, celle-ci se stabilise et le taux de développement de l'ornière cesse ou diminue de façon draconienne. C'est aussi à ce pourcentage que la capacité du revêtement à résister aux déformations permanentes est à son plus fort. À ce

stade, les granulats anguleux et rugueux résistent le mieux et sont difficiles à compacter à plus de 96 %. La deuxième étape suit pour les chaussées qui affichent un taux d'orniérage plus important. La densification continue et le pourcentage des vides peut aller jusqu'à 2 %. Le mélange devient alors instable et les déformations plastiques apparaissent (fluage). La profondeur des ornières s'accroît rapidement et des bourrelets apparaissent le long des sentiers des roues. Les figures 1A et 1B illustrent le mécanisme de formation des ornières.

Granulats grossiers

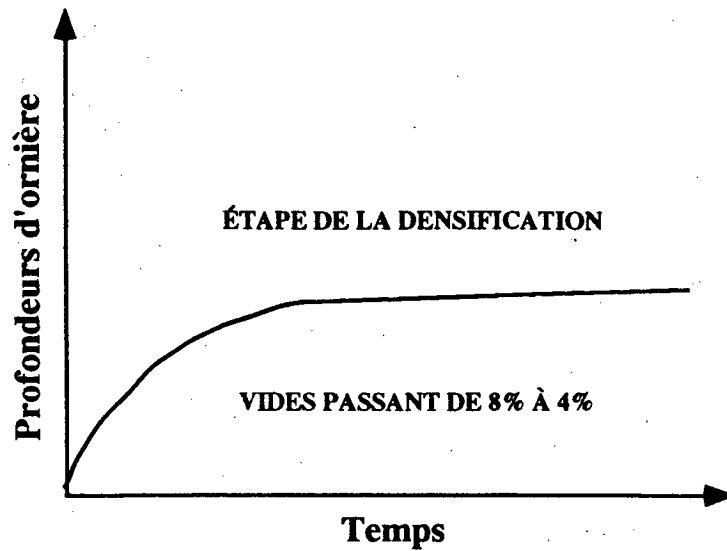
Même si ce n'est pas le but premier de la présente étude, il semble tout de même pertinent d'examiner l'effet que peut avoir la fraction grossière des granulats utilisés dans les différents mélanges. Plusieurs études ont été réalisées à ce sujet, et quelques-unes semblent d'ailleurs contradictoires sur certains points. Tandis que Livneh et Shklarsky (1964) affirment que le remplacement du matériel grossier naturel par du matériel grossier concassé n'entraîne pas d'effet décisif sur les propriétés (stabilité, orniérage, imperméabilité), Kandhal, Khatsi et Motter (1992) concluent le contraire sur au moins deux points.

En effet, ils ont noté qu'une augmentation significative de la stabilité apparaît dans l'utilisation de graviers concassés à la place de graviers naturels non concassés. Une augmentation de la stabilité de 45 % a été mesurée pour 100 % de particules concassées. Le degré de concassage (nombre de faces fracturées mécaniquement) et le pourcentage de grains concassés sont importants en ce qui a trait à la résistance à l'orniérage. Plus le nombre de faces et de particules concassées est grand, meilleure sera la résistance à l'orniérage.

Dans un article présenté à l'occasion de la 69^e Rencontre annuelle sur la recherche dans le domaine des transports, Brown (1990) expose des résultats qui démontrent que les mélanges faits avec des granulats plus gros (avec un pourcentage de vides de 4 %) sont généralement plus forts et plus résistants que ceux qui sont préparés avec des granulats de taille moindre. De tels mélanges nécessitent de plus faibles teneurs en bitume, mais avec les conséquences qu'on connaît. Il poursuit en énumérant plusieurs autres avantages à l'utilisation des gros granulats dans les mélanges.

Figure 1A

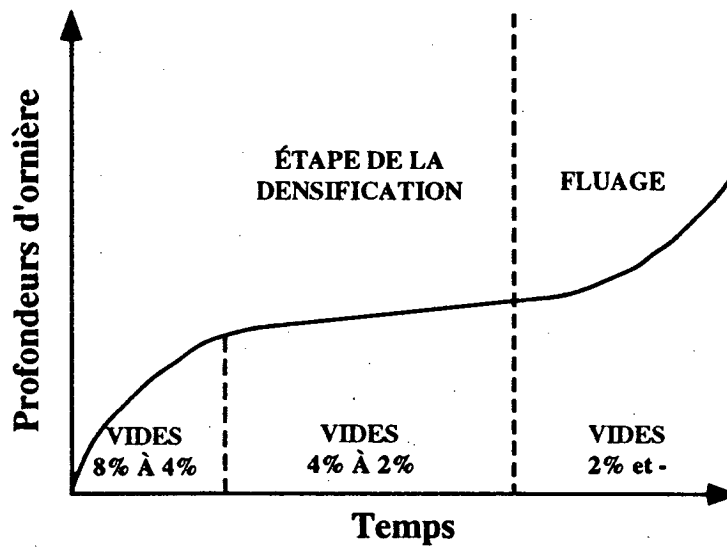
Enrobé ne montrant pas d'orniérage excessif



Source : Brown et Parker (1991).

Figure 1B

Enrobé montrant un orniérage excessif



Source : Brown et Parker (1991).

Parmi ceux-ci, on trouve le fait que la stabilité et la résistance en tension diminuent lorsque le VMA augmente. Donc si le VMA est généralement plus grand avec des granulats plus petits, la stabilité et la résistance en tension s'abaisseront également. En outre, Brown (1990) note que l'utilisation de matériaux plus grossiers améliore la résistance au dérapage et donne une teneur en bitume optimale plus basse. Il conclut son étude en disant que l'augmentation de la taille maximale du granulat dans un mélange granulométrique va améliorer la qualité du mélange. Le module de résilience montre également que les mélanges contenant de gros granulats sont plus rigides, peuvent réduire les contraintes dans les sous-couches et devraient mieux résister à l'orniérage.

Pour sa part, la *National Asphalt Pavement Association* (NAPA) a testé deux tailles maximales de granulats, soit 12,5 mm et 38 mm. Sa principale observation porte aussi sur l'amélioration de la stabilité avec l'utilisation du granulat de plus grande taille.

Granulats fins

Dans Livneh et Shklarsky (1964), on peut lire que «le remplacement du sable naturel par des granulats fins concassés améliore les propriétés d'un mélange bitumineux comme sa stabilité, réduit l'orniérage, augmente sa résistance à l'eau, réduit la sensibilité du bitume et augmente le volume des vides». Donc, les sables ayant subi un traitement mécanique (concassage) donnent de meilleurs résultats en ce qui a trait à la résistance à l'orniérage. Pour sa part, Foster (1970) affirme que «la vraie capacité des mélanges à granulométrie dense à résister aux contraintes induites par le trafic est contrôlée par les caractéristiques des granulats fins». Il est donc très important de bien connaître les propriétés des granulats de taille inférieure à 2,5 mm afin de prévoir la résistance à l'orniérage du mélange bitumineux.

Brown et Parker (1991) spécifient également que la granulométrie et le pourcentage de grains concassés influent sur la résistance à l'orniérage. Leur étude a permis de démontrer que la taille maximale des granulats utilisés dans les mélanges ainsi que le passant de 80 μm sont à considérer dans l'étude de l'orniérage. Dans leur recherche, une augmentation du pourcentage passant le tamis de 1,25 mm dans un mélange diminuera la résistance à l'orniérage. Par contre, les mélanges comportant plus de 7 % de passant de 80 μm seront les plus sensibles à l'orniérage, ce que contredit l'étude de Donnais et Meilleur (1991) (en ce qui a trait aux mélanges MB-16 et MB-12.5) où l'augmentation de la teneur en filler (de 4 % à 8 %) entraîne une diminution importante de la

profondeur d'ornière. Cet accroissement de la résistance à l'orniérage s'explique, selon eux, par le fait qu'une augmentation de la teneur en filler résulte en une diminution de la teneur optimale en bitume (moins de bitume est alors nécessaire pour combler la portion de vides remplacés par le filler). Cependant, la teneur élevée en filler a pour conséquence de diminuer l'épaisseur du film de bitume effectif, ce qui nuit énormément à la qualité d'un enrobé bitumineux (réduction de la durabilité).

De leur côté, Donnais et Meilleur (1991) tirent des conclusions sur plusieurs autres points. Parmi celles-ci, on parle particulièrement de l'indice d'angularité du granulat fin (résultats obtenus par le temps d'écoulement des granulats : procédure NQ2560-075). Plus cet indice est élevé, plus le granulat est anguleux et rugueux et plus la résistance à l'orniérage sera grande. Par contre, un indice d'angularité élevé n'est pas le seul critère dont il faut tenir compte, car il n'est pas suffisant pour assurer un comportement satisfaisant du point de vue des ornières. Il semblerait que les mélanges comportant de forts indices d'angularité pour les granulats fins et des teneurs élevées en bitume donnent les meilleurs résultats sur l'orni reur, mais cela ne suffit pas pour réduire l'orniérage dans le cas des mélanges conçus pour une circulation normale sous la limite de 10 mm.

Quant   Lai (1988), il a comparé six mélanges différents fabriqués avec trois granulats provenant de trois sources. Les résultats de l'essai à l'orni reur ont varié avec la taille maximale des granulats, leur composition minéralogique ainsi que le pourcentage passant le tamis # 8 (2,38 mm). En effet, en comparant deux mélanges ayant des dimensions maximales de 25 mm et 20 mm, et avec un pourcentage passant le tamis # 8 de 38 %, Lai montre que le mélange conçu avec la dimension de 25 mm présente des profondeurs d'ornière plus basses. Les mélanges de béton bitumineux faits avec des granulats calcaires indiquent des valeurs d'orniérage plus fortes qu'avec des granulats granitiques. Lai attribue cela au fait que les particules calcaires sont plus allongées et offrent des surfaces moins rugueuses, donc moins d'enchevêtrement. Par ailleurs, les granulats de composition granitique contiennent des particules cubiques, rugueuses et anguleuses, ce qui augmente la résistance à l'orniérage. Les mélanges de dimension maximale identique de 20 mm, mais d'un pourcentage de particules passant le tamis # 8, laissent aussi voir des différences significatives en ce qui a trait à la résistance à l'orniérage. Celui qui présente un passant de 30 % montre la meilleure résistance, tandis que celui à 38 % donne les pires résultats de tous les mélanges testés. Lai conclut donc qu'un trop fort pourcentage de particules plus petites que 2,5 mm peut être néfaste pour la résistance à l'orniérage.

Moore et Welke (1979) ont testé environ 110 sables tout en gardant les paramètres de la fraction grossière, la teneur en bitume et la teneur en filler constants. Ils ont fait ressortir l'importance de l'indice d'angularité des granulats fins et des distributions granulométriques pour l'obtention de plus fortes stabilités selon l'essai Marshall. Parmi leurs autres conclusions, notons que plus le granulat fin est anguleux, plus grande sera la stabilité. Plus la granulométrie est dense ou serrée, plus la stabilité sera grande également. À taille égale, les sables arrondis conduisent à des stabilités faibles, tandis que ceux qui sont manufacturés et concassés sont extrêmement stables.

Pour leur part, Kandhal, Khatri et Motter (1992) ont réalisé des recherches intéressantes sur les effets des indices de forme et de texture des granulats fins. Un total de 27 sables différents ont été utilisés dans leurs recherches : 9 sables naturels non concassés et 18 autres qui le sont. Ils ont mesuré l'indice de forme et de texture sur ces échantillons en utilisant les méthodes ASTM D3398 et NAA'S. Ces chercheurs ont ainsi trouvé qu'un indice de forme et de texture d'environ 14 sépare les sables naturels (< 14) et les sables manufacturés (> 14). Plus le pourcentage de fines naturelles est fort dans un mélange, plus l'indice de forme et de texture diminuera. Un faible pourcentage de sable naturel peut donc faire baisser significativement cet indice.

On voit, avec toutes les études qui ont été réalisées sur le sujet, que plusieurs facteurs peuvent influencer sur le comportement des mélanges bitumineux. La majorité des chercheurs avouent que l'importance de l'angularité et de la rugosité des granulats est grande, mais que de bons résultats liés à ces caractéristiques ne sont pas suffisants pour assurer un comportement adéquat quant à l'orniérage.

Il est donc nécessaire de concevoir plusieurs mélanges et de tester ceux-ci à l'orniéreur pour connaître leur comportement respectif. Si on obtient de mauvais résultats, on devra refaire d'autres essais en changeant toutefois quelques paramètres se rapportant aux granulats ou encore à la méthode de conception (bitume utilisé, compactage, etc.).

PÉTROGRAPHIE DES GRANULATS

Ce chapitre contient de l'information sur la provenance (localisation géographique), la composition minéralogique (minéraux présents et pourcentages), la composition chimique (analyse chimique) des granulats utilisés au cours de l'étude, ainsi que d'autres renseignements généraux à ce sujet, par exemple l'altération.

Localisation géographique des granulats

Dix granulats fins et autant de fillers minéraux provenant de dix sources du Québec ont été échantillonnés. Ils seront nommés ci-après par le nom de la localité d'origine.

On trouve trois sources dans la région de Québec : deux sur la Rive-Nord (calcaire de Charlesbourg et gravier granitique de Lac-Saint-Charles) et une sur la Rive-Sud (grès de Saint-Jean-Chrysostome). Le grnat grossier utilisé pour tous les mélanges provenait également de cette dernière source. Les autres granulats fins et fillers proviennent de Mont-Saint-Hilaire (syénite à néphéline), de Sherbrooke (schiste à quartz-chlorite), de Coteau-du-Lac (dolomie gréseuse), de Varennes (phonolite), de Contrecoeur (scorie d'acier), de Saint-Victor-de-Beauce (gravier lithique des Appalaches) et du Parc de conservation du Mont-Saint-Bruno (cornéenne). Tous ces granulats (sauf celui de Lac-Saint-Charles, car il s'agit d'un grnat naturel arrondi non concassé) servent fréquemment pour la fabrication du béton bitumineux utilisé sur les routes du Québec. Cependant, chacun des granulats nécessite un mélange bitumineux particulier pour obtenir une résistance maximale à l'orniérage. Ainsi, certains granulats demanderont peut-être des quantités de bitume moindres que d'autres, plus de filler ou un degré de compactage différent afin de mieux résister à la formation d'ornières.

La provenance des granulats est illustrée à la figure 2 (régions de Québec et de Montréal) et les abréviations correspondant à chaque grnat testé dans l'étude se trouvent au tableau 1.

Description pétrographique

Chaque grnat a été examiné attentivement au microscope, soit en lumière transmise et en lumière réfléchie, ce qui a permis la détermination de sa composition et de sa texture, variables pouvant influencer sur chaque performance en ce qui a trait à l'orniérage.

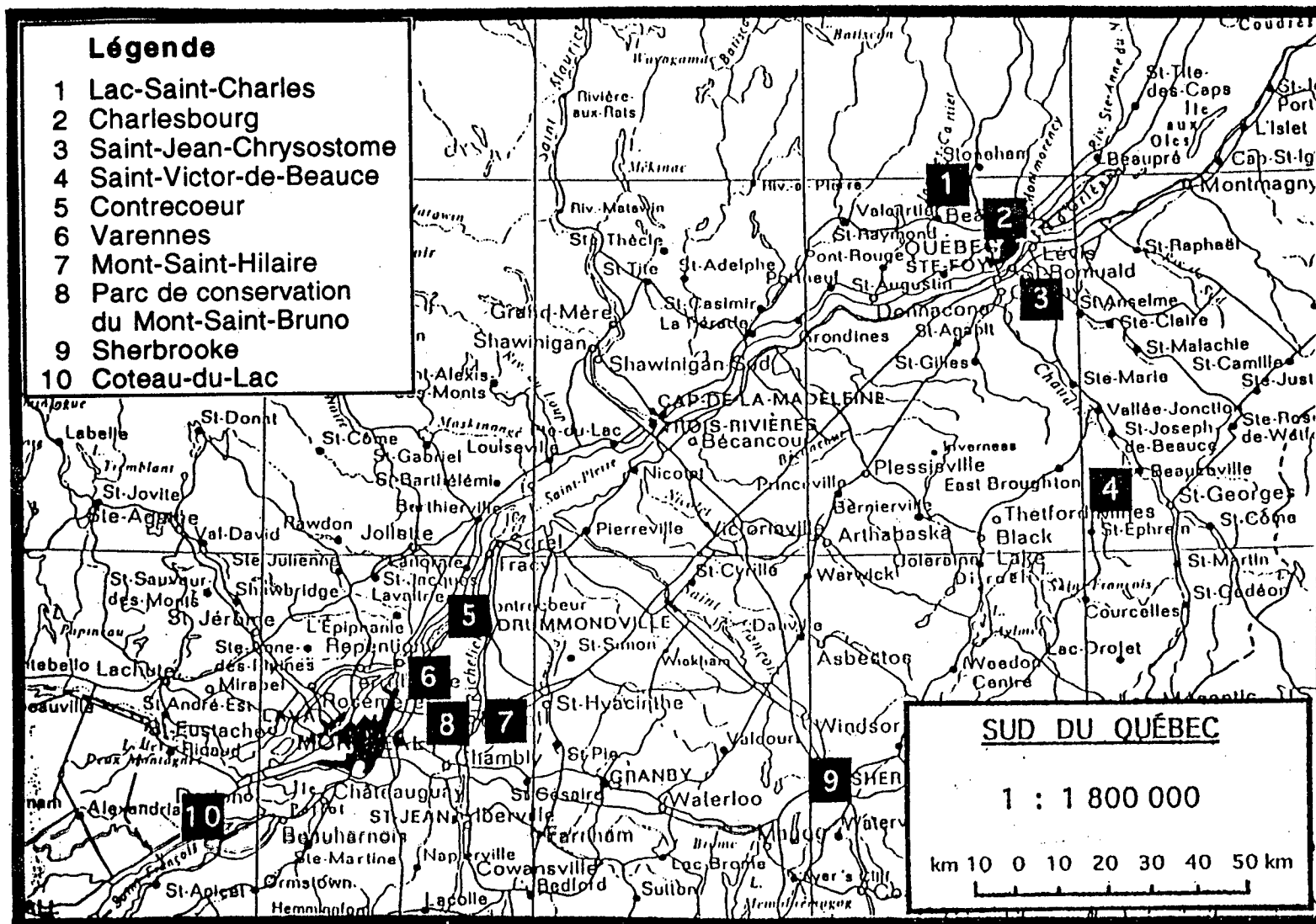


Figure 2
Provenance des granulats

Tableau 1
Abréviations employées pour les granulats

ABRÉVIATIONS	GRANULATS
GRG	Gravier granitique (Lac-Saint-Charles)
CAL	Calcaire (Charlesbourg)
GRE	Grès (Saint-Jean-Crysostome)
GRL	Gravier lithique (Saint-Victor-de-Beauce)
SCO	Scorie d'acier (Contrecœur)
PHO	Phonolite (Varennnes)
SYE	Syénite à néphéline (Mont-Saint-Hilaire)
COR	Cornéenne (Parc de conservation du Mont-Saint-Bruno)
SCC	Schiste à quartz-chlorite (Sherbrooke)
DOL	Dolomie gréseuse (Coteau-du-Lac)

Après l'identification de la nature de chaque granulat et l'évaluation du pourcentage des minéraux présents dans chacun, un nom pétrographique a pu être attribué pour les dix échantillons. L'examen pétrographique permet également de reconnaître les éléments indésirables (coquillages, poussières, matériaux argileux, altérations, etc.), les caractéristiques structurales (schistosité, plans de faiblesse, clivage, etc.), les dimensions (formes, pourcentages) et la continuité des pores.

L'évaluation et la prédiction de la performance des granulats sont aussi possibles avec l'examen pétrographique. En effet, on sait que la résistance à la fragmentation des granulats est fonction de plusieurs facteurs que l'on peut justement observer à l'aide du microscope. Ainsi, la taille, la forme et la ténacité des minéraux composant le granulat, le degré d'agencement et de cohésion entre les grains de même que la présence de plans de faiblesse indiqueront si le granulat sera résistant du point de vue de la fragmentation. Dans le même ordre d'idée, la dureté des minéraux, la cohésion entre les grains et la porosité sont liées à la résistance à l'abrasion, tandis que la résistance au polissage dépendra surtout des contrastes de dureté entre les différents minéraux de la roche.

Le premier granulat consiste en un gravier granitique naturel (non concassé) de Lac-Saint-Charles. Dans sa composition, on trouve 50 % de feldspaths (microcline et plagioclases mâclés), 35 % de quartz, environ 10 % de hornblende et 5 % de biotite. On ne note pas de caractéristiques particulières,

exception faite de l'absence de concassage et d'une légère damouritisation des plagioclases (ceux-ci sont remplacés par les micas).

Le deuxième granulât provient de Charlesbourg-Ouest, et il s'agit d'un calcaire du groupe de Trenton datant de l'ordovicien moyen. Sa composition principale est la calcite (88 %) à laquelle sont associés environ 10 % de quartz cryptocristallin et de minéraux argileux et 2 % de matière organique. On note également la présence de fossiles surtout sous forme de crinoïdes et de pellets.

Le troisième granulât est composé de 67 % de quartz, 10 % de plagioclases, 8 % de chlorite, 7 % de séricite, 5 % de calcite et 3 % de microcline. Il s'agit d'un grès quartzitique (Saint-Jean-Chrysostome) de la formation de Saint-Nicolas et qui date de la période du cambrien. Les particules s'avèrent polyminéraliques. On note aussi une légère séricitisation, et les fragments de quartz et de feldspaths sont cimentés par la séricite, la chlorite et la calcite (20 % de ciment).

Le quatrième granulât est un gravier lithique de Saint-Victor-de-Beauce (Appalaches) et contient 70 % de fragments de quartzite-grès, 15 % de fragments schisteux, 10 % d'argilite (minéraux argileux) et 5 % de roches volcaniques. Les fragments métamorphiques semblent plus allongés que les autres fragments.

Le cinquième granulât est d'origine artificielle puisqu'il s'agit d'une scorie d'acier provenant de la région de Contrecoeur. Sa composition consiste principalement en du verre avec des vésicules qui sont remplies par de l'épidote, de la wollastonite et du feldspath. Sa couleur rosée est attribuable à la présence d'hématite. On note aussi une forte porosité pour ce granulât.

Le sixième granulât provient de la région de Varennes, et cette roche fait partie du groupe de Lorraine (basses terres du Saint-Laurent) d'âge ordovicien supérieur. On retrouve 40 % d'orthoclase (feldspath alcalin), 25 % de plagioclases (maclés), 20 % de néphéline et 15 % d'ægirine (pyroxène). La majorité des grains sont polyminéraliques.

Le septième granulât est une syénite à néphéline. Celle-ci provient du Mont-Saint-Hilaire dans la région de Montréal. Ce granulât fait partie d'une intrusion alcaline appartenant aux collines montérégiennes (basses terres du Saint-Laurent) formées durant la période du crétacé inférieur. Sa composition est la suivante : 40 % d'orthoclase (feldspath alcalin), 20 % d'augite et d'arfvedsonite

(amphipole), 20 % de néphéline, 15 % de biotite et phlogopite (micas), 3 % d'hornblende et 2 % de minéraux opaques. On remarque que la majorité des grains sont polyminéraliques.

Le huitième granulât consiste en une cornéenne (schiste recuit) du Parc de conservation du Mont-Saint-Bruno. Ce granulât provient de la région géologique des basses terres du Saint-Laurent et plus précisément du groupe de Lorraine (ordovicien supérieur) en périphérie du Mont-Saint-Bruno (crétacé). Sa composition est difficile à évaluer puisque les grains sont très fins, ce qui complique leur identification. À l'aide de la diffraction des rayons X, on repère la présence de quartz, de feldspaths ainsi que de micas. Les particules sont donc polyminéraliques et formées d'un enchevêtrement de quartz-séricite-feldspath. Plusieurs grains (environ 70 %) montrent une couleur brunâtre, comme s'ils étaient argileux.

Le neuvième granulât échantillonné consiste en un schiste à quartz-chlorite-épidote. Il provient de la région de Sherbrooke et appartient à la province géologique des Appalaches, plus précisément à la formation d'Ascot datant du préordovicien moyen. Au total, 45 % de quartz, 30 % de chlorite, 15 % d'épidote, 5 % de séricite-muscovite et 5 % de calcite composent ce granulât. On remarque bien sûr une structure directionnelle schisteuse ainsi que des veinules de calcite. La couleur verte de la roche est causée par la forte présence d'épidote, mais surtout par la chlorite.

Enfin, le dixième granulât a pour composition 75 % de dolomite, 15 % de ciment argileux, 5 % de quartz détritique et 5 % de calcite. Il s'agit d'une dolomie gréseuse de la région de Coteau-du-Lac (Montréal) qui appartient aux basses terres du Saint-Laurent (groupe de Beekmantown : ordovicien inférieur). On note la présence d'un faible litage sur certains grains ainsi qu'un faible pourcentage de matière organique.

Les photographies (en lumière naturelle et en lumière polarisée) de tous les granulats fins testés sont présentées sur les planches 1 à 10 (photos 1 à 20). Mais d'abord un résumé de la composition des granulats figure au tableau 2 et la description de leur composition chimique (pourcentage des oxydes) se trouve au tableau 3.

Tableau 2

Description pétrographique des dix granulats

Provenance des échantillons	%	Phases minérales majeures	%	Phases minérales mineures	Nom	Remarques
Lac-Saint-Charles	50 35 10	microcline et plagioclase (fr) quartz hornblende	5	biotite	gravier granitique	- légère damouritisation des plagioclases - sable naturel
Charlesbourg	88 10	calcite quartz cryptocristallin (silice, alumine, titane)	2	minéraux opaques	calcaire	- fossilifère par endroit (crinoïdes, pellets, etc.)
Saint-Jean-Chrysostome	67 10 8	quartz plagioclases chlorite	7 5 3	séricite calcite microcline	grès	- grains polyminéraliques - légère séricitisation - ciment de chlorite-séricite-calcite
Saint-Victor-de-Beauce	70 15 10	quartzite-grès fragments de schiste argilite	5	fragments volcaniques	gravier lithique	- fragments métamorphiques allongés
Contrecoeur	93	verre	5 2	épidotes et wollastonite feldspaths	scorie	- couleur rouge (hématite) - pores remplis d'épidotes-wollastonite feldspaths
Varenes	40 25 20 15	orthoclase plagioclases néphéline ægyrine			phonolite	- grains polyminéraliques (fr-néphéline-pyroxène)
Mont-Saint-Hilaire	40 20 20 15	orthoclase augite et arvedsonite néphéline biotite et phlogopite	3 2	hornblende minéraux opaques	syénite à néphéline	- grains polyminéraliques
Parc de conservation du Mont-Saint-Bruno	70 20 10	grains brunâtres argileux (quartz-fr-micas) grains de séricite-quartz-feldspaths grains de quartz-fr			cornéenne	- grains polyminéraliques - séricitisation - contours chloritisés
Sherbrooke	45 30 15 5	quartz chlorite épidote séricite et muscovite	5	calcite	schiste à quartz-chlorite-épidote	- structure schisteuse - chlorite autour de l'épidote - calcite en veinule
Coteau-du-Lac	75 15	dolomite ciment argileux	5 5	quartz calcite	dolomie gréseuse	- matière organique - faible litage sur certains grains

Tableau 3

Analyse chimique des dix granulats

OXYDES (% massique)	GRG	CAL	GRE	GRL	SCO	PHO	SYE	COR	SCC	DOL
Na ₂ O	3,17	0,08	1,65	1,05	< 0,01	5,99	8,77	1,40	2,07	< 0,01
MgO	0,63	1,97	0,86	1,65	12,3	0,60	1,11	3,81	5,14	14,6
Al ₂ O ₃	13,2	2,54	10,1	8,77	5,10	17,6	19,5	15,9	16,0	4,57
SiO ₂	73,6	16,3	74,5	78,8	14,5	59,6	51,7	59,7	49,6	18,4
P ₂ O ₃	0,06	0,10	0,09	0,04	0,24	0,11	0,46	0,17	< 0,01	0,02
K ₂ O	3,55	0,41	2,04	1,53	0,04	4,48	3,41	3,83	0,14	2,52
CaO	1,80	41,7	1,40	0,57	28,1	2,07	4,35	3,38	10,2	22,5
TiO ₂	0,41	0,07	1,06	0,62	0,44	0,60	1,08	0,85	0,34	0,17
Cr ₂ O ₃	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,46	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	< 0,01
MnO	0,05	0,02	0,1	0,08	1,96	0,24	0,32	0,11	0,16	0,05
Fe ₂ O ₃	3,03	0,71	5,41	4,10	31,6	4,04	6,35	6,73	9,42	2,03
Pertes au feu	0,56	35,2	2,41	2,02	4,28	2,84	1,55	2,45	6,18	32,2
Cumulatif (%)	100,56	99,1	99,62	99,23	99,02	98,17	98,6	98,33	99,26	97,06

Description des planches 1 à 10

Planche 1

Photos 1 et 2 : Lac-Saint-Charles

Sable naturel granitique composé sur le plan minéralogique d'environ 35 % de quartz, 50 % de feldspaths (microcline et plagioclases), 10 % d'hornblende et 5 % de biotite. On y remarque également sur quelques grains une damouritisation des plagioclases (les plagioclases sont remplacés par les micas). Les grains montrent une bonne sphéricité et sont subarrondis.

Planche 2

Photos 3 et 4 : Charlesbourg

Calcaire composé majoritairement de calcite (88 %) et de 10 % de quartz cryptocristallin et de minéraux argileux (résidus insolubles) et de 2 % de minéraux opaques. Ce granulat est fossilifère par endroits (présence de crinoïdes, de pellets, etc.). Les grains montrent une bonne sphéricité et semblent subarrondis. On ne remarque pas d'altération et peu ou pas de fracturation.

Planche 3

Photos 5 et 6 : Saint-Jean-Chrysostome

Grès quartzitique composé majoritairement de quartz (67 %) et de 10 % de feldspaths plagioclases, 8 % de chlorite, 7 % de séricite, 5 % de calcite et 3 % de microcline. On retrouve également quelques morceaux de shale rouge. Les grains sont plutôt polyminéraliques et sont constitués de cristaux de quartz et feldspaths cimentés par la calcite, la chlorite et la séricite. On note une altération en chlorite sur plusieurs grains. Les particules sont subarrondies et assez anguleuses mais très peu fracturées.

Planche 4

Photos 7 et 8 : Saint-Victor-de-Beauce

Gravier lithique ayant comme composition 70 % de fragments de quartzite et de grès, 15 % de fragments de schiste, 10 % d'argilite et 5 % de fragments volcaniques. Au total, 60 % des grains s'avèrent polyminéraliques. Ce granulat montre une bonne sphéricité, est subanguleux et moyennement fracturé. Les fragments métamorphiques sont composés principalement de minéraux phyliteux et possèdent des formes plates et allongées.

Planche 5

Photos 9 et 10 : Contrecœur

Scorie d'acier composée majoritairement de verre, d'environ 5 % d'épidotes et de wollastonite et 2 % de feldspaths. Le granulat montre une forte porosité et les pores sont remplis par les minéraux secondaires tels l'épidote, la wollastonite et les feldspaths. Le granulat a une couleur rougeâtre en raison de la présence d'hématite. Il montre une forte sphéricité et les particules sont peu anguleuses.

Planche 6

Photos 11 et 12 : Varennes

Phonolite composée de 40 % d'orthoclase, 25 % de plagioclases, 20 % de néphéline et 15 % d'ægirine. La majorité des grains sont polyminéraliques (enchevêtrement de feldspaths-néphéline-pyroxène), peu fracturés et peu altérés. On note une faible sphéricité et les grains montrent une forte angularité.

Planche 7

Photos 13 et 14 : Mont-Saint-Hilaire

Granulat composé de 40 % d'orthoclase, 20 % d'augite et d'arfvedsonite, 20 % de néphéline, 15 % de biotite et de phlogopite, 3 % d'hornblende et 2 % de minéraux opaques. Il s'agit donc d'une syénite à néphéline. On note la présence de phénocristaux d'orthoclase et plusieurs grains de pyroxènes

sont zonés (non visible sur les photos). La sphéricité des particules varie de faible à moyenne, l'angularité est moyenne et environ 40 % des particules sont allongées.

Planche 8

Photos 15 et 16 : Parc de conservation du Mont-Saint-Bruno

Cornéenne ayant pour composition du quartz, des feldspaths et des micas. La granulométrie des constituants étant très fine, il est difficile de mettre des pourcentages exacts pour chaque minéral que l'on retrouve. Par contre, on note qu'environ 70 % des grains montrent une coloration brunâtre (en lumière naturelle) indiquant ainsi la présence de minéraux argileux. Les grains sont constitués d'un enchevêtrement de séricite-feldspaths-quartz. On remarque donc une séricitisation des grains, et on voit également quelques contours de particules chloritisées. La circularité des grains est faible, mais on constate une forte angularité (particules plutôt allongées).

Planche 9

Photos 17 et 18 : Sherbrooke

Schiste à quartz-chlorite-épidote composé de 45 % de quartz, 30 % de chlorite, 15 % d'épidote, 5 % de micas, plus précisément de séricite et de muscovite, et 5 % de calcite se présentant sous forme de veinules. La sphéricité est moyenne et les grains demeurent subanguleux. On observe une structure directionnelle schisteuse, ce qui cause un plan de faiblesse. Par contre, ce granulat n'est pas fracturé. Sa couleur verte est causée par la présence de chlorite.

Planche 10

Photos 19 et 20 : Coteau-du-Lac

Dolomie gréseuse constituée majoritairement de dolomite (75 %) et de 15 % de ciment argileux, 5 % de quartz détritique et 5 % de calcite. La sphéricité et l'angularité des grains sont moyennes. On n'y retrouve pas d'altération importante et le taux de fracturation des particules est très faible. Également, sur certains grains, on peut voir un faible litage (non visible sur les photos).

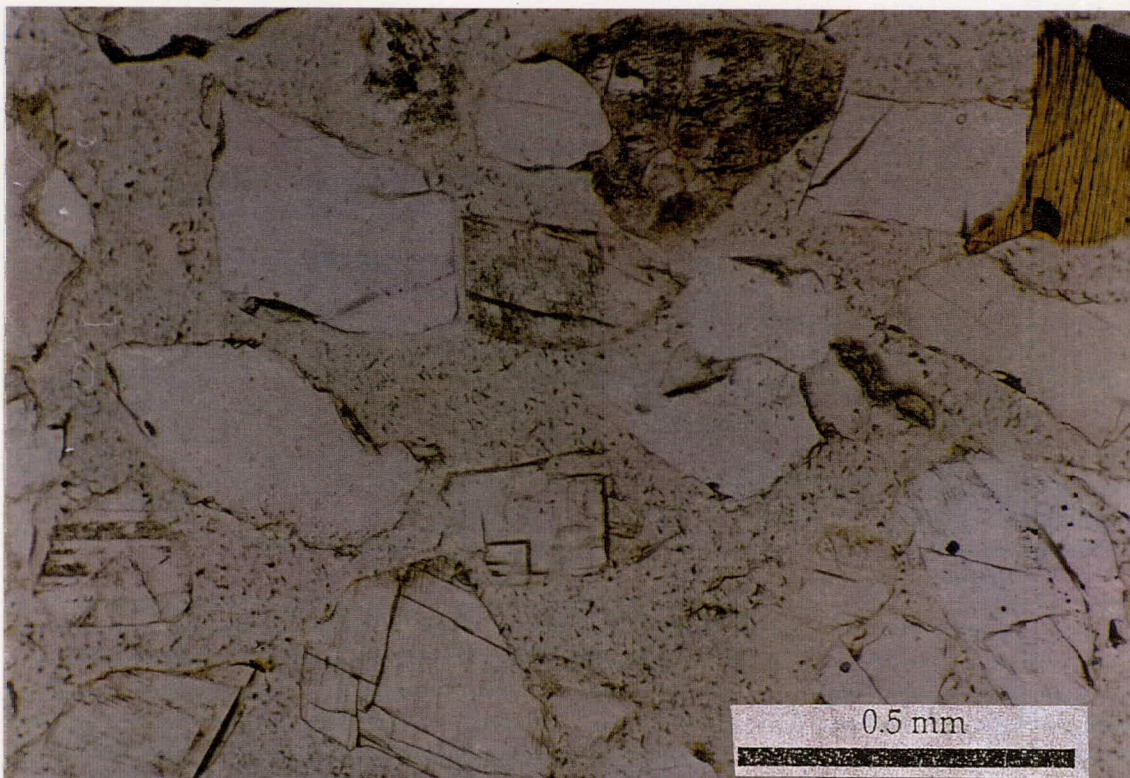


Photo 1 : Gravier granitique de Lac-Saint-Charles (L.N.)

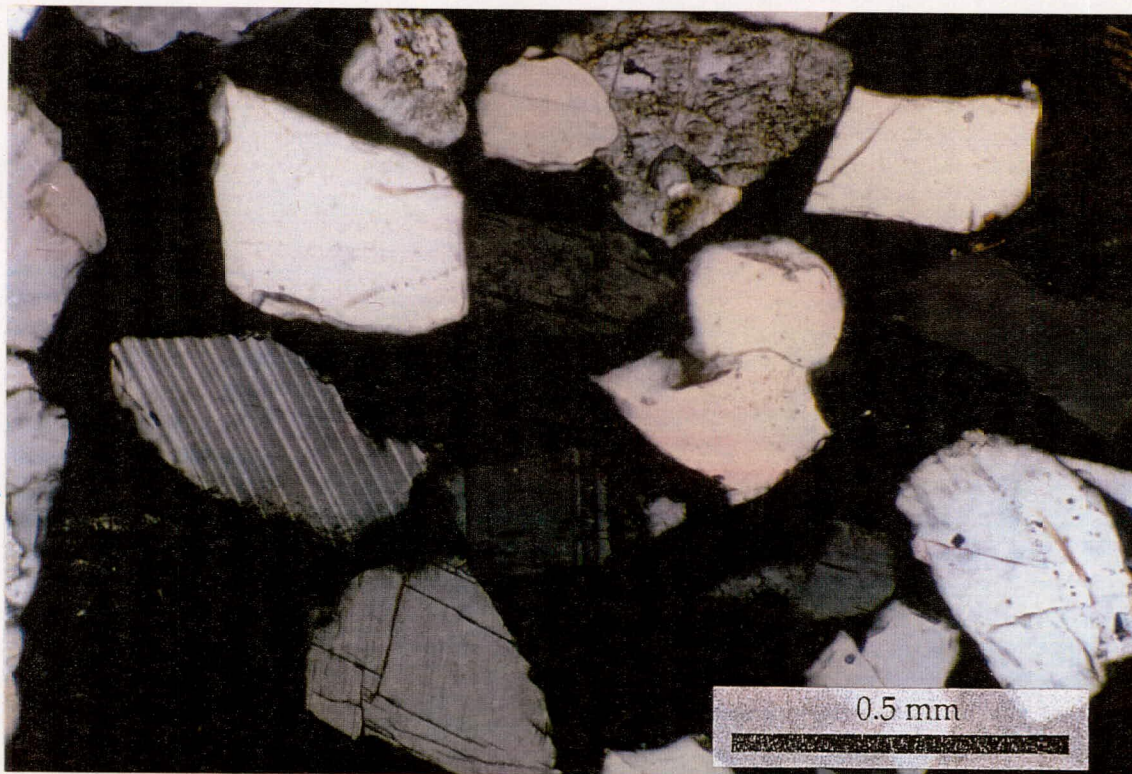


Photo 2 : Gravier granitique de Lac-Saint-Charles (L.P.)

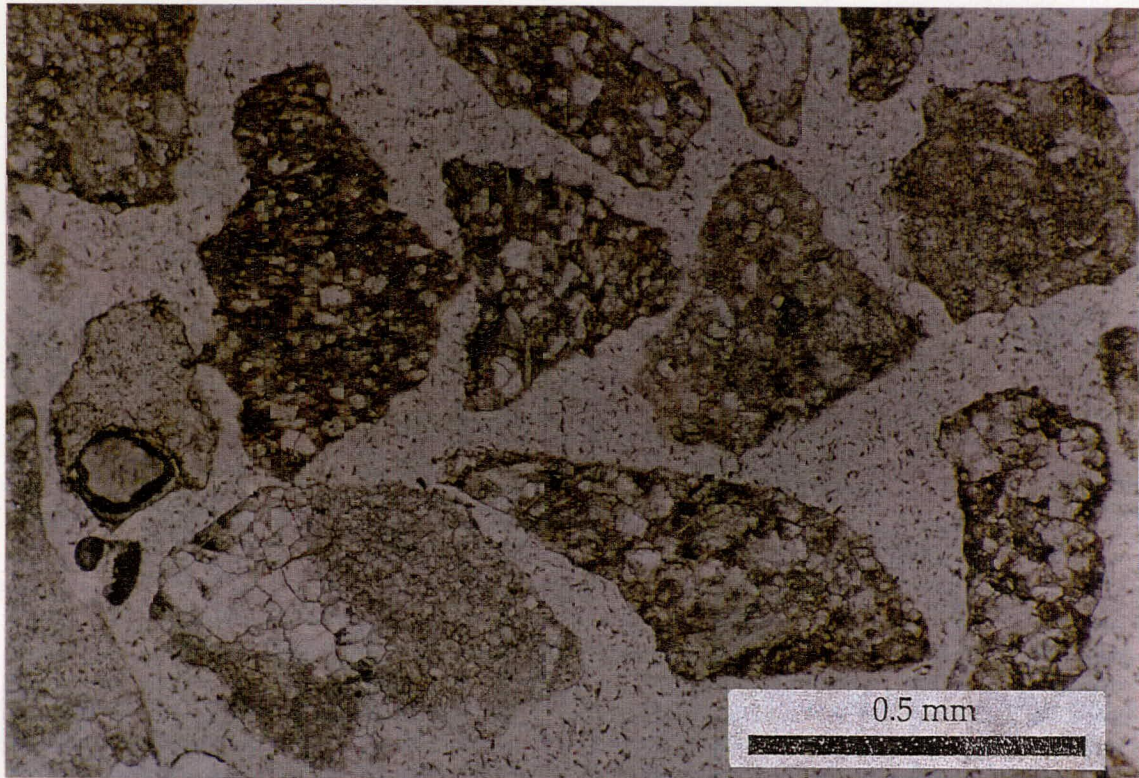


Photo 3 : Calcaire de Charlesbourg (L.N.)

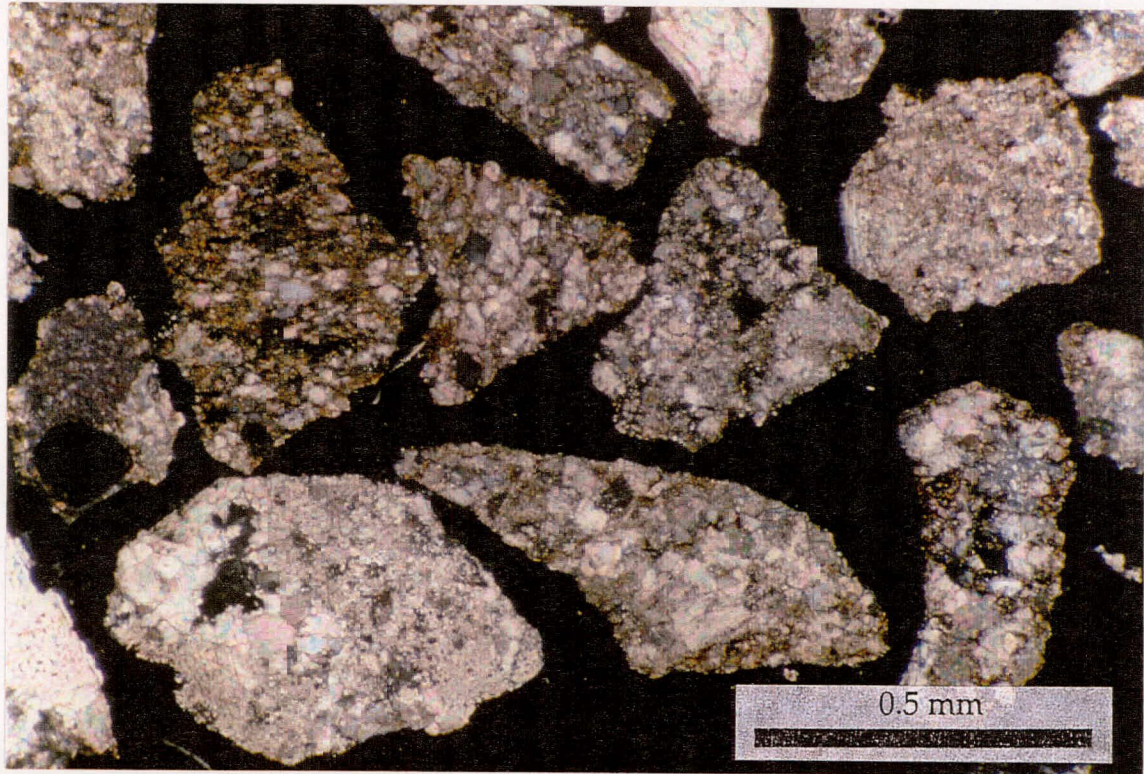


Photo 4 : Calcaire de Charlesbourg (L.P.)

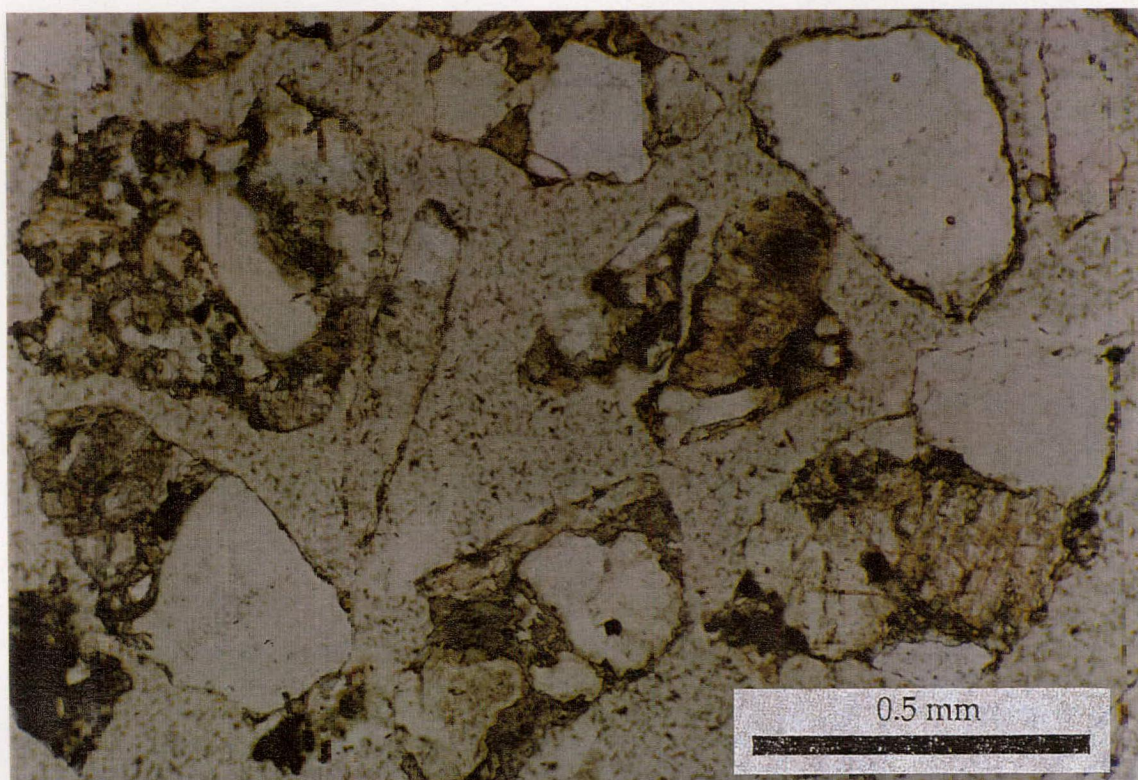


Photo 5 : Grès de Saint-Jean-Chrysostome (L.N.)

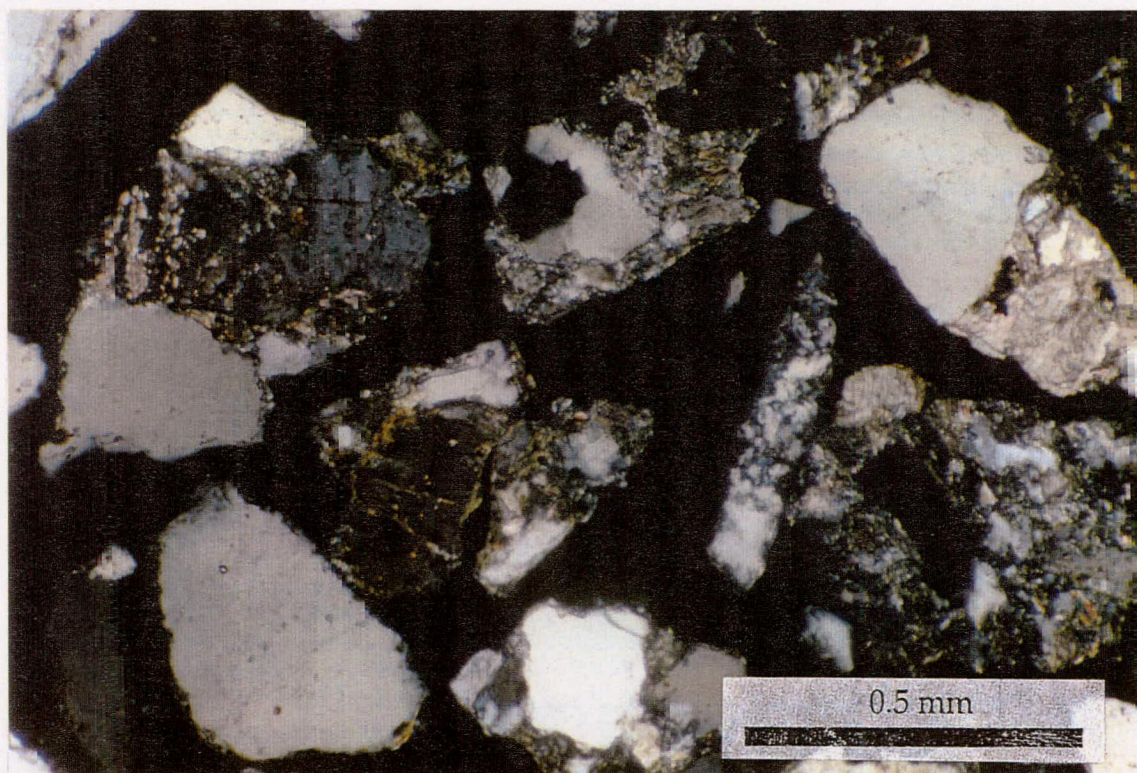


Photo 6: Grès de Saint-Jean-Chrysostome (L.P.)

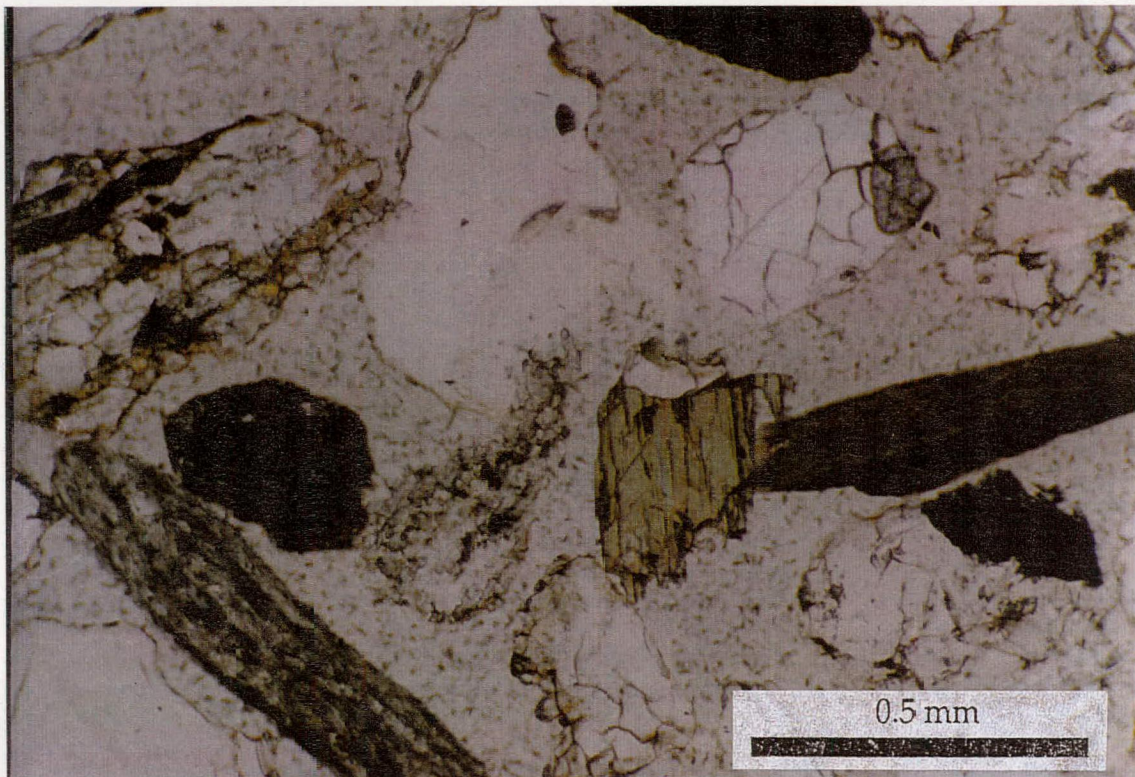


Photo 7 : Gravier lithique de Saint-Victor-de-Beauce (L.N.)

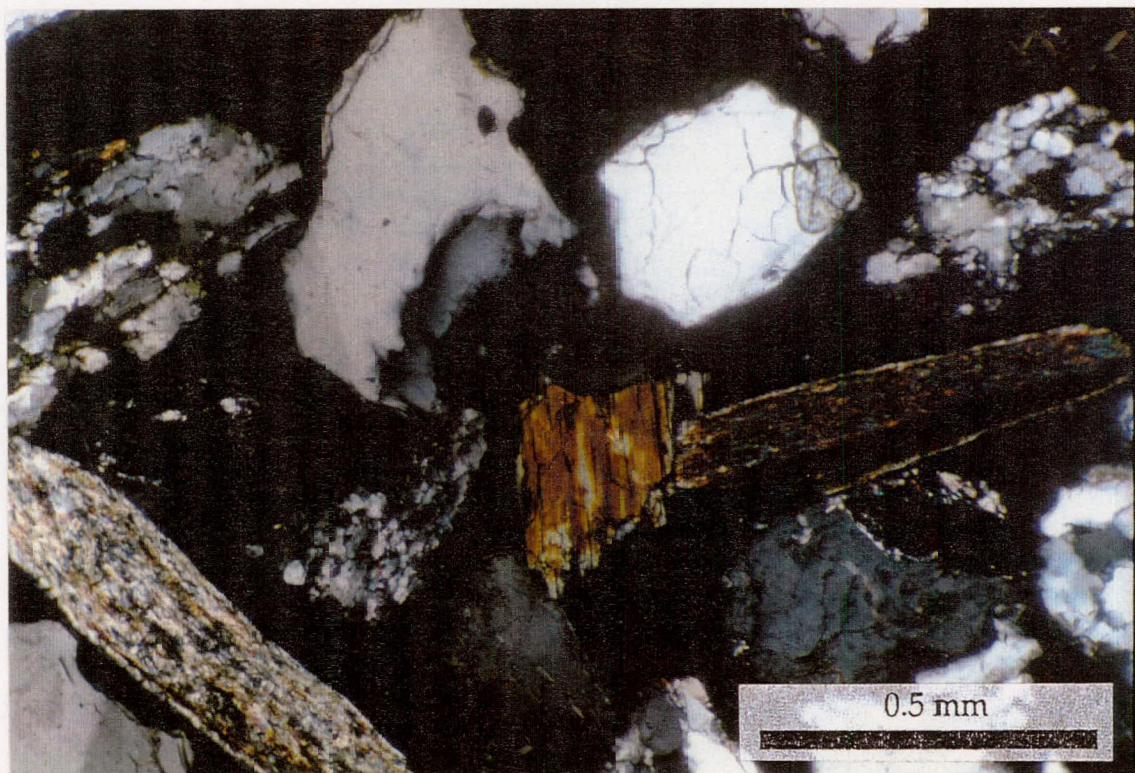


Photo 8 : Gravier lithique de Saint-Victor-de-Beauce (L.P.)

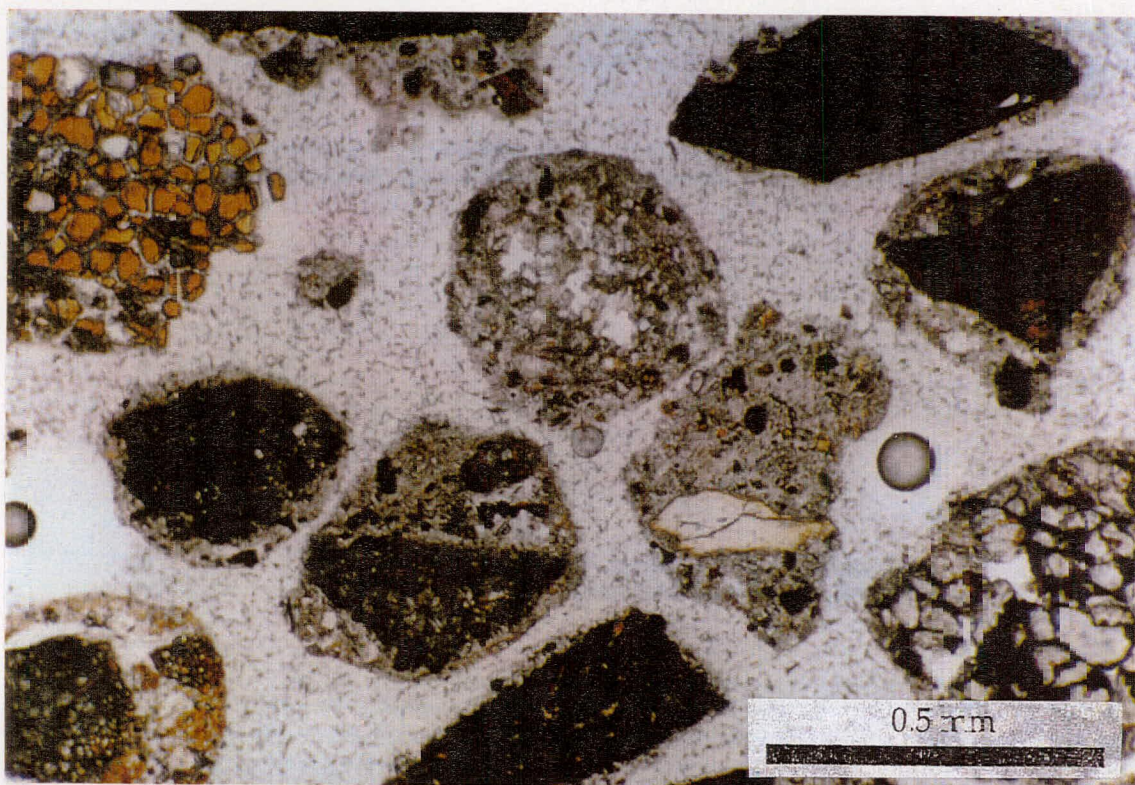


Photo 9 : Scorie d'acier de Contrecoeur (L.N.)

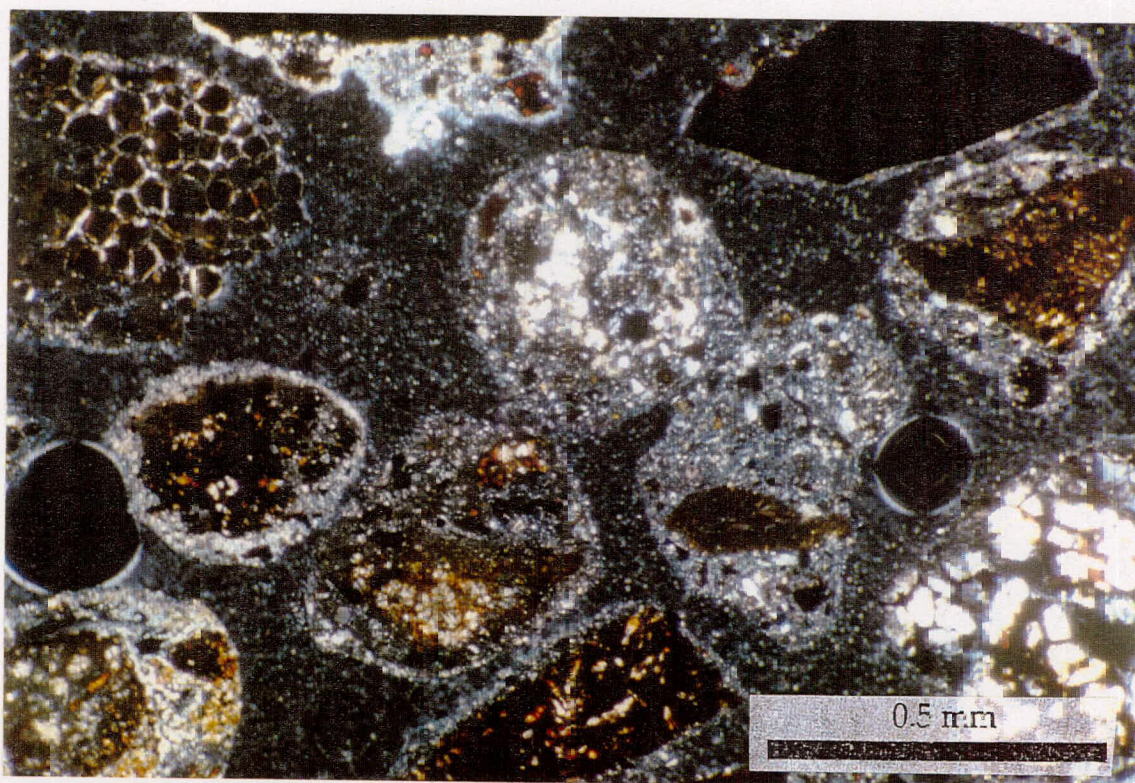


Photo 10 : Scorie d'acier de Contrecoeur (L.P.)

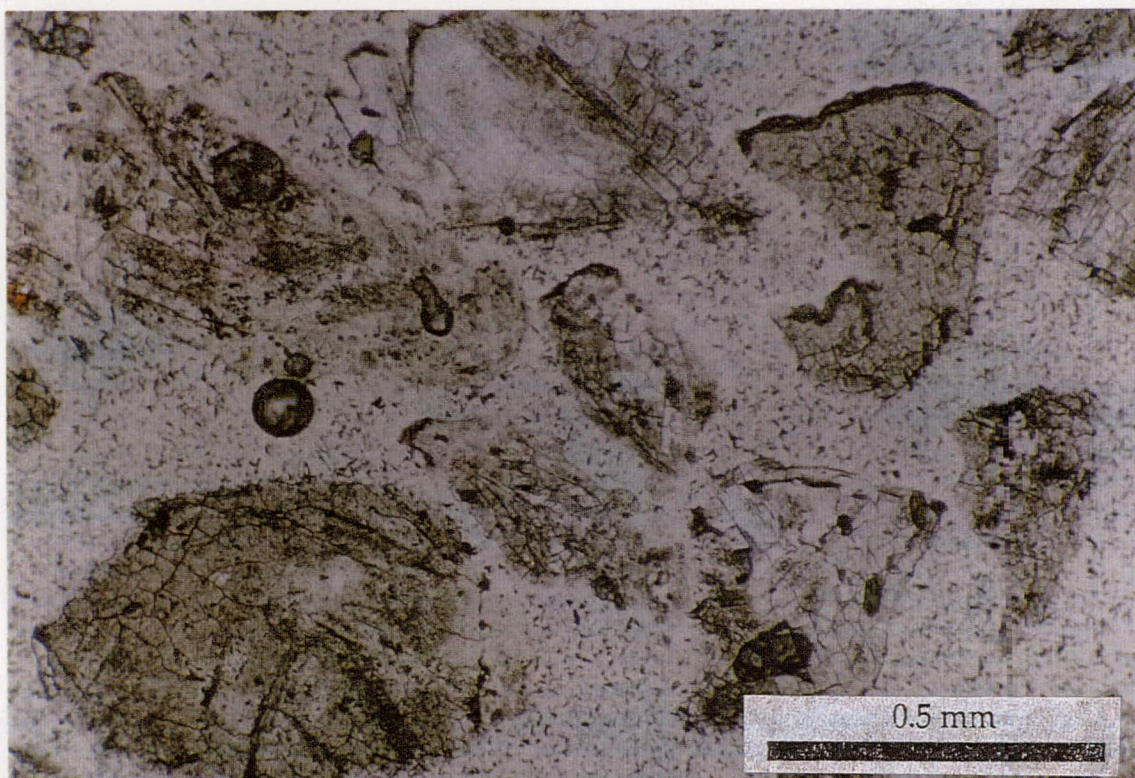


Photo 11 : Phonolite de Varennes (L.N.)

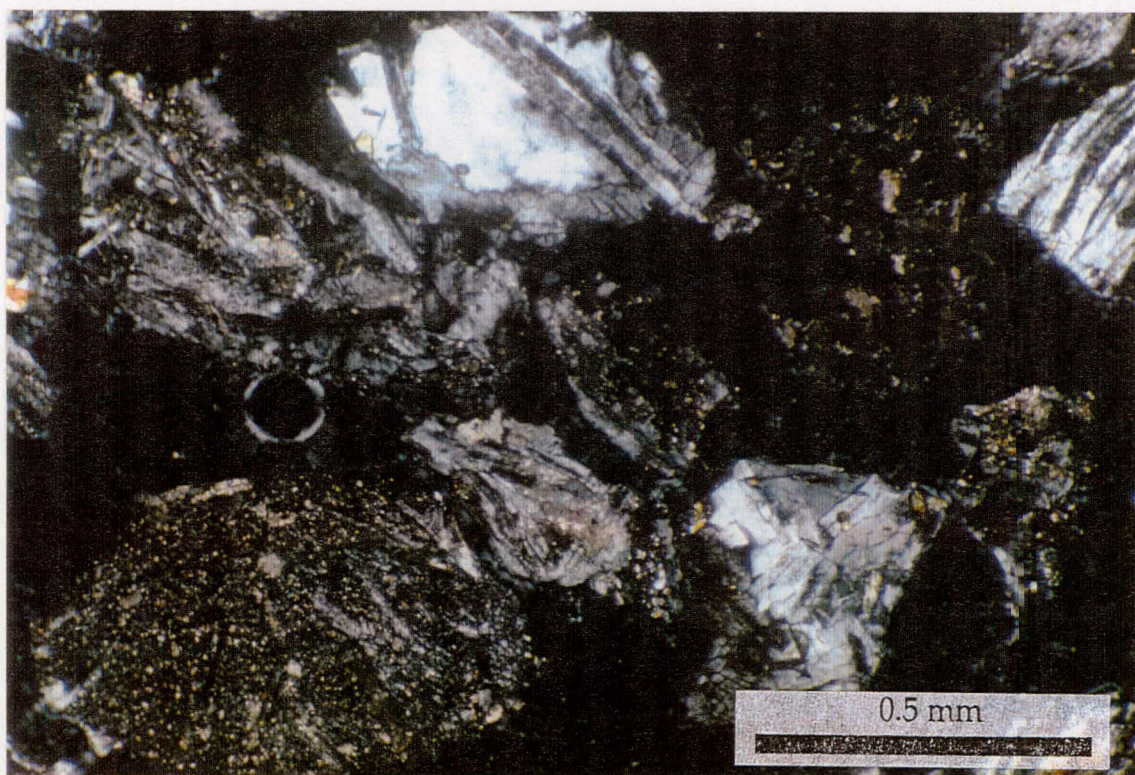


Photo 12 : Phonolite de Varennes (L.P.)

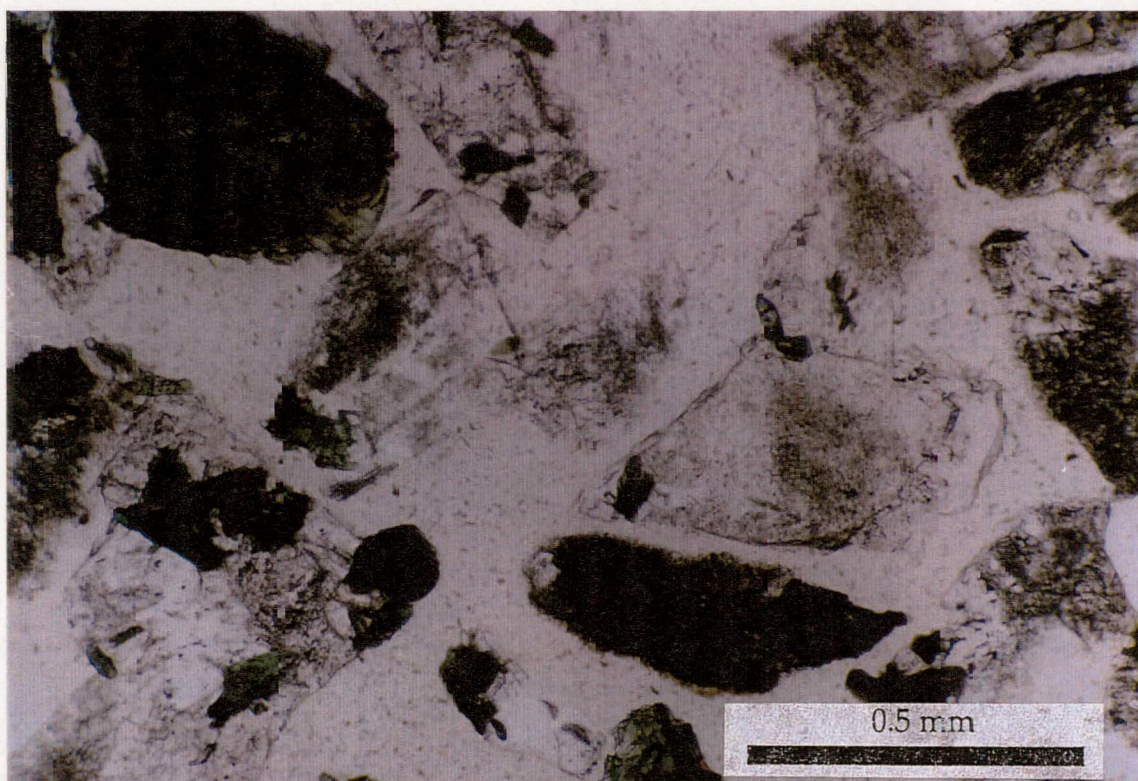


Photo 13 : Syénite à néphéline de Mont-Saint-Hilaire (L.N.)

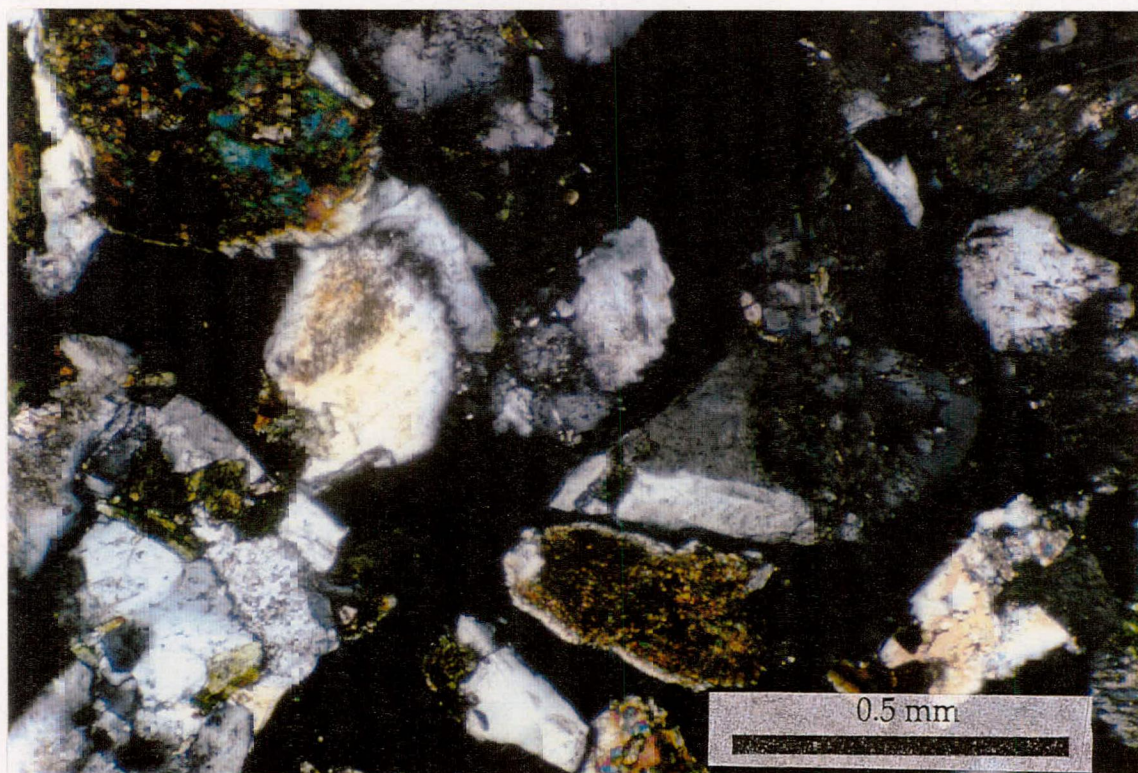


Photo 14 : Syénite à néphéline de Mont-Saint-Hilaire (L.P.)

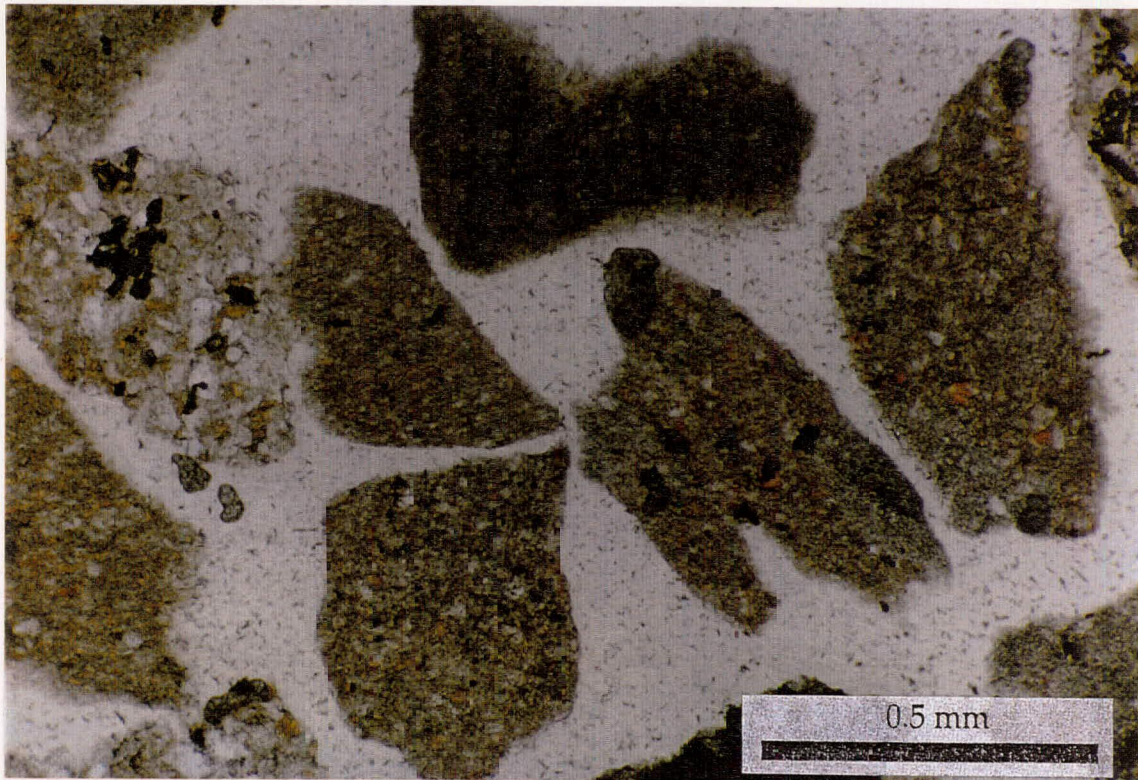


Photo 15 : Cornéenne du Parc de conservation du Mont-Saint-Bruno (L.N.)

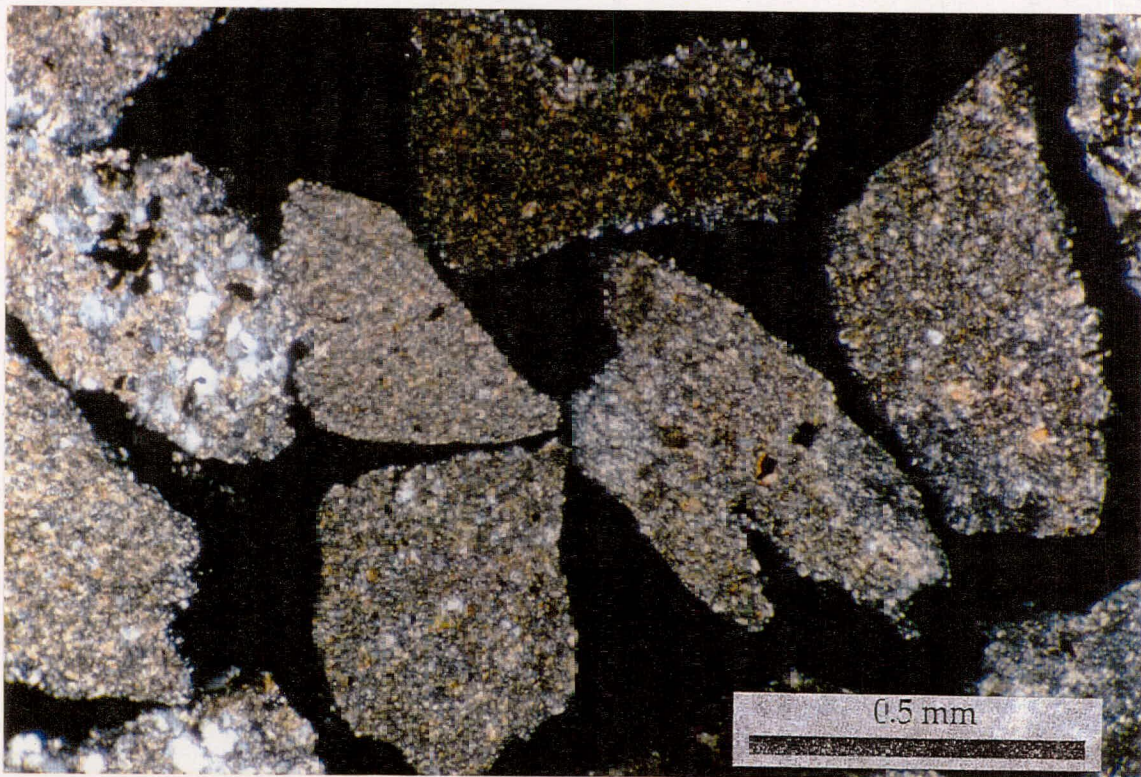


Photo 16 : Cornéenne du Parc de conservation du Mont-Saint-Bruno (L.P.)

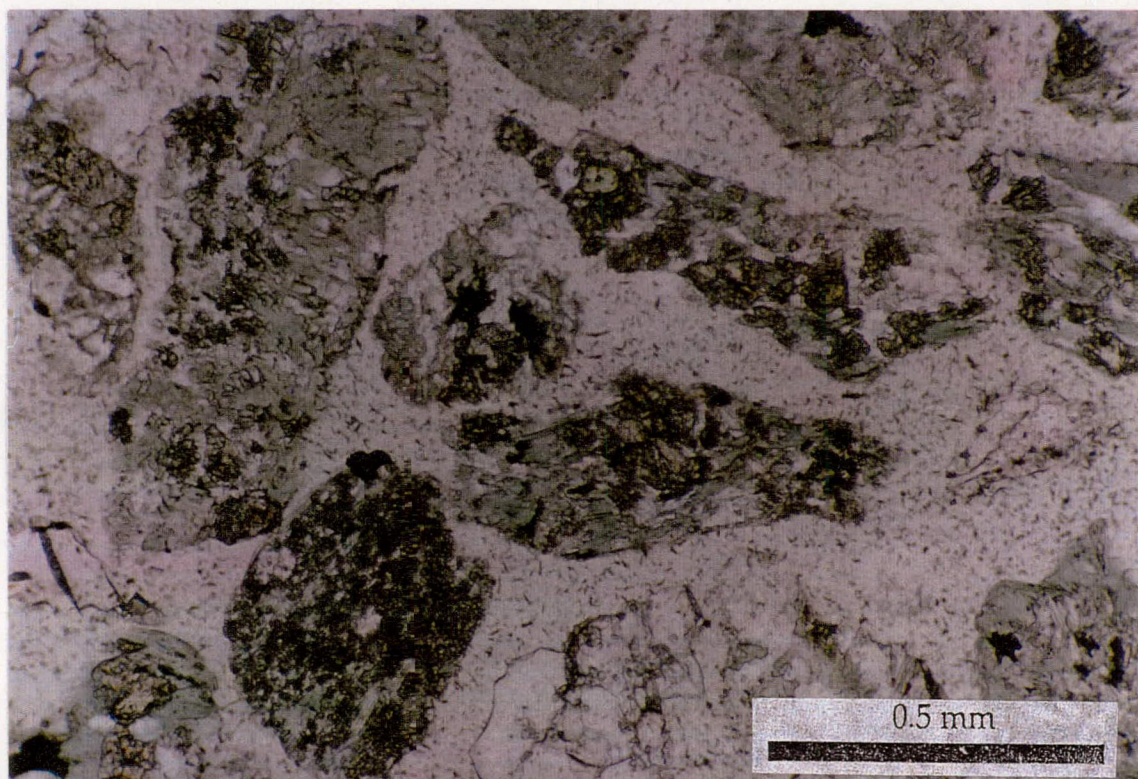


Photo 17 : Schiste à quartz-chlorite-épidote de Sherbrooke (L.N.)

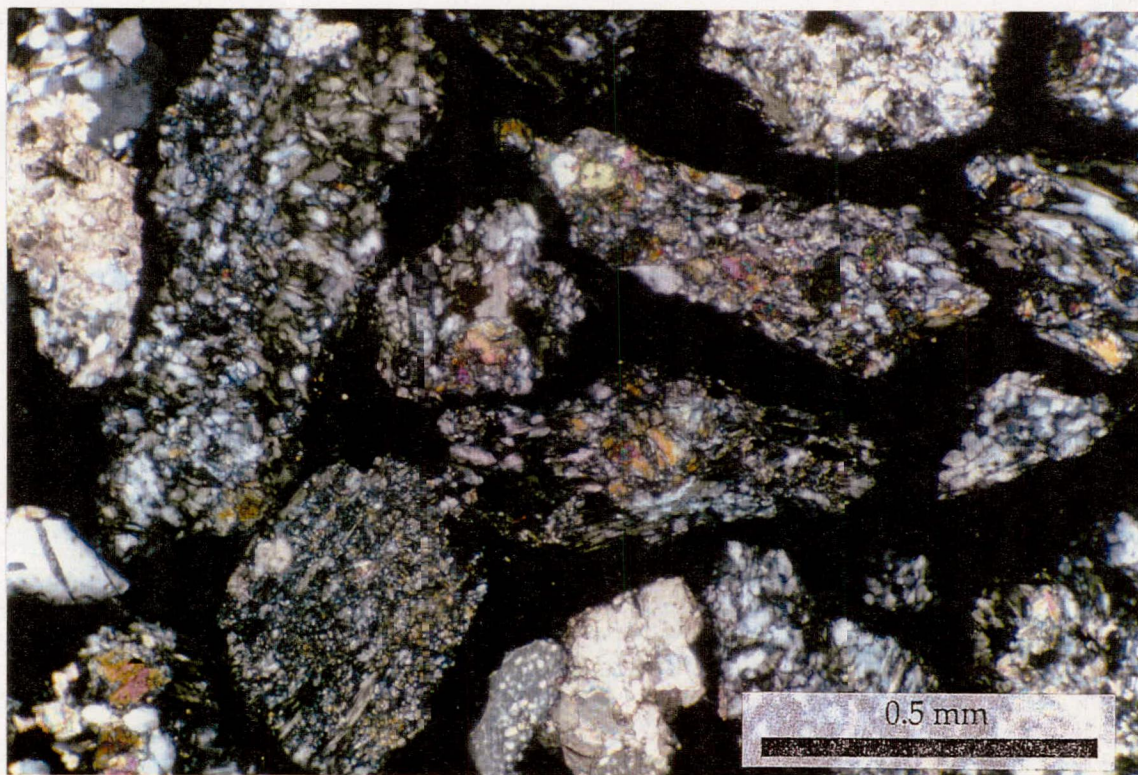


Photo 18 : Schiste à quartz-chlorite-épidote de Sherbrooke (L.P.)

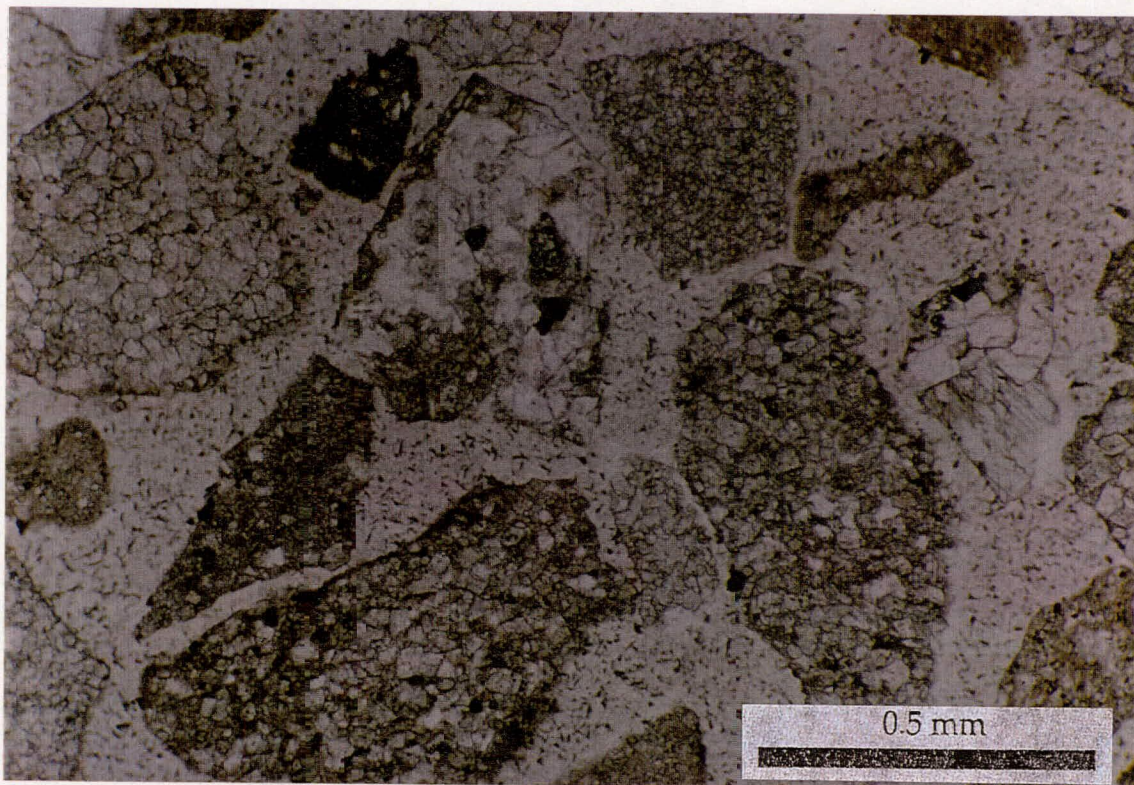


Photo 19 : Dolomie gréseuse de Coteau-du-Lac (L.N.)

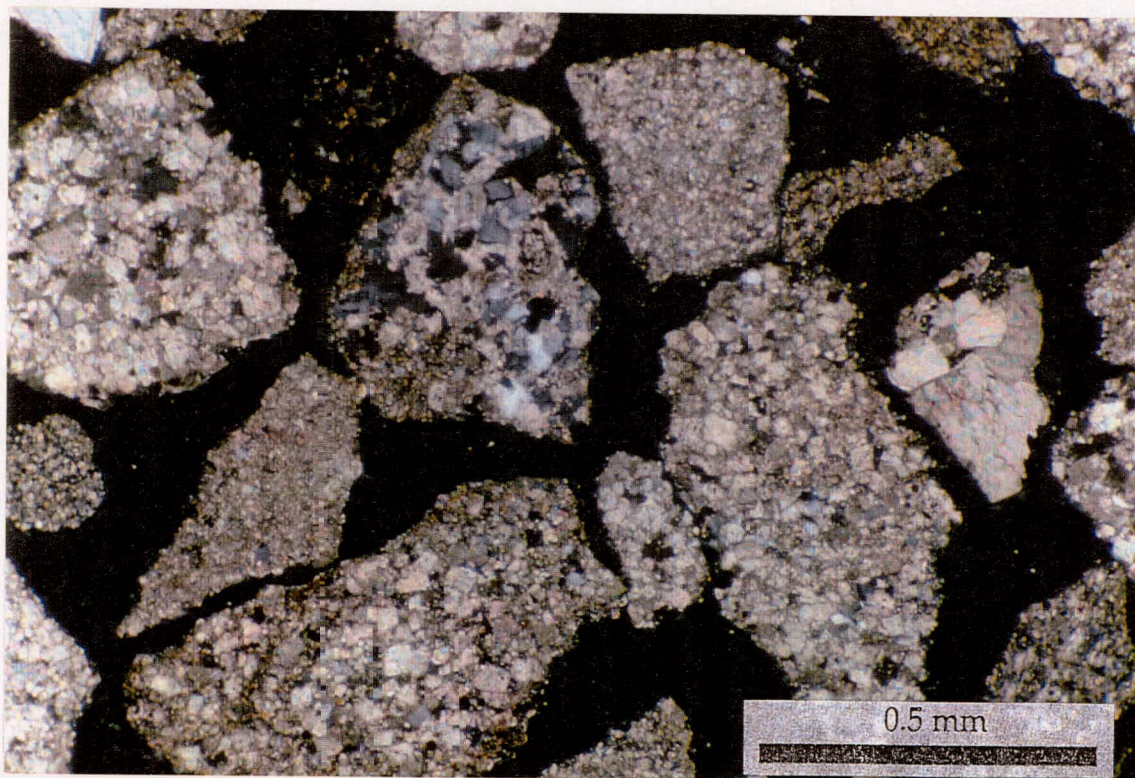


Photo 20 : Dolomie gréseuse de Coteau-du-Lac (L.P.)

TRAVAUX D'ANALYSE D'IMAGES (FORME ET RUGOSITÉ)

Ce chapitre explique la procédure utilisée pour la définition des paramètres de forme et de rugosité à l'aide du microscope électronique à balayage couplé avec un analyseur d'images et en présente les résultats.

Microscopie électronique à balayage et analyse d'images

Afin de mieux connaître les facteurs de forme macroscopique et microscopique de chaque source de granulat, le microscope électronique à balayage (MEB) a été utilisé. Ainsi, plusieurs facteurs ont pu être quantifiés. Le grossissement des particules s'est fait à l'aide du MEB tandis que l'analyseur d'images permettait la mesure de chaque paramètre. L'appareillage se composait d'un microscope de marque JEOL, modèle JSM-840A, et d'un système d'analyse d'images TN-8502/S, de la compagnie Noran Instruments. La photo 21 représente le type d'appareillage utilisé. Cinq lames minces polies ont été préparées pour chaque source de granulat, une pour chaque granulométrie : 1,25-2,5 mm, 630 μm -1,25 mm, 315-630 μm , 160-315 μm et 80-160 μm .

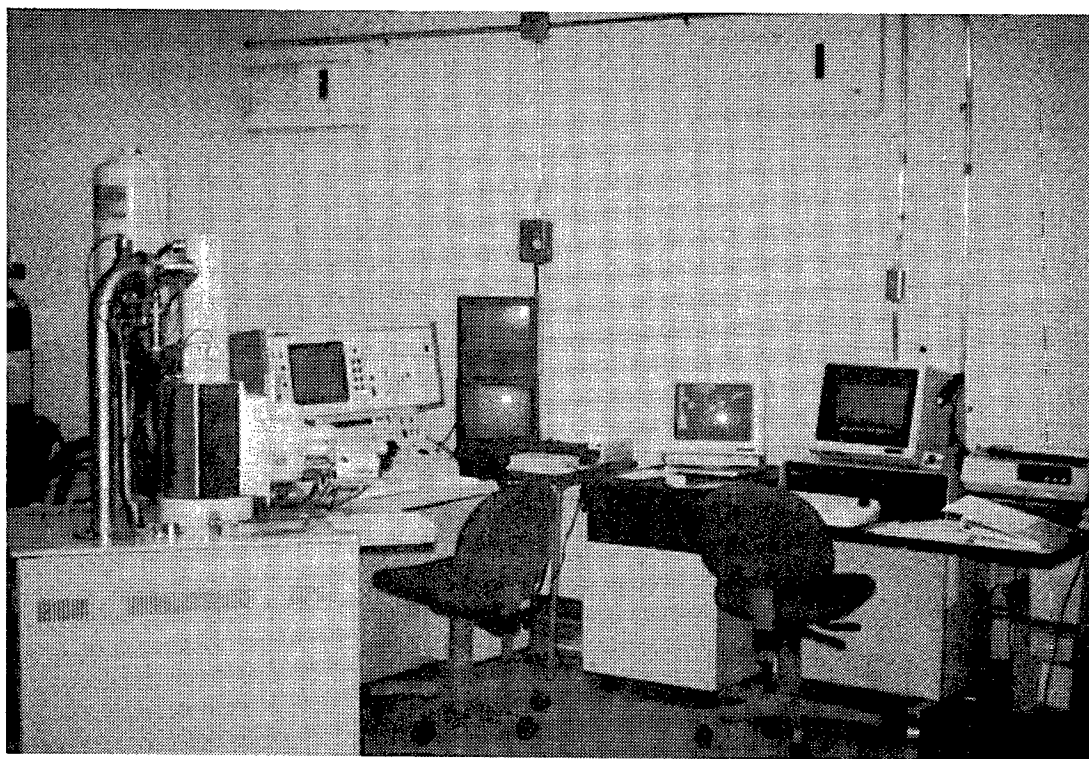


Photo 21 : Microscope électronique à balayage et analyseur d'images

Un mince dépôt d'un alliage or-palladium (Au-Pd) a été appliqué sous vide sur toutes les lames minces afin de contrer la mauvaise conductibilité thermique et électrique des minéraux et des roches.

Au total, 50 lames minces ont été étudiées. Sur chacune d'elles, environ 200 particules ont été choisies aléatoirement et analysées individuellement pour tous les paramètres suivants : coefficient de rugosité, aire, périmètre, circularité, aire convexe, périmètre convexe, projections maximale et minimale, largeur et rapport projection maximale/largeur (rapport de forme).

Paramètres mesurés

Les paramètres choisis avaient pour but de donner un aperçu de la forme, de l'angularité, de la sphéricité et de la rugosité de chaque particule.

Aire

Cette fonction calcule la surface de la particule ; c'est la somme de tous les pixels composant celle-ci.

Aire convexe

Les concavités d'une particule étant comblées par des lignes imaginaires, l'aire convexe est la surface de la particule plus les surfaces des parties imaginaires créées. De cette façon, la particule devient plus lisse que sa forme originale. Plus le rapport aire convexe/aire s'approche de 1, moins la particule a d'aspérités. Ainsi, l'aire convexe sera toujours plus grande que l'aire ordinaire, ce qui est le contraire dans le cas des périmètres (externe et convexe).

Périmètre

C'est la mesure du contour de la particule, en pixels.

Périmètre convexe

On applique ici le même principe que pour l'aire convexe, sauf que c'est le périmètre qui est calculé sur la particule sans concavité. Le périmètre convexe est toujours plus petit que le périmètre réel

ou égal à celui-ci, mais, comme pour le rapport aire convexe/aire, plus le rapport des périmètres s'approche de 1, moins la particule montre d'aspérités. Ce rapport est modifié par l'angularité et la texture superficielle des grains, alors qu'il l'est peu par la forme macroscopique (sphéricité).

Circularité (facteur de forme)

Ce paramètre permet normalement de calculer la sphéricité de la particule. Le calcul est tiré de la formule suivante :

$$(\text{périmètre})^2 / 4 * \pi * \text{aire}$$

Plus ce facteur s'approche de 1, plus la particule est ronde ou cubique, un cercle parfait donnant une valeur de 1. Puisqu'il fait intervenir le périmètre de la particule, ce paramètre sera donc aussi modifié par l'angularité et la texture superficielle (rugosité) de la particule.

Rapport de forme

C'est le rapport entre la dimension maximale de la particule sur sa largeur. Un rapport s'approchant de 1 indiquera la présence de grains équidimensionnels (particules arrondies ou cubiques). Par contre, plus celui-ci s'éloignera de 1, plus les particules seront allongées. C'est un facteur qui décrit surtout la forme macroscopique des grains (allongement ou sphéricité/cubicité) et qui est moins modifié par l'angularité et la texture superficielle.

Coefficient de rugosité

Celui-ci se calcule par la somme de 20 harmoniques de Fourier décrivant le périmètre. La formule utilisée est la suivante :

$$\Sigma^{20} i = \frac{1}{2} \sqrt{(R^2 + I^2)}$$

où R représente la partie réelle et I la partie imaginaire de la particule. Plus les résultats seront faibles, plus la particule aura une texture lisse et peu d'aspérités. Par contre, si les résultats sont élevés, les particules seront plus rugueuses. Toutefois, après observation on remarque que ce coefficient est modifié par la grosseur des particules. En effet, pour un même grain, le coefficient de rugosité

sera différent si on change le grossissement et la définition de l'image, c'est-à-dire le nombre de pixels composant l'image. Il faut donc s'assurer de l'équivalence des valeurs du pixel pour chaque granulométrie étudiée, et ce, en faisant varier le grossissement d'une granulométrie à l'autre pour toujours avoir environ le même nombre de particules (entre 15 et 20) dans le champ de l'écran. Ainsi, les particules étudiées auront environ les mêmes dimensions en ce qui concerne l'image et leur coefficient de rugosité sera donc comparable.

Tous ces paramètres caractérisent donc la forme (sphéricité, angularité) ou la texture superficielle des particules de chaque source ou les deux à la fois. Certains paramètres, tels le rapport de forme (longueur/largeur) et surtout la circularité, caractérisent mieux la sphéricité des grains. La circularité et le rapport des périmètres subissent l'influence de l'angularité des particules mais aussi de la texture superficielle de celles-ci. Par contre, le coefficient de rugosité décrit mieux la texture superficielle des échantillons, c'est-à-dire si les particules sont lisses ou plutôt rugueuses. La figure 3 présente le résumé des fonctions utilisées au MEB.

Les résultats présentés au tableau 4 consistent en des moyennes pondérées des valeurs obtenues pour chaque tranche granulométrique. En effet, les moyennes sont pondérées selon le pourcentage de chaque tranche granulométrique utilisée dans les mélanges. Rappelons que tous les mélanges avaient la même distribution granulométrique. En ce qui a trait à la fraction de sable, on retrouvait toujours 30 % de 1,25-2,5 mm (12 % du mélange total, mais 30 % de la fraction de sable), 20 % de 630 µm-1,25 mm (8 % du mélange total), 22,5 % de 315-630 µm (9 % du mélange total), 20 % de 160-315 µm (8 % du mélange total) et 7,5 % de 80-160 µm (3 % du mélange total). C'est avec ces pourcentages que l'on a obtenu les résultats du tableau 4 et de l'annexe B.

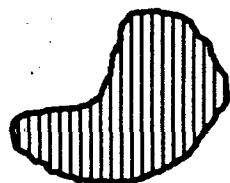
Séparation et élimination des particules parasites

Pour effectuer l'élimination des particules parasites et pour séparer les particules se touchant, une série d'opérations est nécessaire. Premièrement, une érosion doit être faite, c'est-à-dire qu'une rangée de pixels est enlevée uniformément autour de chaque particule. Cette opération est répétée trois fois permettant ainsi d'éliminer les grains trop petits et les parasites tels les poussières et le bruit de fond électronique. Cela permet également de séparer les grains se touchant légèrement ; les particules liées seront rejetées de façon manuelle afin d'éviter de fausser les résultats.

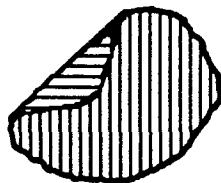
Figure 3

Résumé des fonctions utilisées au MEB

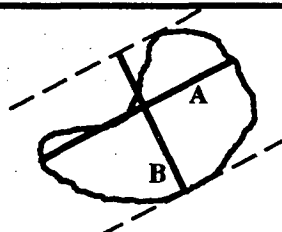
MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE À BALAYAGE



AIRE ET PÉRIMÈTRE



**AIRE ET PÉRIMÈTRE
CONVEXES**



**LONGUEUR MAXIMALE (A)
ET LARGEUR (B)**

CIRCULARITÉ : INDICE D'ARRONDISSEMENT D'UNE PARTICULE
 $(\text{PÉRIMÈTRE})^2 / (4 \cdot \pi \cdot \text{AIRE})$

RAPPORT DE FORME : RAPPORT ENTRE LA LONGUEUR MAXIMALE ET LA LARGEUR

**RUGOSITÉ : COEFFICIENT DE 20 HARMONIQUES DE FOURIER DÉCRIVANT
LE PÉRIMÈTRE D'UNE PARTICULE**

RAPPORT DES PÉRIMÈTRES : PÉRIMÈTRE EXTERNE/PÉRIMÈTRE CONVEXE

Tableau 4

Résultats obtenus au MEB pour les facteurs de forme et de rugosité

	GRL	GRG	DOL	SCC	SYE	SCO	GRE	PHO	COR	CAL
Rugosité	19,14	16,84	21,42	20,69	22,92	17,37	20,56	23,58	22,31	20,97
Circularité	2,492	1,822	1,892	2,592	2,607	3,661	2,161	2,702	2,678	2,282
Rapport de forme	1,645	1,513	1,892	1,710	1,760	1,469	1,618	1,870	1,795	1,782
Rapport des périmètres	1,337	1,117	1,241	1,370	1,314	1,640	1,253	1,323	1,345	1,254

Par la suite, une reconstitution de l'image érodée en fonction de l'image originale permet d'obtenir une nouvelle image ne contenant plus de particules indésirables et où la majorité des grains ne se touchent plus. C'est à partir de cette dernière image que tous les paramètres sont calculés. D'ailleurs, afin d'éviter la répétition des opérations, l'élaboration de deux programmes informatiques s'est avérée fort utile. Le premier programme avait pour fonction d'enregistrer environ dix images provenant du microscope électronique à balayage. Ces images étaient ensuite conservées en mémoire pour l'analyse d'images. Le deuxième programme, beaucoup plus long, permettait le calcul des paramètres décrits auparavant. Il comportait les principales opérations telles l'érosion des particules, la reconstitution des images, la création des fichiers où étaient enregistrés les résultats et la mesure des paramètres. L'écriture de ces deux programmes a été faite avec un langage propre à l'appareil TN-850/S, d'où l'impossibilité de les transférer sur un autre type d'analyseur d'images. Ces deux programmes sont décrits à l'annexe A.

On passe ensuite à la deuxième étape d'élimination et de correction des particules indésirables. Elle s'effectue sur micro-ordinateur à l'aide d'un logiciel de calcul (dans ce cas, *Excel* a été utilisé). Les grains trop petits ou trop gros, les amas de plusieurs individus (particules non séparées) et les particules incomplètes qui n'ont pas été écartées durant le premier tri disparaissent donc. De plus, c'est avec ce logiciel de calcul que la moyenne et l'écart type des paramètres sont calculés pour chaque lame mince. La moyenne des paramètres pour le granulat à l'étude se trouve ensuite calculée en fonction du pourcentage de chaque granulométrie utilisée pour la fabrication du mélange testé à l'orniéreur. Ce sont donc des moyennes pondérées. Les compositions des mélanges sont d'ailleurs résumées à la section *Conception du mélange*.

ESSAIS DE CARACTÉRISATION PHYSICO-MÉCANIQUE ET D'ORNIÉRAGE

L'étude consistait à mettre en évidence différentes relations entre la résistance à l'orniérage et les caractéristiques propres à chaque granulat. Pour connaître les résistances à l'orniérage, l'orniéreur a été utilisé. Celui-ci, en recréant les conditions routières (compactage, trafic routier, etc.) permet d'obtenir une profondeur d'ornière pour un mélange donné. Pour les besoins de l'étude, deux séries de mélanges ont été créés, soit la première comportant la même fraction grossière ($> 2,5$ mm) mais des fractions fines et des fillers différents ($< 2,5$ mm). Cette série permet d'analyser la variation des profondeurs d'ornière par rapport à la fraction de sable en présence d'un filler de même origine que le sable. La deuxième série de mélanges ayant cette fois la même fraction grossière et le même filler minéral a été conçue afin d'isoler uniquement l'influence de la fraction ($80\text{ }\mu\text{m}$ -2 mm) (voir, plus loin, la figure 4).

D'autres essais ont été effectués dans le but de faire ressortir les caractéristiques les plus influentes des granulats. Ainsi, des essais déterminant les performances mécaniques, l'absorption de différents produits (eau, mercure, bleu de méthylène et éthylène glycol), la porosité et le temps d'écoulement ont été menés à bien.

Si l'on compare tous les paramètres obtenus aux profondeurs d'ornière, il est donc possible d'évaluer les relations les plus significatives avec chaque paramètre ou combinaison de paramètres. De courtes descriptions des essais effectués et l'analyse des résultats obtenus sont présentés ci-après.

Essais physico-mécaniques

Résistance à l'abrasion (essai Los Angeles) (BNQ 2560-400)

Cet essai permet surtout de déterminer de la résistance à la fragmentation par choc ou pression et à l'abrasion (usure) par frottement réciproque.

Il est donc possible, avec cet essai, d'obtenir des prévisions en ce qui a trait aux performances mécaniques des granulats soumis à diverses contraintes telles que le malaxage, le compactage et l'action du trafic (pression des pneumatiques). Cet essai fournit donc de l'information sur la résistance à l'abrasion, la ténacité et la fragilité des minéraux composant les granulats.

On a effectué l'essai sur un échantillon de 5 kg de granulats de granulométrie 10-20 mm. Celui-ci est placé dans l'appareil Los Angeles (tambour cylindrique en acier de 71 cm de diamètre sur 51 cm de longueur) avec 11 ou 12 boulets (diamètre = 47 mm, masse = 390-445 g). Le cylindre subit ensuite 500 rotations à une vitesse de 33 tours par minute (tpm). Le résultat de l'essai Los Angeles se traduit en un pourcentage de pertes et représente le passant 1,7 mm. Plus les pertes sont élevées, moins le granulat se révèle résistant à la fragmentation. Les résultats sont présentés au tableau 5.

Abrasion (essai Micro-Deval humide) (BNQ 2560-070)

Cet essai renseigne surtout sur la résistance à l'usure des granulats en présence d'eau et donne un indice de la dureté des granulats. Il permet également d'évaluer et de prévoir certaines propriétés des mélanges telles que la résistance à l'usure.

L'appareillage consiste en un cylindre de 21 cm de diamètre sur 17 cm de longueur, dans lequel on insère 5 kg de billes (diamètre = 9,5 mm), 500 g de granulats et 2,5 litres d'eau. On soumet le tout à une rotation d'une durée de deux heures à une vitesse de 100 tpm. Le résultat se traduit aussi en une perte et représente le passant de 1,25 mm. Tout comme pour l'essai Los Angeles, plus les pertes sont importantes, moins le granulat est résistant à l'abrasion. Les résultats de cet essai sont illustrés au tableau 5.

Détermination du coefficient d'écoulement des granulats fins (BNQ 2560-075)

Cet essai représente un outil important en ce qui a trait à l'appréciation de l'angularité et de la rugosité des granulats fins manufacturés ou naturels utilisés pour la fabrication du béton bitumineux. On en tire le coefficient d'écoulement, lequel montre une relation de proportionnalité avec l'angularité (BNQ 2560-075). Celle-ci est d'autant plus marquée que le coefficient est élevé. La densité brute des granulats fins est considérée dans le calcul du coefficient.

L'essai consiste à chronométrer le temps d'écoulement d'un échantillon de granulat. Celui-ci subit l'influence de plusieurs facteurs tels que les caractéristiques de surface, la forme et la granulométrie des particules. Les granulats sont placés dans un cylindre ayant une surface intérieure polie. On les laisse ensuite s'écouler tout en notant le temps nécessaire à cette opération. Pour obtenir des

résultats valables, il faut mesurer au moins cinq valeurs d'écoulement avec une précision de 30 centièmes de seconde (0,30 s). La moyenne des cinq résultats servira au calcul du coefficient d'écoulement avec la formule suivante :

$$C_e = t * Dgb/k$$

où C_e est le coefficient d'écoulement, t , le temps d'écoulement moyen des cinq lectures, Dgb , la densité brute du granulat fin et k , une seconde.

L'essai ainsi que l'appareillage nécessaire sont décrits dans la norme 2560-075 du Bureau de normalisation du Québec. Les résultats obtenus pour tous les granulats sont donnés au tableau 5.

Durabilité au sulfate de magnésium (BNQ 2560-450)

Cet essai informe sur la durabilité globale des granulats aux intempéries. On l'applique souvent aux granulats servant à la fabrication du béton de ciment et du béton bitumineux.

L'essai recrée supposément l'effet du gel puisque les échantillons subissent cinq cycles de trempage dans une solution saturée de $MgSO_4$ et de séchage à l'étuve, lequel entraîne la déposition de cristaux de sel. Ceux-ci, en cristallisant à l'intérieur des pores des particules, désagrègent alors les particules. On calcule les pertes de masse pour chaque dimension de particules testées. Le principe est le même que pour les essais Los Angeles et Micro-Deval puisque plus les pertes sont élevées, moins le granulat est résistant. Les résultats sont présentés au tableau 5.

Absorptivité et surface spécifique

Essai avec le bleu de méthylène (BNQ 2560-255)

Le résultat de cet essai est communément appelé la « valeur au bleu ». L'essai est effectué selon la norme 2560-255 du Bureau de normalisation du Québec. Il détermine la capacité d'adsorption ionique des sols et des granulats. En fait, il mesure surtout l'abondance et la capacité d'adsorption des minéraux argileux des granulats et permet d'évaluer le stade de pollution des matériaux par de l'argile.

Tableau 5
Résultats des essais physico-mécaniques

	GRG	CAL	GRE	GRL	SCO	PHO	SYE	COR	SCC	DOL
Abrasion Essai Los Angeles (%)	43,00	18,33	25,70	29,51	20,00	14,28	17,60	11,10	20,50	18,14
Abrasion Essai Micro-Deval (%)	12,80	15,99	20,72	18,04	8,95	4,11	5,59	5,59	22,33	7,40
Coefficient d'écoulement	81,23	94,37	95,49	98,59	85,14	103,42	103,66	123,40	97,45	89,94
MgSO ₄ (%)	4,88	3,98	5,70	2,74	0,27	1,12	0,96	0,74	1,41	2,03
Nombre pétrographique	105,00	119,11	108,71	135,50	121,00	102,41	100,00	102,81	125,09	107,71
Densité	2,65	2,66	2,65	2,91	3,07	2,52	2,70	2,79	2,81	2,79

Le bleu de méthylène a pour caractéristique d'être rapidement adsorbé sur les surfaces externes et internes des minéraux argileux. Par contre, son adsorption par les autres minéraux demeure négligeable, donc la quantité de bleu adsorbé reflète bien la surface active des minéraux argileux.

Le mode opératoire se résume ainsi : on prépare environ 50 g de matériel passant le tamis 400 μm auquel on ajoute 100 ml d'eau distillée. Par contre, dans le cas des sables, seule la fraction «160-315 μm » a été utilisée pour cet essai. On laisse le mélange au repos pour une période de 24 heures. Pendant la durée de l'essai, on fournit une agitation permanente au mélange. Des doses de bleu de méthylène sont ensuite injectées afin de saturer les particules avec les molécules de celui-ci.

Le test de la tache est alors effectué. Il consiste à prélever un échantillon de la suspension, à l'aide d'une baguette de verre, que l'on dépose sur un papier filtre. On forme ainsi une tache d'environ 10 mm de diamètre qui montre une zone centrale colorée (bleue) entourée d'une auréole incolore. Le test est dit négatif si cette auréole devient incolore, et positif si elle demeure bleu clair. Dans le premier cas, on augmente la quantité de bleu dans le mélange et on recommence le test de la tache. Dans le deuxième cas, on patiente cinq minutes tout en répétant le test à quelques reprises pour s'assurer que l'auréole demeure toujours colorée. Si tel est le cas, à la fin du temps d'attente, on note le dosage de la solution de bleu.

On calcule ensuite la valeur au bleu de la prise d'essai avec la formule suivante :

$$VB = V/Ms$$

où VB est la valeur au bleu en cm^3/g ; V, le dosage de la solution en bleu en cm^3 ; et Ms, la masse sèche de l'échantillon en grammes. Les valeurs plus fortes indiqueront des sols ou des sables contenant beaucoup de minéraux argileux.

Ce test peut s'avérer très utile, car il permet de déterminer la présence de minéraux argileux dans les matériaux. En effet, à l'état libre (argiles), ces minéraux peuvent être très néfastes dans les mélanges bitumineux, car ils nuisent à l'adhésion entre les granulats et les liants et diminuent de ce fait la résistance et la durabilité des produits conçus avec ces granulats. L'essai indique donc la surface spécifique d'un granulat donné, autant interne qu'externe. Le tableau 6 présente les résultats de cet essai.

Il est à noter que cet essai s'applique surtout dans le cas des sables et des graviers, et beaucoup moins dans le cas des criblures provenant des carrières.

Essai avec l'éthylène glycol

Tout comme pour l'essai avec le bleu de méthylène, l'adsorption de l'éthylène glycol donne en principe des valeurs de surface spécifique interne et externe. L'essai est effectué habituellement sur un matériau passant le tamis 400 μm , mais encore une fois, pour la présente étude, la fraction «160-315 μm » a été utilisée pour avoir des résultats plus représentatifs de la fraction de sable.

L'essai consiste à évaluer l'adsorption d'éthylène glycol par le granulat. La surface spécifique totale est calculée en divisant par 0,000286 g/m^2 le nombre de grammes d'éthylène glycol adsorbés par gramme de sol.

Cet essai est souvent employé en Europe (France) puisque l'éthylène glycol et le bitume tendent à avoir les mêmes comportements (même viscosité, par exemple) à des températures élevées (température de malaxage). Les résultats paraissent également au tableau 6.

Cet essai s'applique autant pour les granulats naturels provenant des sablières-gravières que pour ceux qui sont manufacturés en carrière.

Tableau 6

Résultats des essais d'absorptivité et de surface spécifique

	GRG	CAL	GRE	GRL	SCO	PHO	SYE	COR	SCC	DOL
Valeur au bleu (%)	0,031	0,067	0,090	0,084	0,012	0,029	0,017	0,035	0,031	0,078
Éthylène glycol (m ²)	2,590	8,450	6,150	1,280	5,080	2,060	0,730	1,470	1,300	5,040
Microporosimétrie(cc de mercure)	0,119	0,2017	0,1258	0,1540	0,2164	0,2362	0,1483	0,2223	0,1689	0,0941
Absorption (%)	0,530	2,070	1,070	1,250	2,070	0,700	0,610	1,340	0,650	0,620

Microporosimétrie (absorption du mercure)

Cet essai consiste en l'étude de la porosité d'un granulat donné. La porosité d'un granulat se révèle très importante en ce qui a trait aux mélanges bitumineux. En effet, le degré d'absorption du liant (bitume) va subir l'influence de la porosité de l'échantillon. Plus la porosité est grande, plus le bitume sera absorbé dans les pores du granulat, ce qui peut modifier la quantité de bitume actif dans le mélange. Moins de bitume peut changer les propriétés du béton bitumineux et modifier la force de liaison granulat-liant.

Pour mener à bien ce test, un microporosimètre (*Micromeritics Pore sizer 9310*) a été utilisé. Le principe de cet instrument est de faire pénétrer du mercure (Hg) dans un échantillon de granulat en augmentant progressivement la pression, et ce, afin de connaître non seulement la porosité totale (volume total de mercure absorbé) mais aussi la distribution des diamètres de pores. Le remplissage des plus gros pores s'effectue à de faibles pressions, tandis que celui des pores aux dimensions moindres nécessite des pressions plus élevées.

L'essai se déroule en deux étapes. La première a lieu à basse pression, c'est-à-dire en deçà de 0,849 kPa (23 psi). La deuxième étape se fait à de plus hautes pressions, soit à partir de 0,849 kPa (23 psi) jusqu'à environ 1088,4 kPa (29 500 psi).

Le résultat qui nous intéresse le plus est le volume total de mercure absorbé dans les pores, en fait la porosité totale. Dans le présent cas, on a utilisé environ de 2 à 3 grammes d'échantillon.

Les échantillons utilisés étaient des poudres, ce qui nécessite des pénétromètres différents ainsi que certaines précautions supplémentaires en fait de manipulation. Le volume des pénétromètres était de 5 cc et, au moment de la mise sous vide des échantillons, il fallait opérer plus lentement pour éviter que la poudre ne pénètre dans l'appareil. Les résultats obtenus sont présentés au tableau 6.

Densité et absorptivité (BNQ 2560-065-067)

On utilise ces essais pour connaître la capacité d'absorption d'eau des granulats et leur masse volumique. Cette dernière est nécessaire afin d'obtenir les quantités de matériaux voulues pour

les mélanges bitumineux. L'absorption d'eau peut être utile pour la fabrication des mélanges de béton bitumineux. On peut ainsi prévoir la quantité de bitume qui est absorbée par les granulats.

Les grandes lignes de l'essai d'absorption consiste à faire tremper les granulats dans l'eau pendant 24 heures, à les rendre dans un état saturé superficiellement sec (SSS) et à calculer le coefficient d'absorption qui s'exprime par la masse d'eau absorbée par rapport à la masse des granulats secs. Les résultats sont présentés au tableau 6.

Essais à l'orniéreur

Conception du mélange

Afin de travailler sur un mélange le plus réaliste possible, un exemple concret a été reproduit. En effet, le cas de l'autoroute 20, dans le secteur de Saint-Romuald, a été considéré dans la préparation du mélange testé. Dans le présent cas, il s'agit de mélanges du type MB-12.5. C'est également ce type de mélange qui a été employé pour la première étape du projet plus global dans lequel s'intègre la présente étude, étape réalisée au Département de génie civil de l'Université Laval. Ainsi, si l'on prend toujours le même mélange, la comparaison de certains résultats devient possible.

Pour chaque granulat, une première série de mélanges a été effectuée. Le granulat de Saint-Jean-Chrysostome (grès) est utilisé pour les tranches supérieures à 2,5 mm, tandis que, pour les tranches granulométriques plus fines ($< 2,5$ mm), la provenance des matériaux (sable et filler) varie d'un sujet à l'autre (dix sources). Cette série permet donc d'évaluer le comportement combiné du granulat fin et du filler puisque la partie grossière demeure constante.

Une deuxième série a aussi été testée (figure 4). En plus de la fraction grossière toujours constante, comme dans la première série de mélanges, l'utilisation du même filler minéral (calcaire de Charlesbourg) permet d'isoler uniquement l'influence de la fraction de sable sur la résistance à l'orniérage. La comparaison des résultats pour les deux séries de mélanges permet également d'obtenir l'action positive ou négative de chacun des fillers. Parmi les autres paramètres qui ne changent pas au cours de la préparation des mélanges, on trouve le pourcentage de bitume (toujours 4,97 % de la masse du mélange), le pourcentage de granulats (95,03 % du mélange), le type de bitume

(Ultramar 80-100), le degré de compacité (95 %) ainsi que le format du moule dans lequel les plaques de béton bitumineux sont fabriquées (9 000 cm³).

Parmi les autres caractéristiques principales du mélange se trouve bien sûr la distribution granulométrique, qui reflète la moyenne du lot utilisé pour la section de route de Saint-Romuald. Ainsi, 12 %, 28 %, 16 %, 12 %, 8 %, 9 %, 8 %, 3 % et 4 % correspondent dans l'ordre aux pourcentages de matériau retenu sur les tamis de 10 mm, 5 mm, 2,5 mm, 1,25 mm, 630 µm, 315 µm, 160 µm, 80 µm et inférieurs à 80 µm (filler). Ainsi, 56 % du mélange est constitué par le granulat grossier, 40 % par le granulat fin et 4 % par le filler minéral (figure 4). La courbe granulométrique des mélanges figure à l'annexe C.

Figure 4
Caractéristiques des mélanges utilisés

Dimension (mm)	10	5	2,5	1,25	630	315	160	80	FILLER
% passant	88	60	44	32	24	15	7	4	
% retenu	12	28	16	12	8	9	8	3	4

GRANULAT GROSSIER (> 2,5 mm) : GRÈS DE SAINT-JEAN-CHRYSTOME

SABLE (80 µm - 2,5 mm) : PROVENANCE VARIABLE

FILLER (< 80 µm) : 1) PROVENANCE IDENTIQUE À CELLE DU SABLE
2) CALCAIRE DE CHARLESBOURG

BITUME : ULTRAMAR 80-100

BITUME/GRANULATS : 4,97% / 95,03%

TYPE DE MÉLANGE : MB-12,5

La procédure pour la conception des mélanges demeure aussi constante. Premièrement, le calcul de la masse volumique maximale de chaque mélange est nécessaire. Pour obtenir celle-ci, on fait un mélange de 1 000 g en respectant les proportions de chaque constituant et de chaque granulométrie. Les granulats sont ensuite placés dans une étuve jusqu'à ce qu'ils atteignent environ 180 °C, tandis que le bitume doit atteindre une température d'environ 115 °C. Par la suite, ils sont mélangés ensemble

et introduits dans une fiole avec de l'eau. On enlève ensuite l'air (désaération) afin d'éviter l'influence de celui-ci sur les résultats. Avec les différentes masses obtenues, les températures mesurées et les chartes de correction et de calibration, le calcul de la masse volumique maximale devient possible. On répète les opérations trois fois, et la moyenne de ces essais devient la densité maximale pour le mélange. Les feuilles de tous les calculs pour les mélanges se trouvent à l'annexe D.

C'est cette masse volumique qui est utilisée pour définir les quantités (masse) exactes de granulats et de bitume nécessaires pour les mélanges. Ainsi, en multipliant cette masse volumique réelle par la compacité et le volume du moule, on obtient la masse totale du mélange. Pour connaître la masse de granulats et de bitume, on multiplie la masse totale par le pourcentage de chacun des constituants, soit 4,97 % pour le bitume et 95,03 % pour les granulats. La figure 4 résume les principales caractéristiques des mélanges.

Fabrication des plaques de béton bitumineux

Les plaques de béton bitumineux sont fabriquées à partir des mélanges présentés précédemment. À titre de rappel, mentionnons que la préparation du mélange granulométrique s'effectue en premier lieu, puis que celui-ci est chauffé à 180 °C pour au moins 24 heures, alors que le bitume est chauffé à 115 °C. Ce chauffage est nécessaire en ce qui a trait au malaxage du mélange, car il est plus facile d'enrober les granulats avec le bitume s'ils sont à température élevée.

Lorsque les ingrédients du mélange atteignent les températures désirées, on mélange ceux-ci à l'aide d'un malaxeur approprié. On transfère finalement le mélange de béton bitumineux dans le moule pour la fabrication des plaques, lesquelles mesurent 180 mm sur 500 mm sur 100 mm d'épaisseur après compactage à l'aide d'un pneumatique. Les plaques sont laissées au repos pendant 48 heures supplémentaires avant d'être soumises à l'essai d'orniérage. Il est à noter que la compaction atteinte pour chaque plaque confectionnée est de 95 %.

Essais

L'essai à l'orniérage consiste à provoquer la déformation d'une éprouvette de béton bitumineux par le passage répété d'un pneumatique reproduisant la pression d'un véhicule lourd. On mesure

ainsi la diminution relative de l'épaisseur de la plaque sous la roue, ce qui équivaut à la profondeur d'ornière.

L'appareil utilisé est l'orniéreur du type LPC mis au point en Europe, plus précisément en France. Le premier prototype a été expérimenté en 1968 et a donné naissance en 1970 à la version actuelle de l'orniéreur (Grimaux et Hiernaux, 1977). L'utilisation de ce type d'appareil est très récente au Québec (moins de dix ans), et on le retrouve pour l'instant au Laboratoire des chaussées du ministère des Transports du Québec où il est fréquemment utilisé en vue de tester la résistance à l'orniérage des mélanges bitumineux. La photo 22 illustre l'appareil, tandis que la figure 6 (tirée de Grimaux et Hiernaux, 1977) schématise son fonctionnement.

Les conditions d'essai demeurent toujours constantes : la course du pneumatique est de 410 mm, la pression du pneumatique est de 6 bar, la charge roulante appliquée se situe à 5 000 N et la température est comprise entre 60 °C et 70 °C. Ces conditions d'essai sont résumées à la figure 5. Pour la première série d'essais (filler de même composition que la fraction de sable), deux plaques ont été testées pour tous les granulats. Par contre, pour la deuxième série (filler calcaire constant), une seule plaque a été construite pour chaque fraction de sable (manque de matériel).

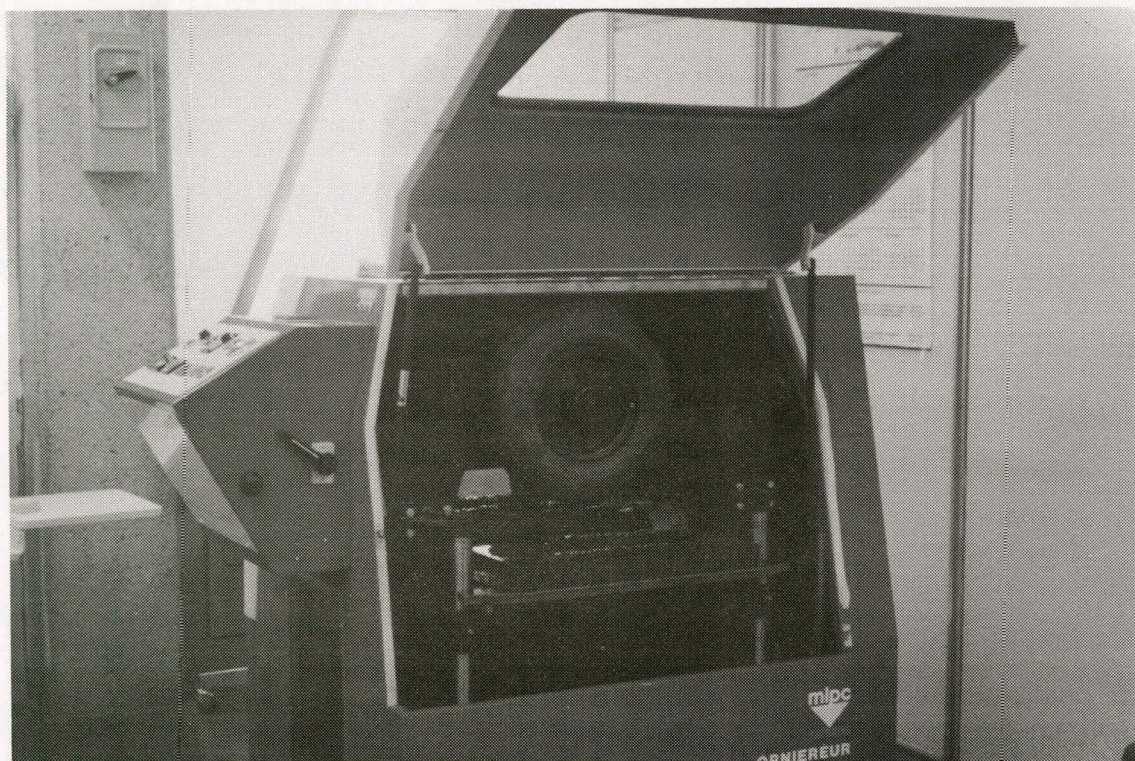


Photo 22 : Orniéreur du type LPC

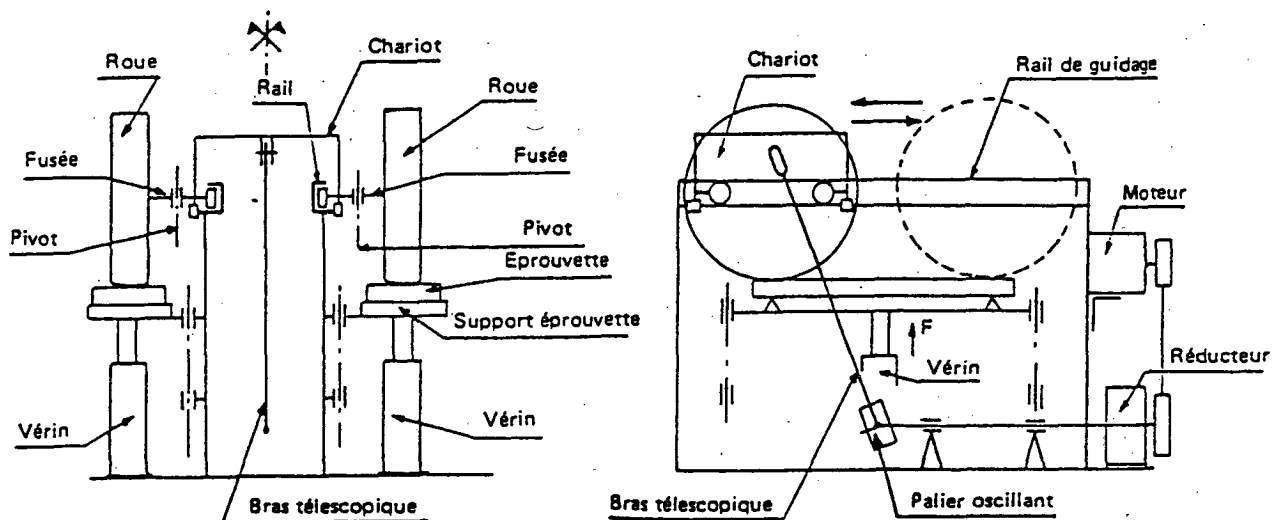
Figure 5

Conditions d'essai pour l'orniéreur

COURSE DU PNEUMATIQUE : 410 mm (± 5 mm)
FRÉQUENCE DU MOUVEMENT RELATIF : 1 Hz ($\pm 0,1$ Hz)
PRESSION DU PNEUMATIQUE : 6 bar ($\pm 0,1$ bar)
CHARGE ROULANTE APPLIQUÉE : 5000 N (± 50 N)
TEMPÉRATURE : 60 °C
COMPACTION DES ÉPROUVETTES : 95 %
NOMBRE DE CYCLES : 30 000

Figure 6

Principe de l'appareil utilisé



Source : Grimaux et Hiernaux (1977).

La méthodologie de l'essai est identique pour tous les mélanges. Initialement, le moule comprenant l'éprouvette est fixé sur la plaque de support. L'éprouvette subit 1 000 cycles de la charge roulante à la température de la pièce (de 15 à 25 °C). Les premières mesures sont alors prises sur la plaque pour avoir le profil initial de l'éprouvette. L'essai comme tel commence par la suite. La température à l'intérieur de l'enceinte de l'appareil est réglée à la température d'essai (60 °C) et elle est contrôlée par une sonde placée à l'intérieur de l'échantillon.

La charge roulante est ensuite appliquée et, à un nombre donné de cycles, les profondeurs d'ornièrerie de la plaque sont mesurées en différents points (15). Celles-ci sont lues après 100, 300, 1 000, 3 000, 10 000 et 30 000 cycles (un cycle équivaut à un aller-retour du pneumatique sur la plaque). Les valeurs de profondeur d'ornièrerie correspondent à la moyenne des 15 points mesurés sur l'éprouvette. Finalement, l'essai est interrompu lorsque la moyenne des profondeurs d'ornièrerie dépasse 15 mm. Mentionnons qu'un même nombre de courses ont été effectuées au centre, à gauche et à droite des plaques.

Avec les résultats obtenus, il est possible de tracer, sur un graphique à coordonnées logarithmiques, la courbe d'évolution de l'ornièrerie en fonction du nombre de cycles. On peut alors obtenir une relation du type $Y = A * (X)^b$, où Y est la profondeur d'ornièrerie après le x^e cycle, X le nombre de cycles et b la pente de la droite en coordonnées logarithmiques. C'est avec cette droite que l'on peut estimer les profondeurs d'ornièrerie à 30 000 cycles si la plaque ne résiste pas jusqu'à ce nombre de courses (plaques peu résistantes). Donc, pour garder un degré de comparaison acceptable, il faut prendre les profondeurs d'ornièrerie calculées avec la droite, et ce, pour tous les granulats testés. Cependant, les valeurs réelles et les valeurs approximatives de la droite sont très rapprochées. Le tableau 7 présente les profondeurs d'ornièrerie approximatives (avec la droite) à 17 000 et à 30 000 cycles pour les deux séries de plaques (fillers différents, filler identique au sable et filler calcaire). L'équation de la droite, pour la deuxième série de plaques (filler calcaire), s'y retrouve également pour chaque granulat.

Les résultats en caractères gras représentent ceux qui ont été utilisés ci-après pour la recherche des paramètres les plus influents en ce qui concerne l'ornièrerie. Ce sont les résultats obtenus pour les plaques ayant un granulat grossier (> 2,5 mm) et un filler (< 80 µm) constant, seule la fraction de sable changeait. Le chiffre entre parenthèses a été employé pour le granulat de Saint-Victor-de-

Beauce puisque sa valeur approximative était trop élevée et risquait d'influer sur l'allure des relations entre les différents paramètres.

Tableau 7

**Profondeurs d'ornièrre (mm) à 17 000 et à 30 000 cycles
pour les deux séries de plaques (fillers différents et filler calcaire constant)**

Granulat	Fillers différents		Filler calcaire		Équation
	17 000 cycles	30 000 cycles	17 000 cycles	30 000 cycles	
GRG	19,04	24,90	18,44	25,20	$0,085 * X^{0,552}$
CAL	6,05	7,80	5,58	7,70	$0,024 * X^{0,560}$
GRE	7,69	9,51	8,23	10,80	$0,084 * X^{0,471}$
GRL	25,76	37,00	38,58	57,00 (40)	$0,044 * X^{0,696}$
SCO	6,15	7,45	11,68	14,95	$0,169 * X^{0,435}$
PHO	8,49	10,33	8,23	11,1	$0,048 * X^{0,527}$
SYE	15,89	21,00	14,05	18,79	$0,095 * X^{0,512}$
COR	7,35	9,11	8,71	11,1	$0,120 * X^{0,440}$
SCC	10,07	13,18	15,69	21,00	$0,110 * X^{0,509}$
DOL	6,15	7,45	13,80	19,92	$0,026 * X^{0,645}$

En guise de conclusion, les figures 7 et 8 montrent l'allure générale des droites calculées pour chaque granulat. Encore une fois, on trouve les résultats pour les deux séries de mélanges testés. La figure 7 comporte les résistances à l'orniérage pour les plaques ayant toujours un filler calcaire et la figure 8, celles des plaques ayant des fillers différents (filler de même composition que la fraction de sable).

Figure 7

Orniérage en fonction du nombre de cycles (filler calcaire)

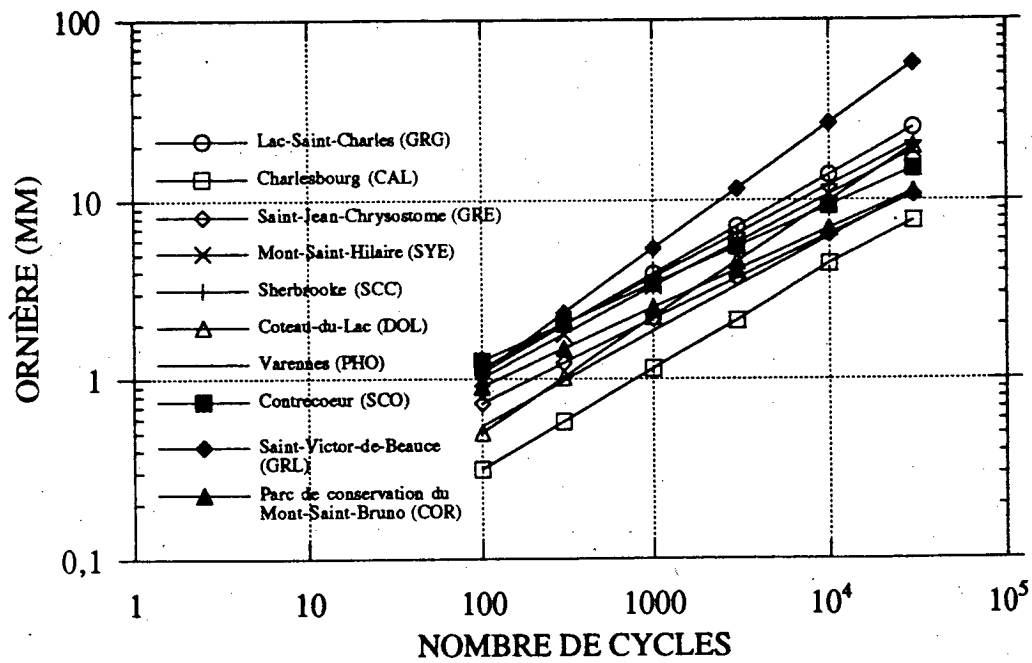
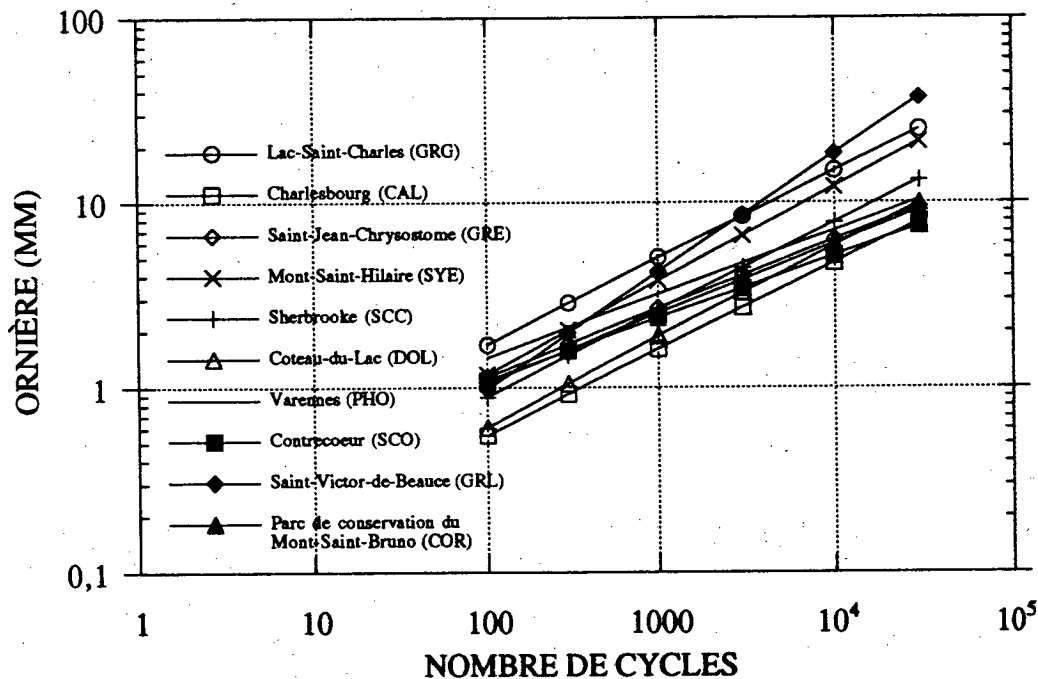


Figure 8

Orniérage en fonction du nombre de cycles (filler de même composition que le sable)



DISCUSSION DES RÉSULTATS

Ce présent chapitre contient la discussion sur les résultats et une mise en relation des différents paramètres mesurés pour les granulats et de leur résistance en ce qui a trait à l'orniérage. Dans un premier temps, les paramètres seront examinés sur une base individuelle pour savoir s'il existe un ou des paramètres qui expliquent principalement la résistance à l'orniérage des dix granulats testés. Un graphique de la résistance à l'orniérage en fonction de chacune des caractéristiques sera construit et analysé. En outre, une droite sera tracée par régression linéaire pour connaître les tendances des paramètres en fonction de la variation des profondeurs d'ornière.

Caractéristiques texturales et morphologiques mesurées au MEB

Circularité

Le paramètre de circularité est un paramètre de forme macroscopique (sphéricité, angularité) et microscopique (texture superficielle) des granulats, c'est-à-dire qu'il exprime la forme générale des particules. La figure 9 le montre en fonction de la profondeur d'ornière pour chacun des granulats. On y remarque une très faible corrélation (voire aucune relation) entre la profondeur d'ornière et la circularité. Une très légère tendance se dessine tout de même à partir de la droite de régression linéaire. Plus les valeurs de circularité sont élevées, moins la valeur de profondeur d'ornière tend à être importante.

En d'autres mots, la résistance à l'orniérage se trouve améliorée lorsque les grains tendent à s'éloigner de la forme sphérique ou cubique, ou encore lorsqu'ils présentent une plus forte angularité ou texture superficielle. Par contre, on note un facteur de corrélation (r) de 0,16, ce qui indique que ce paramètre est très loin d'expliquer cette résistance à lui seul.

Rugosité

La rugosité représente la texture superficielle des granulats. Autrement dit, cette fonction décrit le degré et la quantité d'aspérités présentes à la surface des grains. La figure 10 montre un facteur de corrélation moyen ($r = 0,43$) avec une tendance inversement proportionnelle entre la profondeur d'ornière et la rugosité.

On peut ainsi déduire du graphique qu'en général plus la rugosité tendra à être forte, moins les profondeurs d'ornièrre seront importantes.

Rapport de forme

Le rapport de forme caractérise surtout la forme macroscopique (sphéricité) du granulat. Il représente le rapport moyen de la dimension maximale des particules sur leur largeur, c'est-à-dire leur allongement. Plus le rapport de forme est élevé, plus les particules s'éloignent du cube ou du cercle.

La figure 11 indique que plus le rapport de forme est élevé (particules plus allongées), plus les profondeurs d'ornièrre diminuent. Il existe un facteur de corrélation de 0,28 pour cette tendance, ce qui est faible.

Rapport des périmètres (réel/convexe)

Le rapport du périmètre externe sur le périmètre convexe est un paramètre reflétant l'angularité et la texture superficielle des granulats. Plus ce rapport tend vers 1, plus la particule sera lisse et sans aspérités.

La figure 12 ne montre toutefois aucune tendance en ce qui a trait aux profondeurs d'ornièrre en fonction du rapport des périmètres. Le facteur de corrélation s'établit à 0,09, ce qui est très faible. Malgré tout, d'après la droite de régression, un rapport des périmètres élevé (angularité et rugosité plus grandes) tendra à faire diminuer les profondeurs d'ornièrre, mais très légèrement.

Figure 9

Profondeur d'ornière versus circularité

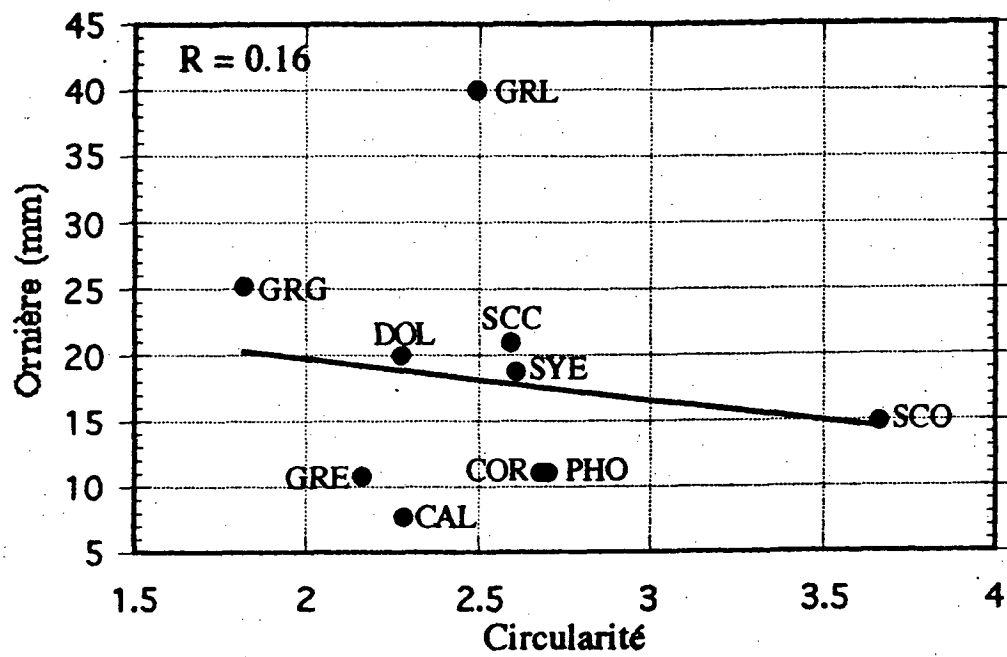


Figure 10

Profondeur d'ornière versus rugosité

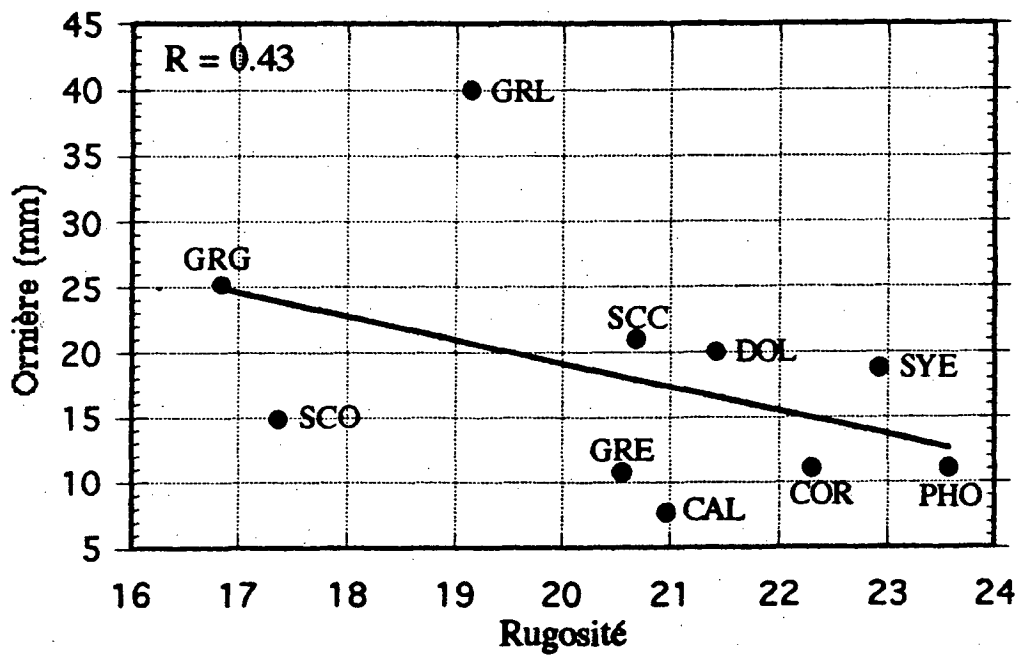


Figure 11

Profondeur d'ornière versus rapport de forme

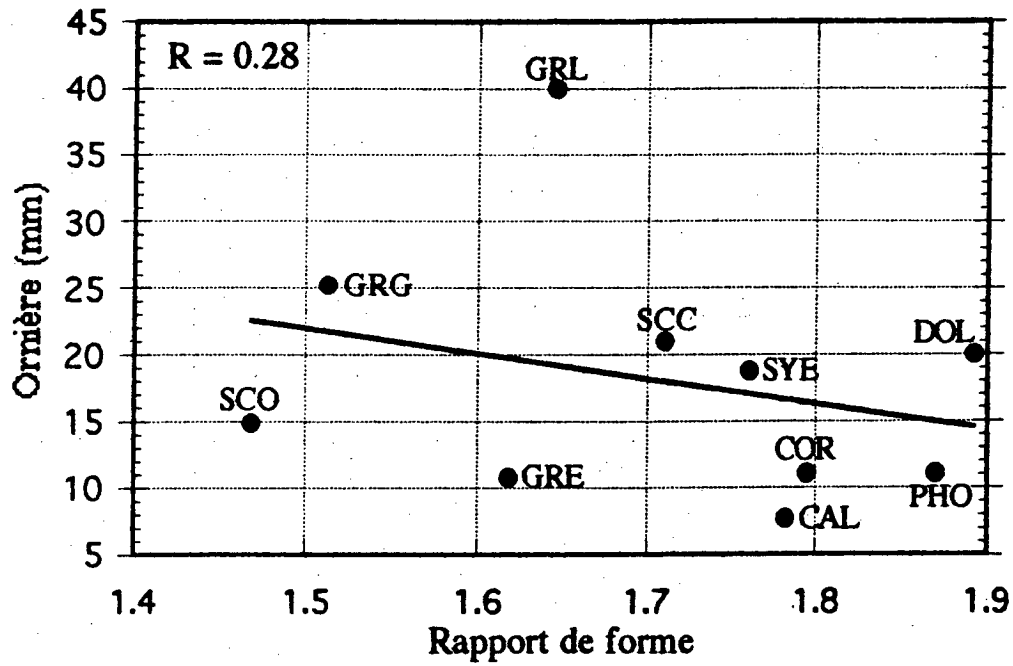
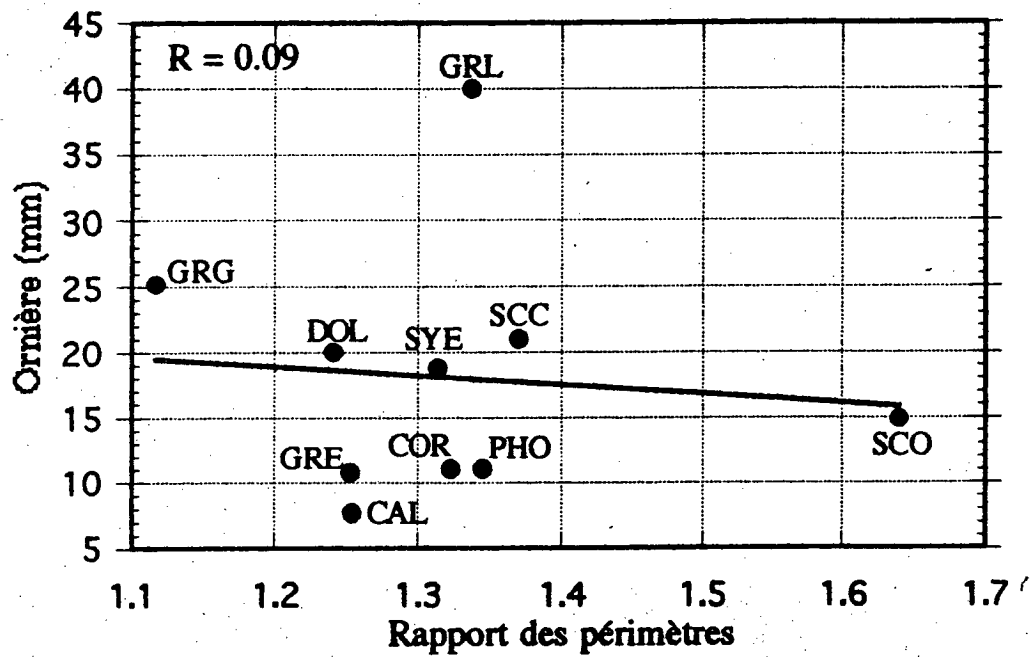


Figure 12

Profondeur d'ornière versus rapport des périmètres (réel/convexe)



Essais physico-mécaniques

Abrasion (essai Los Angeles)

La figure 13 met en relation le résultat à l'essai Los Angeles et les profondeurs d'ornièrre. On voit une tendance assez nette entre les deux paramètres. En effet, plus les pertes à l'essai Los Angeles sont élevées (moins le granulat est résistant à la fragmentation par choc ou pression) et plus la profondeur d'ornièrre augmentera. Cette relation va de moyenne à bonne, car le facteur de corrélation obtenu est égal à 0,57. On parle toujours d'une tendance.

Abrasion (essai Micro-Deval humide)

La figure 14 indique une très faible tendance selon laquelle plus le pourcentage de pertes à l'essai Micro-Deval est élevé (moins le granulat est résistant à l'abrasion), plus les profondeurs d'ornièrre seront importantes. C'est un peu le même genre de relation que pour l'essai Los Angeles, sauf que le coefficient de corrélation est beaucoup plus faible ($r = 0,28$).

Coefficient d'écoulement

On peut voir sur la figure 15 les profondeurs d'ornièrre en fonction du coefficient d'écoulement. Le facteur de corrélation entre ces deux paramètres est très faible ($r = 0,24$), ce qui indique que ce n'est pas uniquement ce paramètre qui explique surtout la résistance à l'orniérage des granulats testés. Il existe toutefois une tendance qui montre qu'en général plus le coefficient d'écoulement tend à être élevé, meilleure est la résistance à la formation d'ornières.

Le coefficient d'écoulement dépend de la forme (sphéricité, angularité) et de la texture superficielle, soit des caractéristiques mesurées avec le MEB. La comparaison des résultats obtenus avec les deux séries de résultats sera faite plus loin dans le présent chapitre.

Figure 13

Profondeur d'ornière versus pertes à l'essai Los Angeles

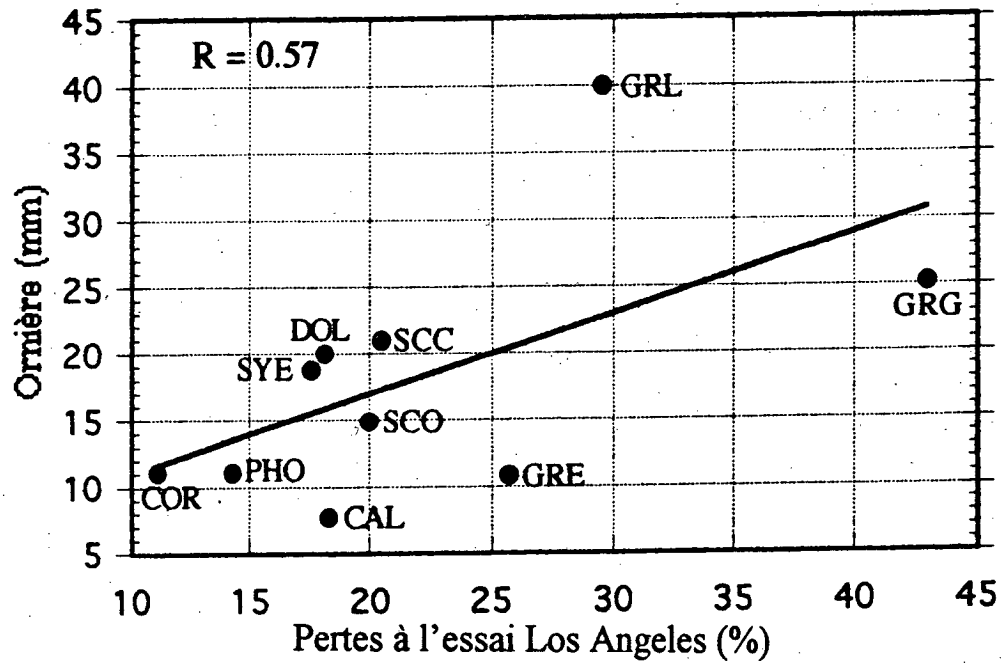


Figure 14

Profondeur d'ornière versus pertes à l'essai Micro-Deval humide

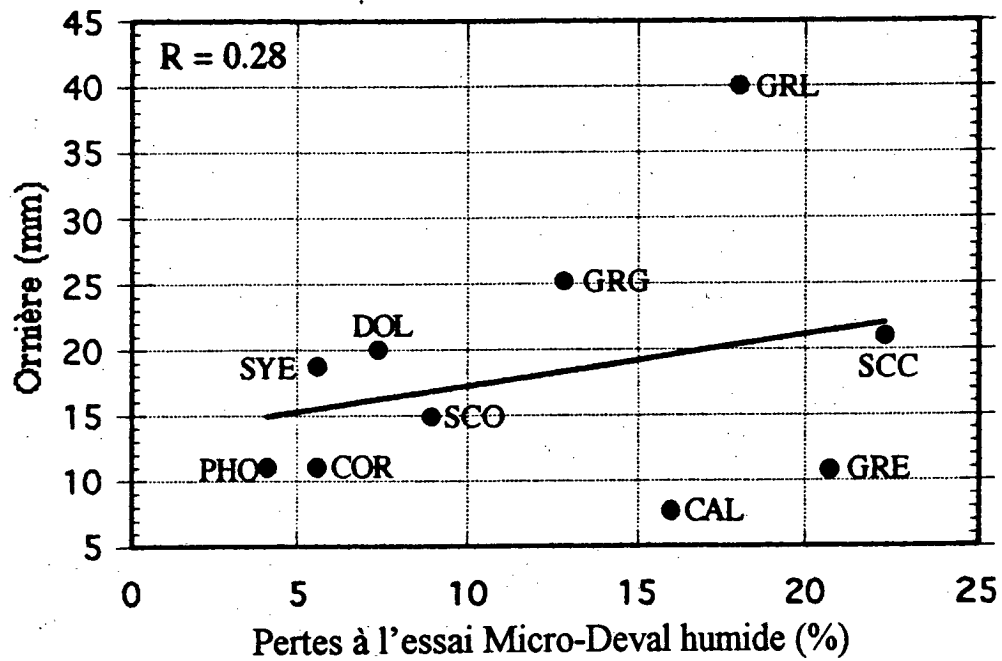
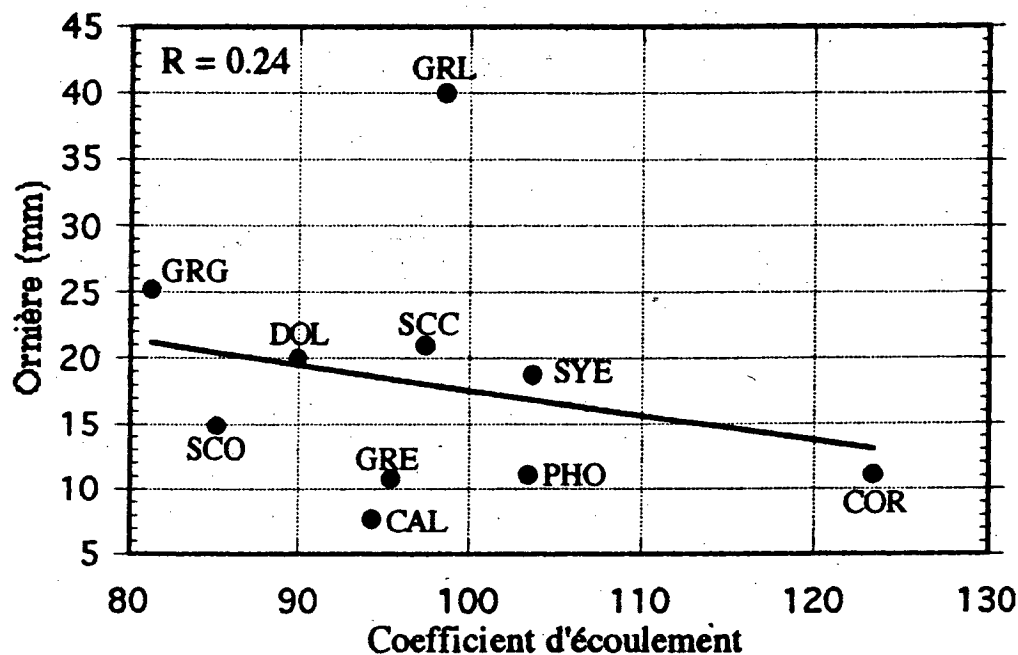


Figure 15

Profondeur d'ornièrre versus coefficient d'écoulement



Durabilité au sulfate de magnésium ($MgSO_4$)

La figure 16 ne montre aucune relation entre les pertes au sulfate de magnésium et la résistance à l'orniérage. Cet essai n'est donc pas très significatif au point de vue de la résistance à l'orniérage, du moins pour les dix granulats sélectionnés.

Absorptivité et surface spécifique

Valeur au bleu de méthylène

La figure 17 laisse voir une très faible relation entre l'orniérage et les valeurs au bleu. On note un facteur de corrélation de seulement 0,20. La droite de régression suggère que plus les valeurs au bleu sont élevées (surface spécifique interne et externe plus grande), moins bonne sera la résistance à l'orniérage, ce qui va à l'encontre de tous les autres paramètres d'absorptivité ou de surface spécifique.

Figure 16

Profondeur d'ornière versus pertes au $MgSO_4$

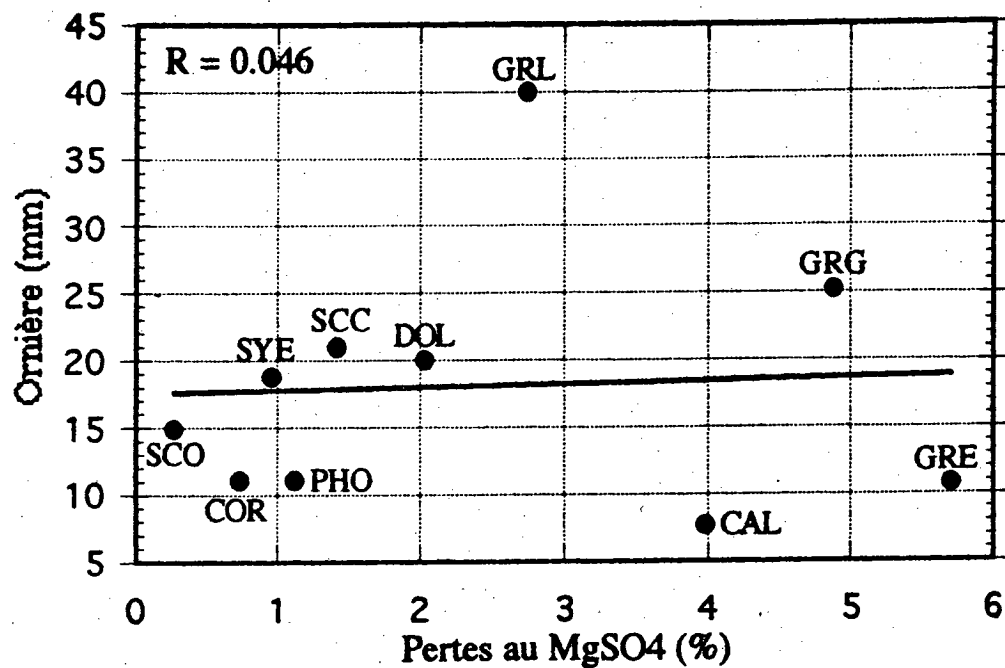
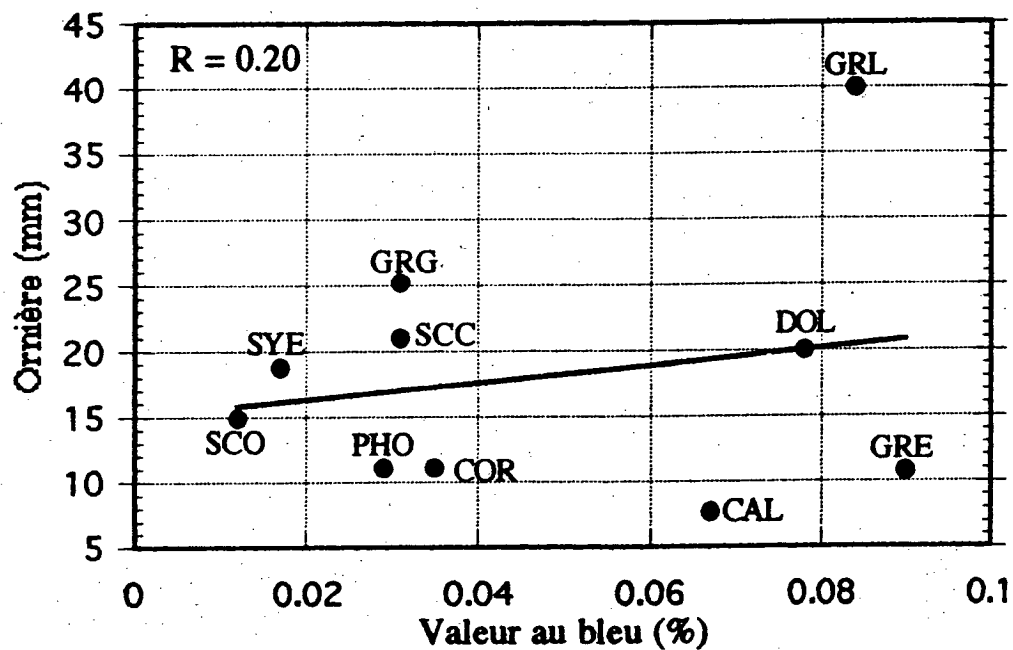


Figure 17

Profondeur d'ornière versus valeur au bleu



On peut affirmer que la valeur du gravier lithique (GRL) influe beaucoup sur l'allure de la relation et que, si on écartait celle-ci, la tendance serait légèrement inversée. On remarque également que les valeurs d'orniérage les plus fortes sont associées aux granulats ayant le plus de minéraux argileux. Rappelons que l'essai au bleu subit beaucoup plus l'influence de la quantité de minéraux argileux que de la porosité des granulats. Comme exemple, on peut citer le cas de la scorie d'acier qui montre une faible valeur au bleu (donc une faible surface spécifique interne et externe), alors qu'on sait qu'elle est très poreuse. Par contre, elle ne contient pas de minéraux argileux, ce qui explique sa faible valeur au bleu de méthylène.

Éthylène glycol

On note une tendance générale inversement proportionnelle entre les valeurs de surface spécifique et celles de l'orniérage. En effet, plus les valeurs de surface spécifique sont élevées (grande adsorption de l'éthylène glycol), meilleure semble la résistance à l'orniérage (profondeurs d'ornière moindres). Cet essai n'explique toutefois pas cette résistance à lui seul puisque l'on constate un facteur de corrélation de seulement 0,50 (voir figure 18).

Cependant, contrairement à l'essai avec le bleu de méthylène, on obtient des valeurs de surface spécifique fortes pour la scorie d'acier, et faibles pour le gravier lithique. Pour la scorie d'acier (SCO), très poreuse mais exempte de minéraux argileux, l'adsorption de l'éthylène glycol est quand même grande, tandis que, pour le gravier lithique (GRL), peu poreux mais riche en minéraux argileux, cette adsorption est faible. Rappelons que l'éthylène glycol présente des propriétés assez semblables au bitume et qu'une plus forte adsorption peut améliorer les liens bitume-granulats.

Microporosimétrie (absorption du mercure)

La figure 19 montre que plus la quantité de mercure absorbé est grande (plus la porosité est forte), meilleure sera la résistance à l'orniérage. Le facteur de corrélation est de 0,45.

Figure 18

Profondeur d'ornière versus adsorption de l'éthylène glycol

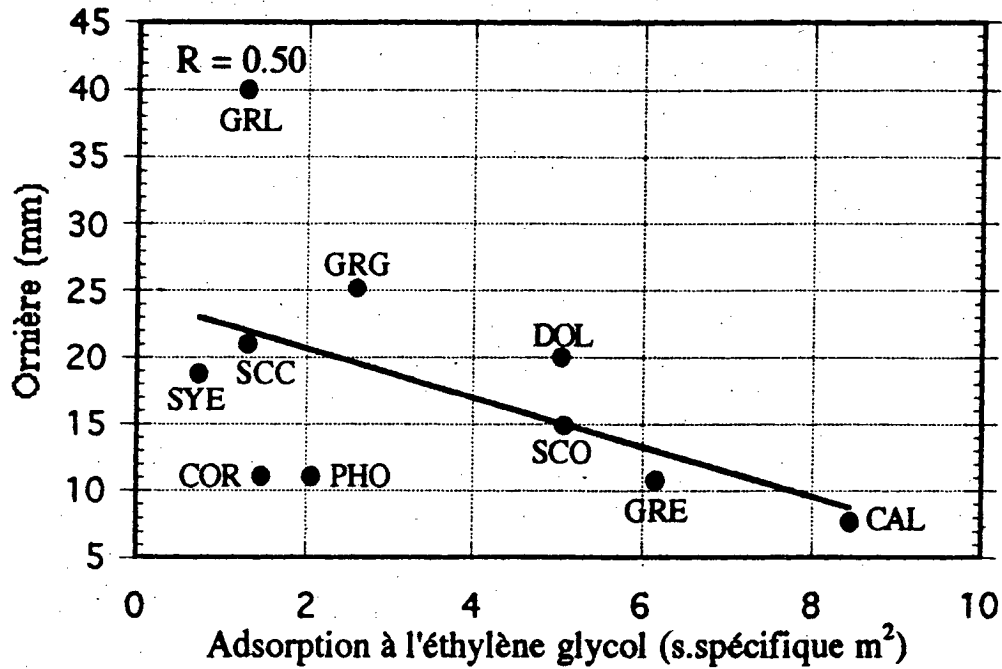
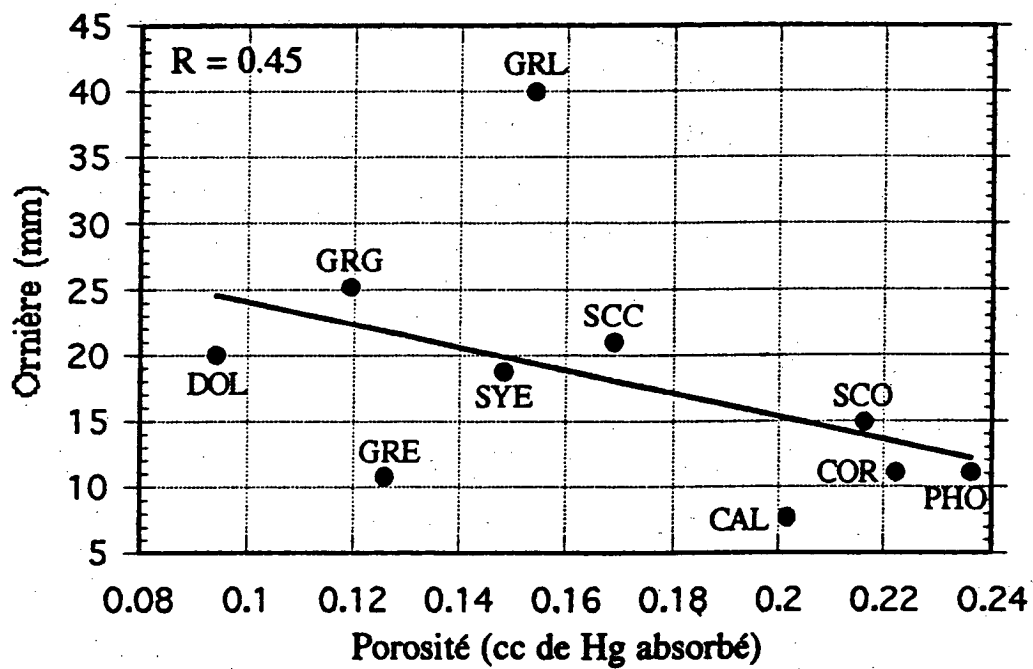


Figure 19

Profondeur d'ornière versus microporosité



Absorptivité (eau)

L'absorption de l'eau par le granulat ne montre toutefois aucune corrélation avec la résistance à l'orniérage (facteur de corrélation de 0.014), ce qui indique que cet aspect ne joue pas un rôle important en ce qui concerne la formation d'ornières (figure 20).

Comparaison des résultats d'absorptivité et de surface spécifique

Le tableau 8 comprend les coefficients de corrélation entre les facteurs d'absorptivité et de surface spécifique. On y remarque des facteurs variant entre 0,05 et 0,48, ce qui va de faible à moyen. Les meilleures corrélations sont entre l'absorptivité par rapport au mercure et à l'eau ($r = 0,42$), l'absorption du mercure et la valeur au bleu de méthylène ($r = 0,48$), et entre la surface spécifique à l'éthylène glycol et la surface spécifique au bleu ($r = 0,45$). Les autres relations sont plutôt faibles ($r = 0,05$; $0,09$; $0,14$).

On s'attendait que les valeurs au bleu de méthylène correspondent encore mieux à celles qui ont été obtenues dans le cas de l'éthylène glycol. En effet, ces deux essais mesurent en théorie les valeurs de surface spécifique interne et externe des granulats.

Figure 20

Profondeur d'ornière versus absorption de l'eau

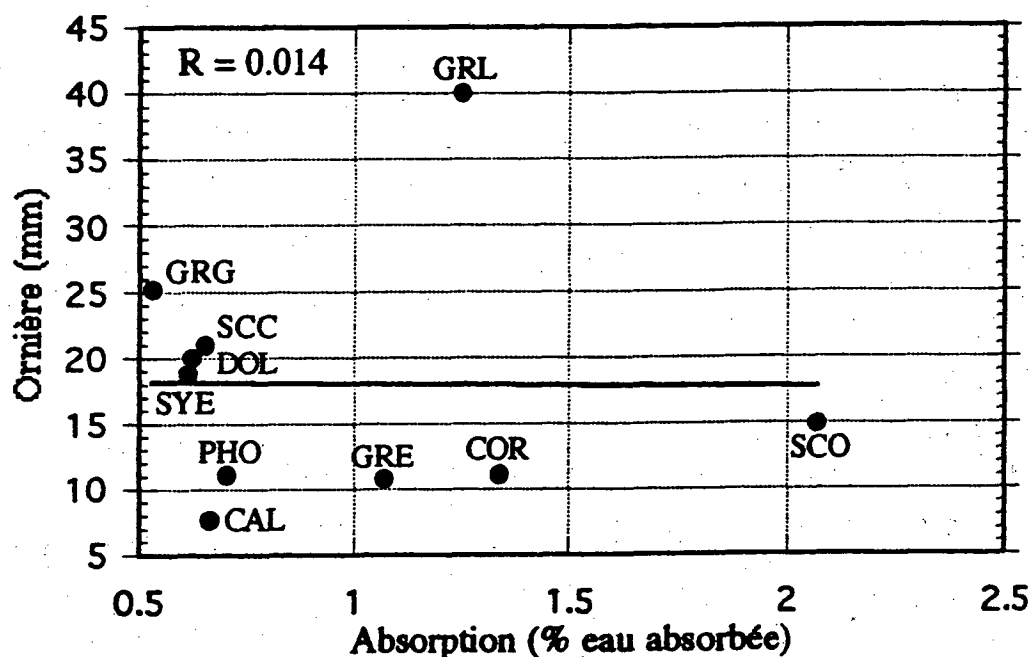


Tableau 8
Facteurs de corrélation entre les différents paramètres

							1+2	3	4	5		6	
F.C.	ORN.	CIRC.	RAT.	PÉR.	RUG.	C.E.	L.A.	MDH	ABS.	MPO	V.B.	GLY.	
ORN.	X	0,16	0,28	0,10	0,43	0,24	0,57	0,28	0,01	0,45	0,20	0,50	
CIRC.	0,16	X	0,63	0,94	0,79	0,80							
RAT.	0,28	X	X	0,46	0,88	0,54							
PÉR.	0,10	X	X	X	0,64	0,73							
RUG.	0,43	X	X	X	X	0,71							
C.E.	0,24	X	X	X	X	X							
L.A.	0,57						X	0,45					
MDH	0,28						X	X					
ABS.	0,01								X	0,42	0,14	0,09	
MPO.	0,45								X	X	0,48	0,05	
V.B.	0,20								X	X	X	0,45	
GLY.	0,50								X	X	X	X	
MGSO ₄	0,05												

NOTE : 1 (forme macroscopique) ; 2 (forme microscopique) ; 3 (fragmentation) ; 4 (attrition) ; 5 (absorptivité - porosité) ; 6 (surface spécifique).

Cependant, si on examine attentivement la figure 21, on voit que la majorité des points montrent une bonne relation, sauf ceux qui correspondent au gravier lithique de Saint-Victor-de-Beauce (GRL) et à la scorie d'acier de Contrecoeur (SCO). Le facteur de corrélation passe de 0,45 (figure 21) à 0,85 (figure 22) si on élimine ces deux points qui posent problème.

La scorie d'acier est très poreuse, mais elle ne contient pas beaucoup de minéraux argileux ; elle montre une faible valeur au bleu (faible surface spécifique) mais une grande surface spécifique à l'éthylène glycol. Le gravier lithique est, au contraire, peu poreux, mais on y trouve un fort pourcentage d'argile ; sa valeur au bleu est élevée, mais sa surface spécifique à l'éthylène glycol est assez faible.

Résumé de l'influence individuelle des paramètres considérés

En résumé, aucun des paramètres mesurés au microscope électronique à balayage couplé avec l'analyseur d'images (circularité, rugosité, rapport de forme et rapport des périmètres) ou en laboratoire (essais Los Angeles et Micro-Deval humide, coefficient d'écoulement, durabilité au sulfate de magnésium, absorptivité, surface spécifique) n'explique à lui seul le comportement des dix granulats au point de vue de l'orniérage.

Pour l'ensemble de ces paramètres, il est évident que l'on peut observer des tendances générales, mais toujours avec des facteurs de corrélation allant de très faibles à moyens ($r = 0,014$ à $0,57$). La liste des facteurs de corrélation entre les différents paramètres et les valeurs obtenues à l'orniéreur figure au tableau 8. On peut cependant penser que les relations entre ces paramètres pourraient être meilleures et plus claires avec un plus grand nombre de granulats. En effet, il serait intéressant d'évaluer plus de granulats et de voir si les relations s'en trouveront améliorées.

Combinaison de paramètres

Choix des paramètres

Comme on l'a vu dans les parties précédentes, aucun paramètre, parmi ceux qui ont été mesurés, n'explique à lui seul la résistance à l'orniérage, du moins pour les dix granulats qui ont servi dans la présente étude. La prochaine étape consiste donc à examiner différentes combinaisons de paramètres.

Il s'agit tout d'abord de sélectionner les paramètres qui peuvent expliquer l'orniérage, c'est-à-dire ceux qui montrent les facteurs de corrélation les plus élevés. Tous les paramètres sont regroupés selon les caractéristiques qu'ils mesurent, soit les facteurs de forme macroscopique (sphéricité, angularité), la texture superficielle (rugosité), les performances mécaniques (fragmentation et attrition), l'adsorptivité par rapport à différents produits (surface spécifique) et la porosité. Le tableau 8 montre justement cette séparation (numérotée de 1 à 6 dans le tableau).

La circularité, le rapport de forme et le rapport des périmètres caractérisent surtout la forme macroscopique des granulats (sphéricité/cubécité ou angularité, texture plus ou moins superficielle). La rugosité est un facteur de forme microscopique (texture superficielle : aspérités à la surface des grains). Pour sa part, le coefficient d'écoulement prend en considération la forme macroscopique et la texture superficielle. L'essai Los Angeles mesure la résistance au choc ou à la pression et l'essai Micro-Deval humide donne la résistance à l'attrition. Enfin, l'adsorption du bleu de méthylène et l'adsorption de l'éthylène glycol donnent la surface spécifique externe et interne des granulats, tandis que l'absorption de l'eau et du mercure fournit un aperçu de la porosité des granulats en question.

Pour bien représenter tous les aspects des granulats, un paramètre est choisi, soit celui qui montre la meilleure relation avec l'orniérage dans chaque famille de caractéristiques. Ainsi, pour la forme macroscopique, le rapport de forme donne la meilleure corrélation ($r = 0,28$). La rugosité, avec un facteur de corrélation de 0,43, s'avère le paramètre de forme le plus significatif. Les deux paramètres mesurant les performances mécaniques, soit les essais Los Angeles et Micro-Deval, sont donc retenus dans cette combinaison de paramètres puisqu'ils mesurent deux propriétés différentes (fragmentation et attrition). L'adsorption de l'éthylène glycol représente les paramètres d'adsorptivité (surface spécifique) avec une corrélation de 0,50. Ce paramètre est également choisi car le bitume et l'éthylène glycol montrent des comportements similaires à haute température. Enfin, la microporosimétrie (absorption du mercure) est retenue pour le facteur de porosité des granulats ($r = 0,45$).

Figure 21

Valeur au bleu versus adsorption de l'éthylène glycol

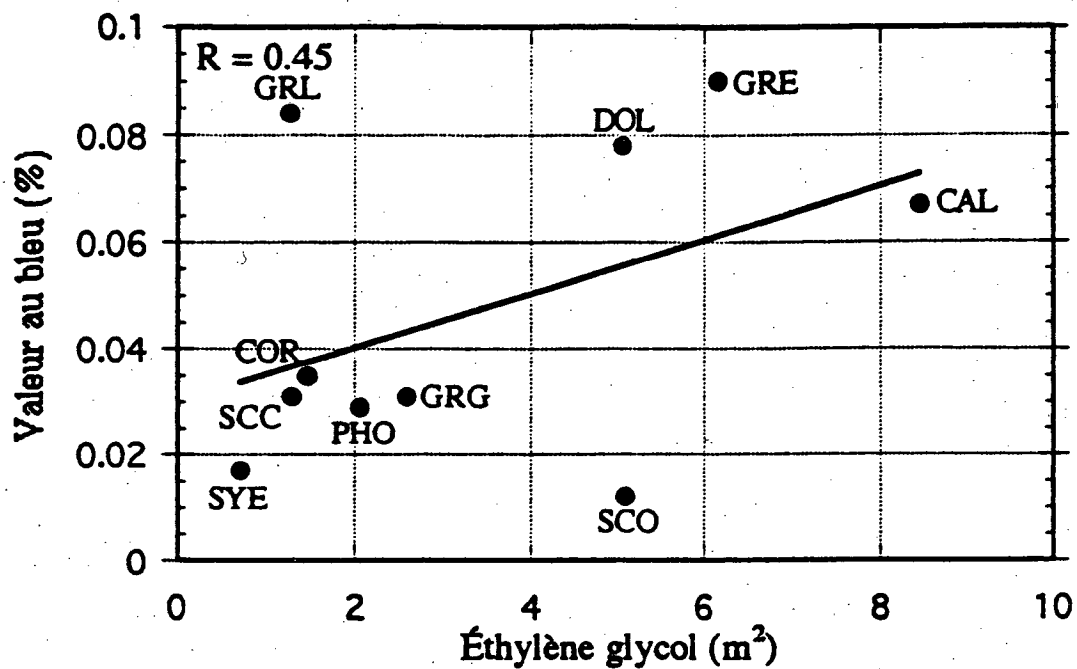
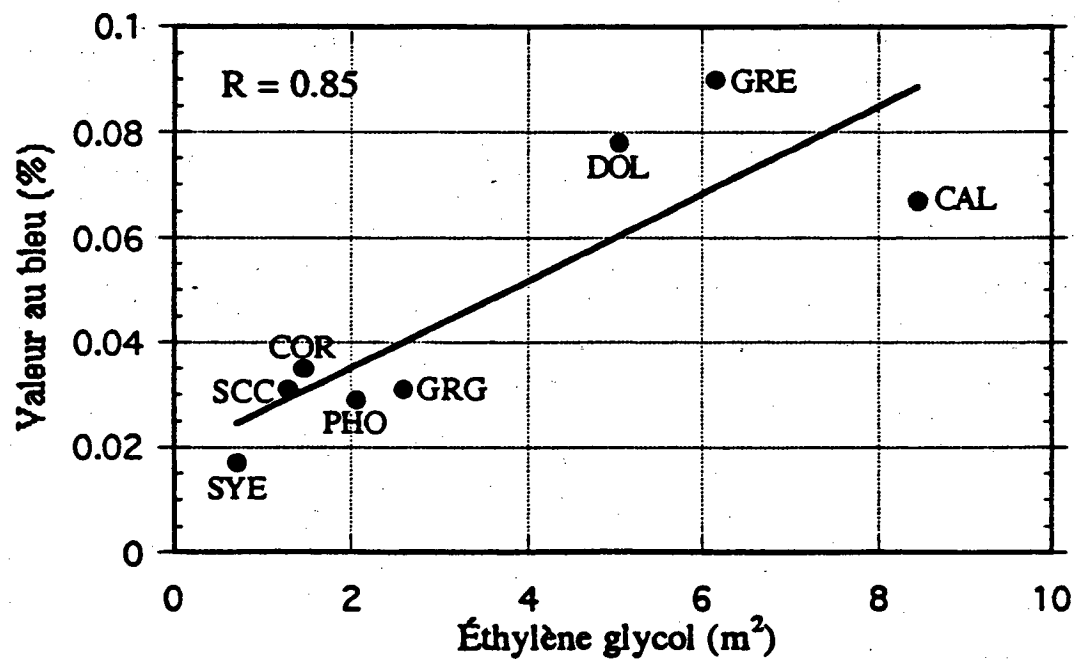


Figure 22

Valeur au bleu versus adsorption de l'éthylène glycol (sans GRL et SCO)



Relation analytique

En raison des faibles coefficients de corrélation obtenus et afin de forcer les paramètres à suivre les tendances observées lorsqu'ils sont pris individuellement, nous avons choisi une relation qui se traduit par une multiplication des paramètres retenus plutôt qu'une relation linéaire à multivariables.

La relation qui explique le mieux ($r = 0,89$) les résultats d'orniérage est de la forme suivante (figure 23) :

$$\text{Orniérage (mm)} = ae^{bx}$$

où $x = \frac{1}{\text{glycol}} * \frac{1}{\text{porosité}} * \text{essai Los Angeles} * \text{essai Micro-Deval} * \frac{1}{\text{rapport de forme}} * \frac{1}{\text{rugosité}}$

Quelques points se trouvent assez loin de la courbe de régression, comme la dolomie (DOL). Avec ce granulat, il est à noter que si le mélange bitumineux avait été fait avec un filler de même composition, la profondeur d'ornière aurait été plus faible et s'approcherait de la courbe (figure 24).

La figure 24 montre la même relation que la figure 23, sauf qu'elle présente les profondeurs d'ornière obtenues avec les mélanges dont le filler minéral est différent pour chaque plaque et de même composition que la fraction de sable. Le facteur de corrélation est identique, soit de 0,89.

Pour ce qui est de la syénite à néphéline, sa faible résistance à la formation d'ornière est difficilement explicable (figures 23 et 24). En effet, tous ses paramètres de forme, de rugosité et de performance mécanique sont excellents. Il n'y a que sa surface spécifique qui se révèle plutôt faible, mais la combinaison de paramètres la place quand même dans le groupe des bons granulats. L'effet du filler est ici négligeable puisque l'essai de deux fillers différents donnent des résultats d'orniérage similaires (19 et 21 mm). Cette faible résistance pourrait s'expliquer par d'autres facteurs tels qu'un degré de compactage et un dosage en bitume inadéquats, et l'hétérogénéité du mélange.

Figure 23

Profondeur d'ornière versus multiplication de paramètres (filler calcaire constant)

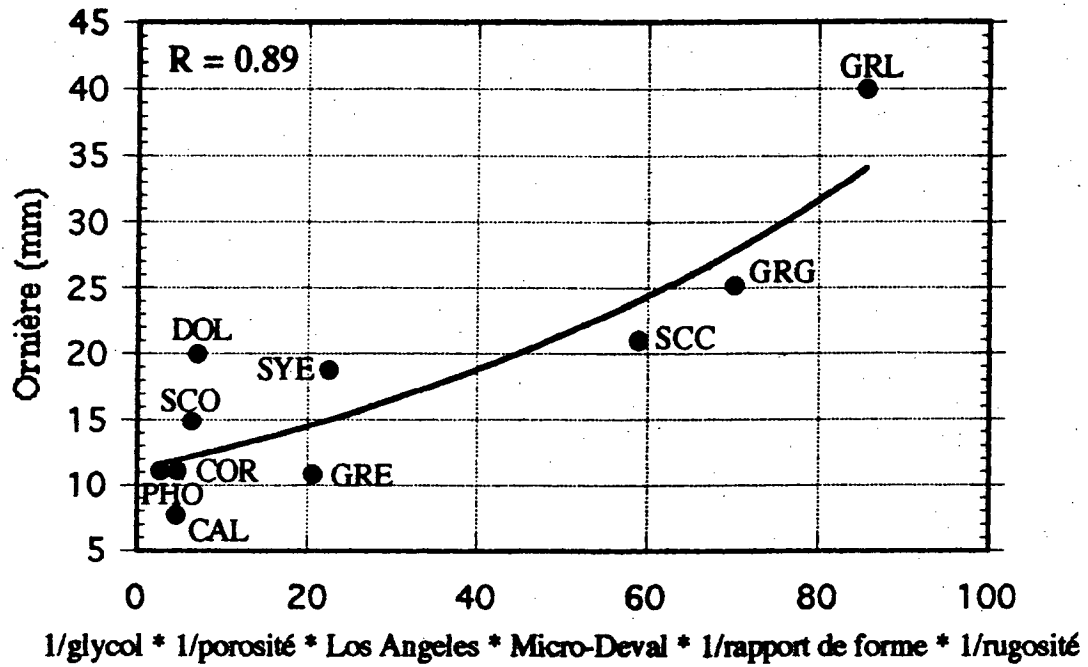
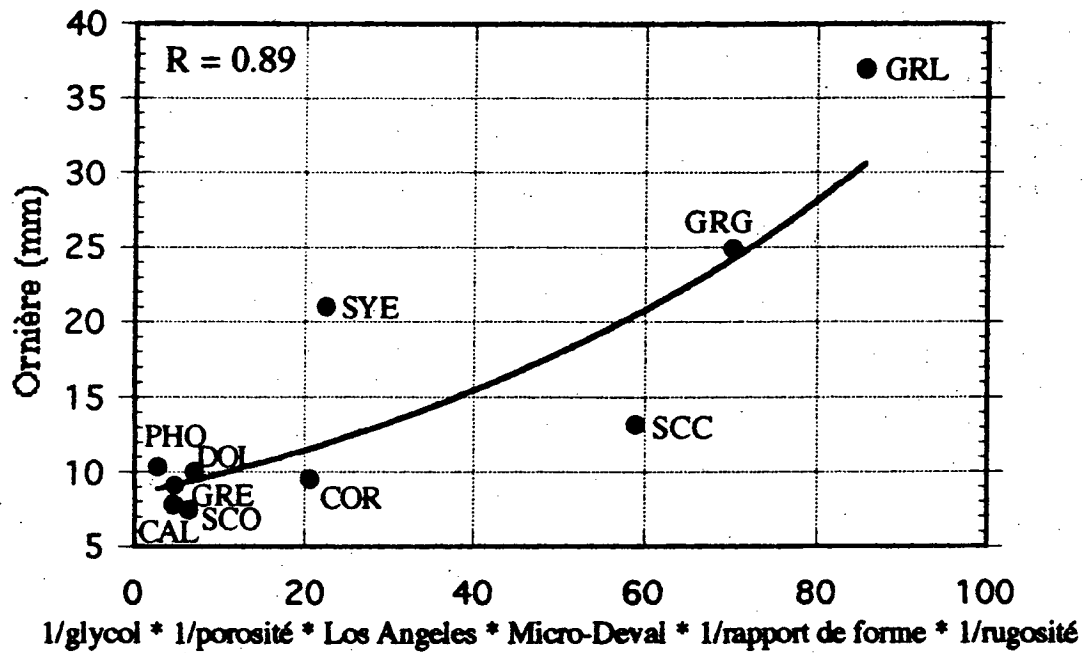


Figure 24

Profondeur d'ornière versus multiplication de paramètres
(filler de même composition que le sable)



Au point de vue du mélange, rappelons que les plaques de la série de base ont été fabriquées toujours avec le même granulat grossier, un granulat fin variable (sable) et un filler minéral de composition calcaire. Des différences de composition, d'angularité, de rugosité, de performance mécanique et d'absorptivité peuvent nuire à la résistance à l'orniérage puisque tous ces granulats ont pu se placer différemment dans le mélange. Le squelette minéral n'est donc pas le même qu'en présence de matériaux de même provenance. Cela peut expliquer en partie les résultats parfois différents en présence d'un autre filler.

Il est à noter que toutes les plaques étaient compactées à 95 %. Par contre, un mélange donné demande parfois moins ou plus de compaction pour améliorer sa performance. La situation est la même en ce qui a trait au pourcentage de bitume. Toutes les plaques avaient 5 % de bitume ; cependant, certains granulats peuvent demander plus ou moins de liant pour donner un bon rendement selon leur niveau d'absorption. Le même effet est également applicable au pourcentage de filler. Un pourcentage plus ou moins élevé que 4 % pourrait faire varier les profondeurs d'ornière obtenues.

En résumé, on peut dire qu'une combinaison de paramètres explique nettement mieux la résistance à l'orniérage qu'un seul paramètre pris individuellement, du moins pour les dix granulats à l'étude.

Comparaison des résultats obtenus au MEB et avec le coefficient d'écoulement

Un autre but de l'étude consistait à comparer les résultats que l'on obtient avec le microscope électronique à balayage concernant les facteurs de forme macroscopique et microscopique tels que la rugosité, la circularité, le rapport de forme et le rapport des périmètres, et ceux qui sont obtenus en laboratoire avec le coefficient d'écoulement.

Le tableau 8 montre les facteurs de corrélation entre les paramètres évalués au MEB et le coefficient d'écoulement. On remarque des facteurs de corrélation de 0,80, 0,54, 0,73 et 0,71 entre la circularité, le rapport de forme, le rapport des périmètres et la rugosité, d'une part, et le coefficient d'écoulement, d'autre part. Ces facteurs de corrélation sont assez bons. Les relations observées apparaissent aux figures 25 à 28.

Il faut dire que ces facteurs de corrélation ne tiennent pas compte (dans seulement deux cas) d'un granulat qui posait un problème pour l'utilisation du MEB. En effet, la scorie d'acier étant très

poreuse, il était très difficile de faire trois érosions (voir les manipulations pour l'analyse d'images). Au lieu d'éroder les particules, et surtout de séparer celles qui se touchaient, l'érosion provoquait plutôt la création d'une infinité de petites particules qui faussaient les résultats et changeaient les formes des particules originales, ce qui modifiait surtout les valeurs de circularité et du rapport des périmètres. Ainsi, les résultats de ces deux paramètres pour la scorie d'acier ont été ignorés pour le calcul des facteurs de corrélation entre la circularité, le rapport des périmètres et le coefficient d'écoulement puisque ces points étaient complètement en dehors de la tendance générale (figures 25 et 28).

On peut donc dire que les résultats obtenus au MEB confirment assez bien ceux de l'écoulement des granulats et que le coefficient d'écoulement rend compte des facteurs de forme macroscopique (angularité et allongement) et microscopique (rugosité des grains). Puisqu'il est impossible de faire une étude de forme et de rugosité au microscope électronique à balayage (ce qui est compréhensible étant donné que l'appareil est assez complexe et les manipulations longues), on peut donc se fier aux résultats que l'on obtient avec le coefficient d'écoulement qui, lui, comme essai, est beaucoup moins long et laborieux.

Les figures 29 et 30 confirment également notre hypothèse puisque les paramètres «rapport de forme» et «rugosité» ont été remplacés par le coefficient d'écoulement dans la relation précédente, ce dernier étant bien sûr modifié par la forme et la rugosité des granulats. La nouvelle relation devient en fait :

$$\text{Orniérage (mm)} = ae^{bx}$$

où $x = 1/\text{glycol} * 1/\text{porosité} * \text{essai Los Angeles} * \text{essai Micro-Deval} * 1/\text{coefficient d'écoulement}$

On obtient des facteurs de corrélation de 0,88 (filler calcaire) et de 0,86 (filler de même composition que le sable) pour un même type de relation (exponentielle), ce qui est légèrement plus faible que le facteur obtenu avec la combinaison incluant le rapport de forme et la rugosité (figures 23 et 24).

Figure 25

Coefficient d'écoulement versus circularité

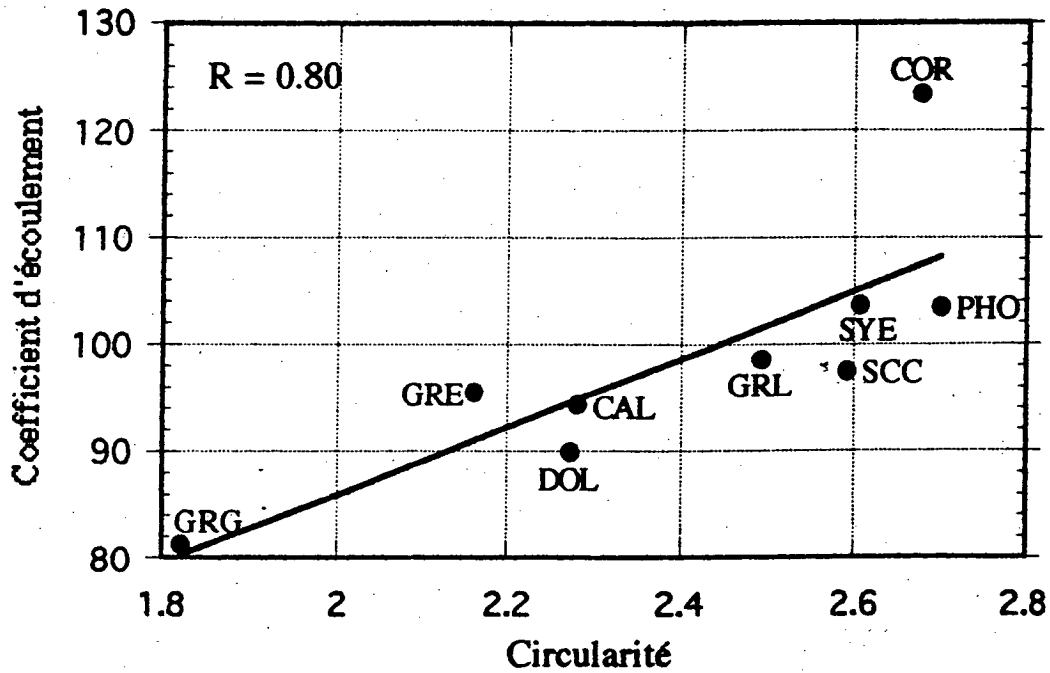


Figure 26

Coefficient d'écoulement versus rapport de forme

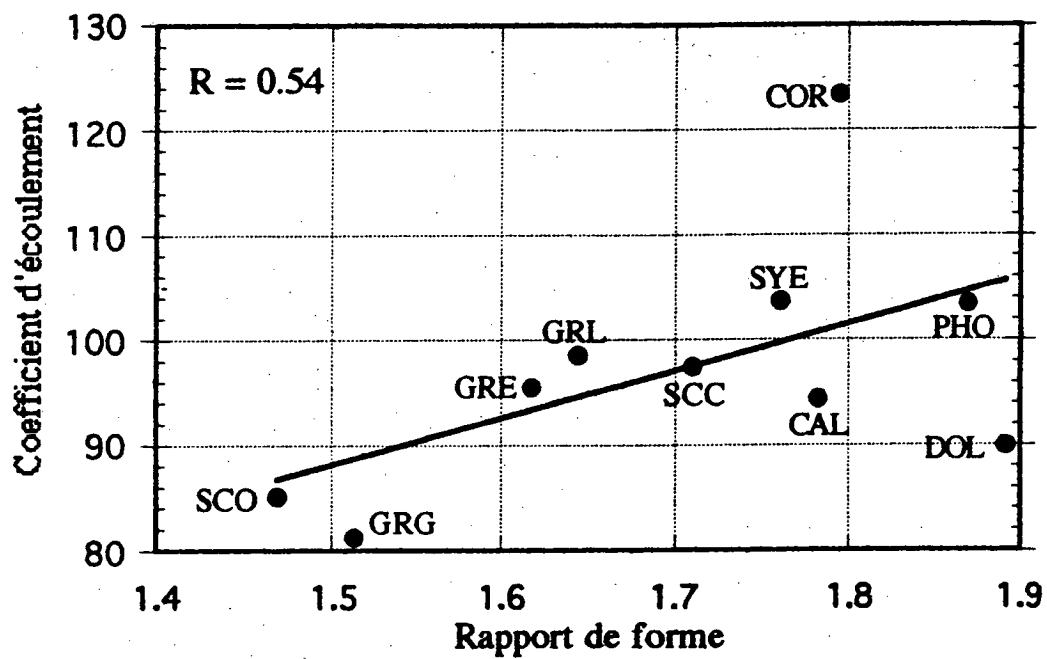


Figure 27

Coefficient d'écoulement versus rugosité

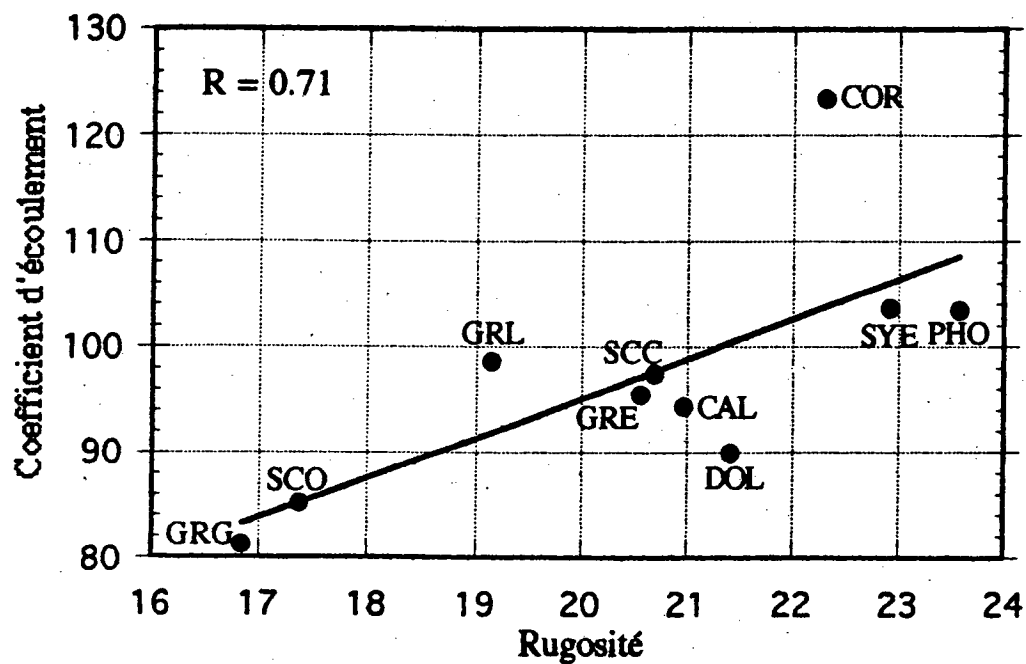


Figure 28

Coefficient d'écoulement versus rapport des périmètres

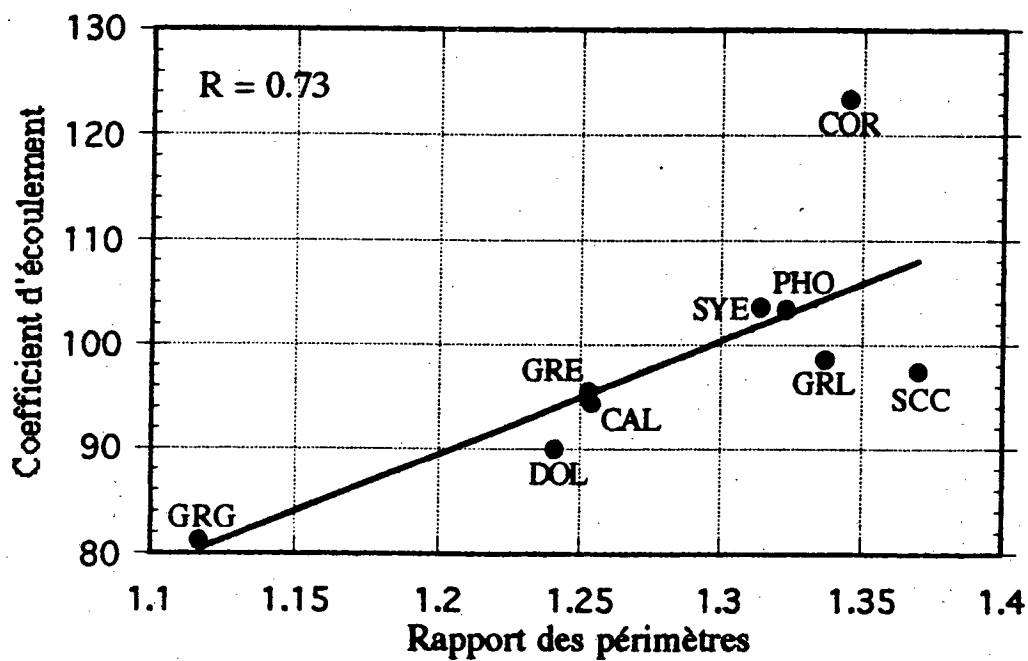


Figure 29

Profondeur d'ornière versus multiplication de paramètres (filler calcaire constant)

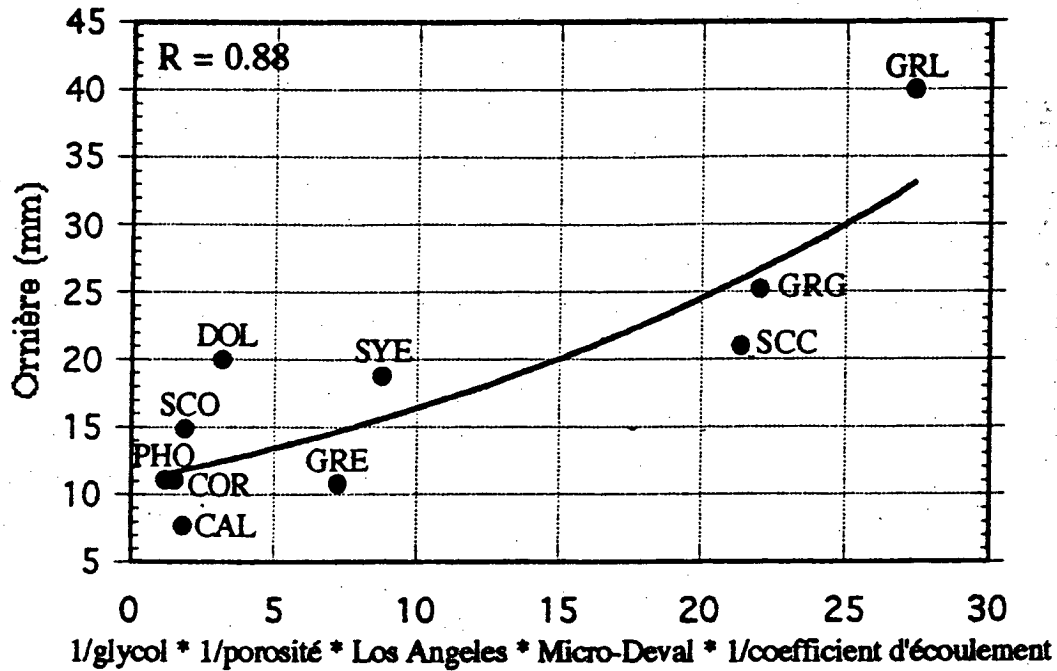
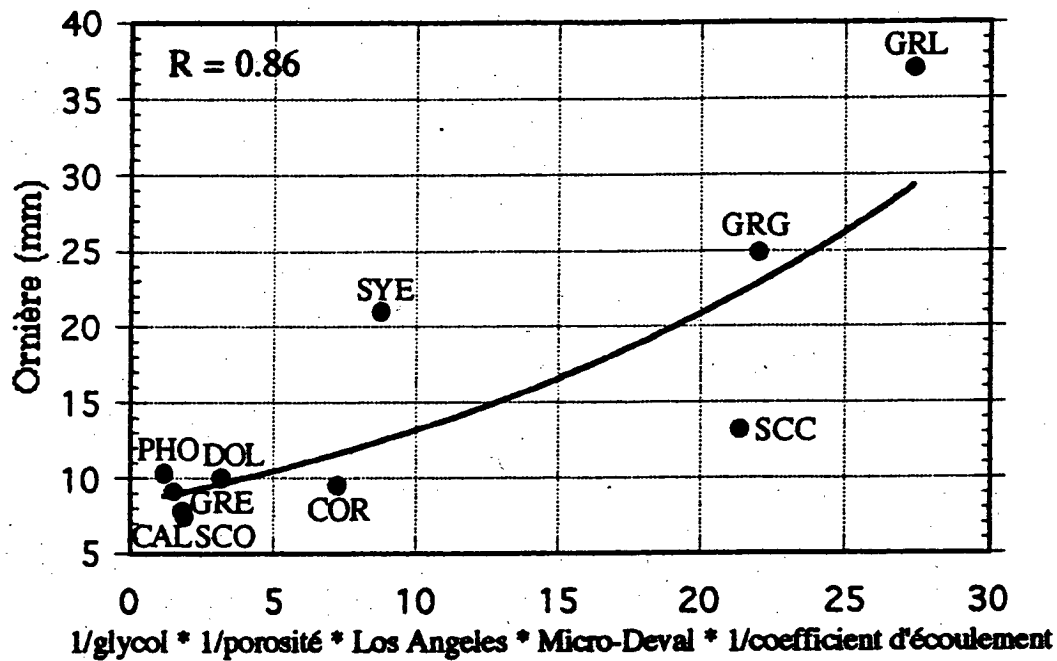


Figure 30

Profondeur d'ornière versus multiplication de paramètres
(filler de même composition que le sable)



Effets des fillers

Une étude sommaire des effets des fillers a été possible puisque deux séries de plaques ont été préparées. La première série comportait des fillers différents pour chaque plaque, mais toujours de même composition minéralogique que la fraction de sable du mélange (80 μm -2,5 mm). La deuxième série comportait le même granulats grossier et les mêmes fractions de sable que pour la première série, sauf que le filler minéral était constant pour toutes les plaques (filler calcaire de Charlesbourg).

La description des caractéristiques (densité, indice de plasticité, granulométrie etc.) des fillers est résumée au tableau 9. La figure 31 montre les résultats des deux séries de plaques au point de vue de leur résistance à l'orniérage. Les profondeurs d'ornière ont été mesurées ou extrapolées à 30 000 cycles.

On remarque que tous les granulats fins sélectionnés pour l'étude montrent des profondeurs d'ornière égales ou supérieures en présence d'un filler de même composition (calcaire), en fait égales dans sept cas sur dix et supérieures pour la scorie d'acier, la dolomie et le schiste à chlorite. Il est très difficile de déceler le paramètre du filler qui peut avoir fait changer le comportement de ces trois derniers mélanges à l'orniérage. Une étude plus approfondie sera nécessaire afin d'éclaircir ce point.

Dans le cadre de notre étude, les différences de comportement s'expliquent par des incompatibilités entre certains sables et certains fillers. En effet, des différences dans l'angularité, la rugosité, les résistances mécaniques, les compositions chimiques et l'absorptivité de la fraction de sable des granulats et du filler peuvent modifier le comportement des mélanges.

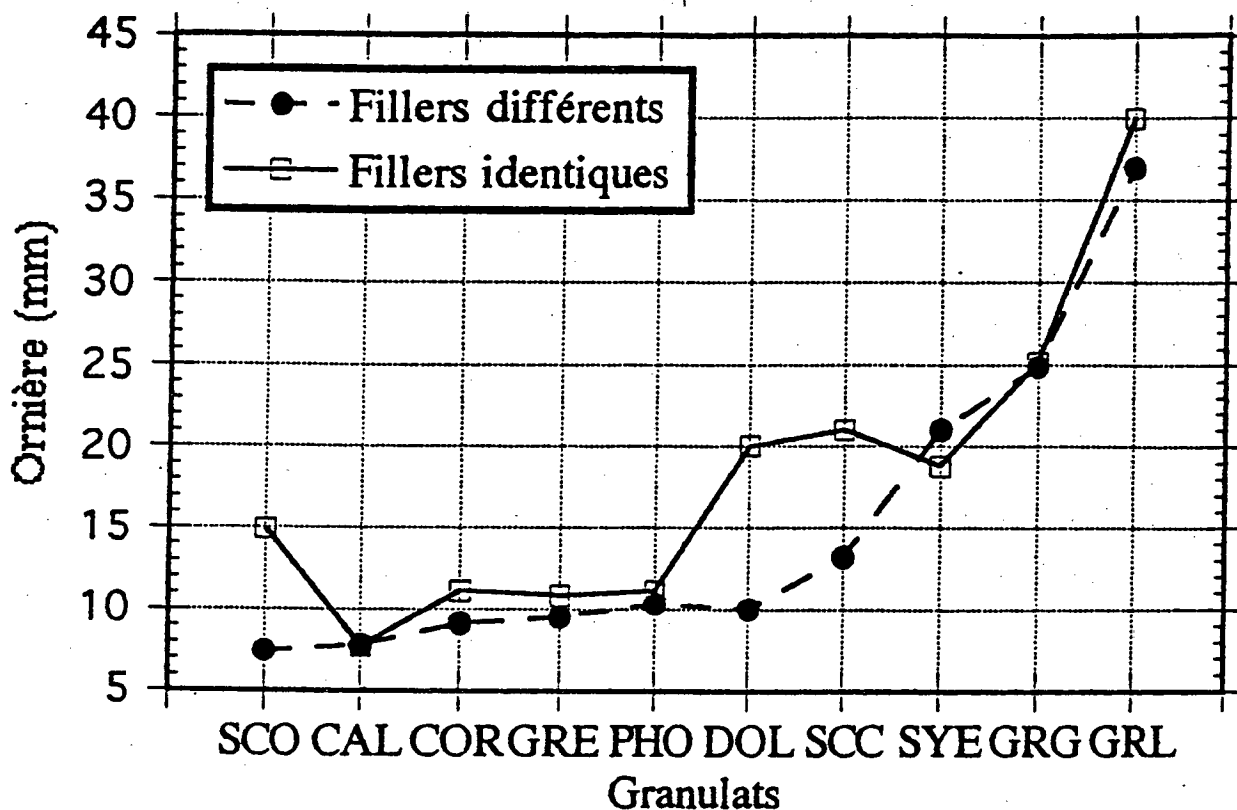
Il est possible de formuler quelques hypothèses en ce qui a trait aux cas de la scorie d'acier, de la dolomie et du schiste à chlorite. Pour le premier granulats, on peut penser que son filler ayant un indice de plasticité plus faible que celui du filler calcaire, sa résistance à l'orniérage s'en trouve améliorée. Mentionnons également que la dureté et la ténacité du filler de la scorie sont plus grandes que pour le filler calcaire, ce qui pourrait expliquer une meilleure performance.

SOURCE	INDICE DE PLASTICITÉ	LIMITE DE LIQUIDITÉ	DENSITÉ	VALEUR AU BLEU	PASSANT			
					80 µm (%)	5-80 µm(%)	2-5 µm (%)	1-2 µm (%)
Lac-Saint-Charles	11,7	31,2	2,77	0,27	100	92,7	3,1	4,2
Charlesbourg	7,8	25,4	2,70	0,66	100	90,4	4,2	5,4
Saint-Jean-Chrysostome	8,6	26,7	2,80	0,88	100	79,0	6,6	14,4
Saint-Victor-de-Beauce	15,8	37,2	2,76	0,34	100	82,1	8,0	9,9
Contrecoeur	NP	-	3,20	0,0	100	100	0,0	0,0
Varennnes	NP	-	2,61	0,11	100	88,6	6,0	5,4
Mont-Saint-Hilaire	11,2	30,4	2,79	0,09	100	86,8	6,6	6,6
Parc de conservation du Mont-Saint-Bruno	9,0	27,3	2,91	0,27	100	80,0	10,8	9,2
Sherbrooke	15,7	37,0	2,87	0,16	100	84,9	9,6	5,5
Coteau-du-Lac	5,6	22,3	2,84	0,24	100	80,3	8,9	10,8

Tableau 9
Caractéristiques des fillers minéraux

Figure 31

Comparaison de la résistance à l'orniérage
en fonction du type de filler utilisé dans les mélanges (30 000 cycles)



Dans le cas des fillers de dolomie et de schiste, il est plus difficile de fournir des explications aux différences de comportement. En effet, leur indice de plasticité est égal (DOL) à celui du filler calcaire ou plus élevé (SCC) que celui-ci. La figure 32 montre les différences de profondeurs d'ornière en fonction de l'indice de plasticité entre les mélanges exécutés avec des fillers de même composition que la fraction de sable (FD) et ceux qui ont été faits avec un filler calcaire (FC). La figure 33 indique qu'il y a une bonne relation ($r = 0,7$) entre l'orniérage et les indices de plasticité des fillers (FD). Cette figure pourrait laisser suggérer faussement que le filler explique surtout l'orniérage, mais il n'en est rien puisque le fait de prendre toujours un même filler calcaire est loin de donner des résistances à l'orniérage identiques. On peut d'ailleurs voir que l'écart d'orniérage des mélanges faits avec un filler calcaire ($\Delta = 32,3$) est même plus grand que celui des mélanges faits avec différents fillers ($\Delta = 29,5$), ce qui indique que la fraction de sable influe grandement sur le comportement du béton bitumineux à l'orniéreur. L'indice de plasticité peut donc avoir une influence sur l'orniérage sans toutefois expliquer complètement celui-ci.

Figure 32

Comparaison des profondeurs d'ornière versus l'indice de plasticité pour des fillers de même composition que le sable (FD) et pour un filler calcaire constant (FC)

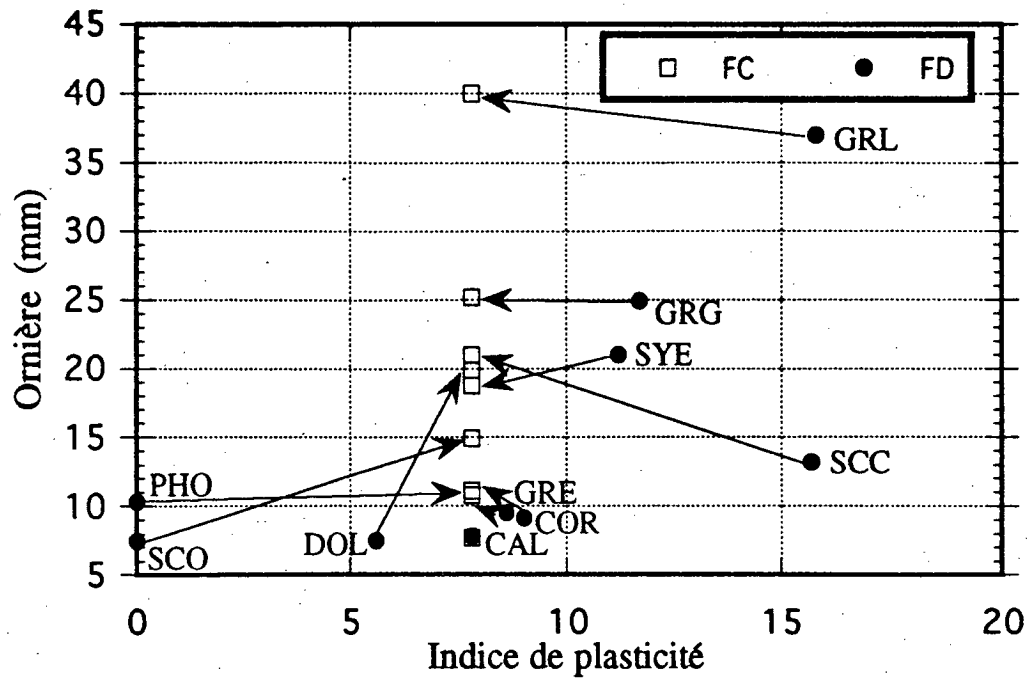
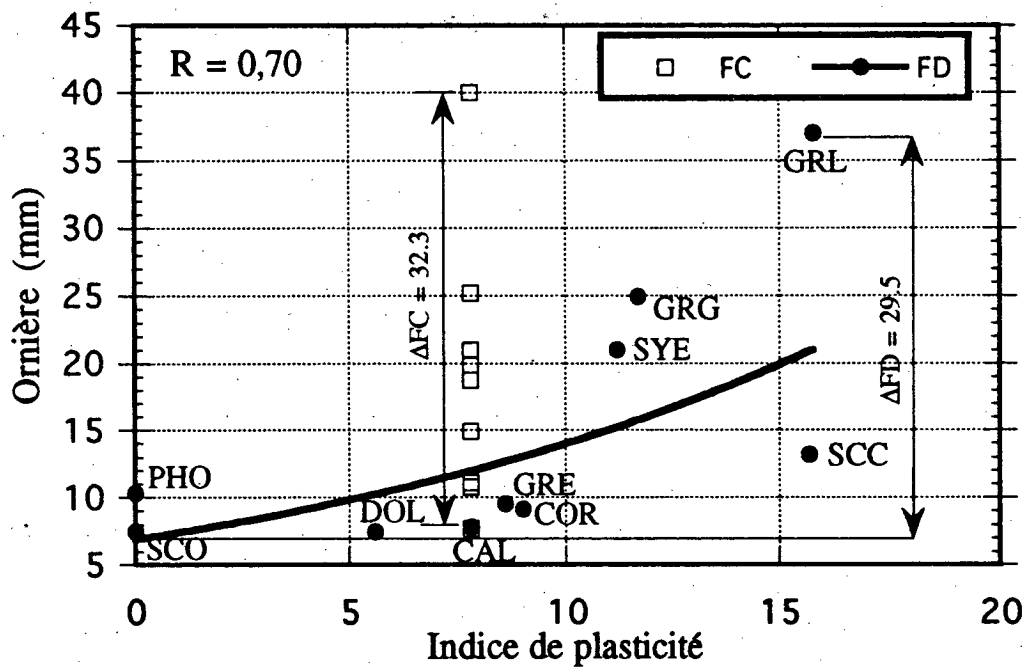


Figure 33

Relation entre les profondeurs d'ornière et l'indice de plasticité pour des fillers de même composition que le sable (FD)



Pour ces trois fillers (DOL, SCO et SCC), il est à noter que la valeur au bleu est toujours plus basse que celle du filler calcaire. La valeur au bleu pourrait donc jouer un certain rôle, mais des études plus poussées seraient utiles et nécessaires sur ce plan. Encore ici, il se pourrait que des différences dans les caractéristiques morphologiques de la fraction de sable et des fillers, telles que l'angularité, la rugosité, etc., conduisent à ces écarts de performance.

Revue des granulats

On a vu qu'une combinaison de caractéristiques de la fraction de sable (80 μm -2,5 mm) des granulats expliquait mieux la résistance à l'orniérage qu'une seule caractéristique prise individuellement. Cependant, pour chacun de ces granulats, une caractéristique peut avoir plus d'influence qu'une autre sur ce plan. Ainsi, une revue des dix granulats permettra de constater les paramètres les plus influents pour chacun d'entre eux, c'est-à-dire les paramètres qui peuvent le mieux expliquer un bon ou un mauvais comportement à l'orniérage.

Gravier granitique de Lac-Saint-Charles (GRG)

L'absence de concassage, le fort degré d'arrondissement et la faible rugosité des particules expliqueraient la mauvaise performance de ce granulat à l'orniérage. En effet, des particules arrondies et peu rugueuses affaiblissent les liaisons entre le liant et les granulats, ce qui mène à la formation d'ornières. On note aussi des performances mécaniques faibles en ce qui concerne la fragmentation, ce qui peut entraîner un mauvais comportement (en raison des particules qui se fracturent sous le choc et de la pression exercée par le passage des véhicules).

Gravier lithique de Saint-Victor-de-Beauce (GRL)

Ce granulat provient de la région des Appalaches et montre des performances mécaniques faibles : de fortes pertes aux essais Los Angeles et Micro-Deval. La rugosité, l'angularité et la surface spécifique des particules sont également faibles, d'où un mauvais comportement à l'orniérage (le pire des dix granulats). Peut-être que ce granulat serait meilleur si le degré de concassage des particules était plus important, car elles ne sont pas très anguleuses.

Syénite à néphéline de Mont-Saint-Hilaire (SYE)

Malgré d'excellentes caractéristiques d'angularité, de rugosité et une bonne performance mécanique, ce granulat montre une faible résistance à l'orniérage. Seule une faible surface spécifique ($0,730 \text{ m}^2/\text{g}$) pourrait expliquer un tel comportement. De plus, d'après l'ensemble des paramètres retenus, ce granulat se place dans le groupe des bons granulats (figure 21), ce qui veut peut-être dire que le tout dépend d'un facteur externe. Quoi qu'il en soit, le filler ne semble pas en cause puisque, pour les deux fillers utilisés, les profondeurs d'ornière sont aussi grandes. Une étude plus poussée serait utile afin de déterminer avec précision ce qui diminue la résistance à l'orniérage de ce granulat.

Phonolite de Varennes (PHO)

Toutes les caractéristiques de cet échantillon sont excellentes. Ce granulat possède de très bonnes valeurs d'angularité, de rugosité et des performances mécaniques intéressantes, ainsi qu'une surface spécifique moyenne. Il montre d'ailleurs un très bon comportement à l'essai à l'orniéreur pour les deux fillers utilisés.

Grès de Saint-Jean-Chrysostome (GRE)

Malgré le fait que les caractéristiques de ce granulat soient moyennes, celui-ci montre une performance intéressante à l'orniéreur, du moins pour le type de mélange utilisé, ce qui nous amène à penser qu'il s'agit vraiment d'une combinaison de paramètres qui explique son bon comportement. On remarque qu'il présente une grande surface spécifique, ce qui semble améliorer la qualité des liens entre le liant et les grains, car il y a plus de surface de contact entre les deux constituants (bitume et granulat).

Schiste à quartz-chlorite-épidote de Sherbrooke (SCC)

De mauvaises caractéristiques mécaniques et une faible surface spécifique semblent être responsables de la piètre performance de ce granulat. De plus, on remarque dans ce cas la présence d'une structure directionnelle (schistosité) qui crée des plans de faiblesse dans les particules, causant ainsi une baisse de résistance du mélange. Malgré le fait que ce granulat possède tout de même une angularité et une rugosité acceptables, ce n'est pas suffisant pour lui assurer un comportement adéquat par

rapport à l'orniérage. Par ailleurs, l'utilisation d'un filler calcaire n'améliore pas son comportement à l'orniérage, même si ce dernier montre un indice de plasticité nettement inférieur à celui du schiste à chlorite.

Dolomie de Coteau-du-Lac (DOL)

Ce granulats montre des comportements différents à l'orniérage lorsqu'on change le filler. En effet, un filler de même composition que la fraction de sable assure un bon comportement, tandis que le filler calcaire abaisse la résistance à l'orniérage. De toute manière, toutes les caractéristiques de ce granulats sont excellentes et la combinaison de paramètres le place dans le groupe des bons granulats. Sa faible performance au cours de la deuxième série d'essais s'expliquerait donc par la présence d'un filler calcaire qui serait incompatible.

Cornéenne du Parc de conservation du Mont-Saint-Bruno (COR)

Il s'agit d'un excellent granulats en ce qui a trait à la résistance à l'orniérage. Ses performances mécaniques exceptionnelles, une bonne angularité et une bonne rugosité des grains compensent largement pour sa valeur de surface spécifique plutôt faible. Il performe également bien avec les deux fillers utilisés.

Calcaire de Charlesbourg (CAL)

Les calcaires donnent habituellement de plus fortes valeurs d'ornière que celles qui ont été obtenues dans la présente étude. Il faut croire qu'il est bénéfique d'utiliser un granulats grossier autre qu'un calcaire pour obtenir de bons résultats. Pour le type de mélange utilisé, ce granulats s'en tire très bien même si ses performances mécaniques, son angularité et sa rugosité sont moyennes. Par ailleurs, sa grande surface spécifique peut améliorer les liaisons entre les grains et le bitume, et fortifier le mélange.

Scorie d'acier de Contrecoeur (SCO)

La scorie d'acier montre également des comportements différents selon le type de filler utilisé. Un filler de même composition que la fraction de sable (scorie d'acier) donne d'excellents résultats

à l'orniéreur (sous la barre des 10 mm), tandis qu'un filler calcaire abaisse de façon significative la résistance à l'orniérage. Malgré le fait que son angularité et sa rugosité soient très faibles, ce granulat possède de bonnes performances mécaniques et une grande surface spécifique. C'est un granulat extrêmement poreux qui absorbe beaucoup de bitume, ce qui semble fortifier les liens entre le bitume et les particules. La combinaison des paramètres retenus le place dans le groupe des bons granulats.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Conclusions

Les conclusions tirées de nos travaux s'appliquent uniquement aux granulats analysés. La généralisation des résultats obtenus à l'ensemble des granulats et des mélanges ne saurait se faire sans procéder avec circonspection.

- ▶ Pour les dix granulats testés, on note certaines tendances quant à la résistance à l'orniérage. Les profondeurs d'ornière tendent à diminuer : plus les particules sont allongées ou aplaties ($r = 0,28$), plus la rugosité est forte ($r = 0,43$), meilleures sont les performances mécaniques à la fragmentation ($r = 0,57$) et à l'usure ($0,28$), et plus l'absorption du bitume par le granulat est forte (grande surface spécifique à l'éthylène glycol) ($r = 0,50$). Cependant, les facteurs de corrélation vont de faibles à moyens ($r = 0,28-0,57$) et on ne peut expliquer la résistance à l'orniérage que par un seul paramètre.
- ▶ En effet, l'orniérage semble contrôlé par une combinaison de paramètres (multiplication de facteurs) comprenant : un critère de forme (rapport de forme ou coefficient d'écoulement), un paramètre de texture superficielle (rugosité ou coefficient d'écoulement), deux paramètres de performance mécanique (essais Los Angeles et Micro-Deval humide), un paramètre d'absorptivité (microporosimétrie : absorption du mercure) et un paramètre de surface spécifique (adsorption de l'éthylène glycol). La multiplication de ces facteurs sous la forme d'une relation exponentielle présente un facteur de corrélation de 0,89 avec l'orniérage.
- ▶ Il existe de bonnes relations entre les paramètres de rugosité et de forme mesurés au microscope électronique à balayage couplé à l'analyseur d'images et ceux qui sont obtenus en laboratoire avec l'essai portant sur le coefficient d'écoulement ($r = 0,54-0,80$). Ce dernier peut donc se substituer assez bien aux deux paramètres de forme et de rugosité. La validité de cet essai est également vérifiée.
- ▶ La nature du filler peut faire varier le taux d'orniérage. En général, il semble préférable d'utiliser un filler de même composition que la fraction de sable pour obtenir des comportements égaux ou supérieurs à ceux des mélanges faits avec un filler calcaire. Pour l'instant, on peut expliquer

ce fait par des incompatibilités entre certains sables et fillers (différences de forme, de rugosité, de plasticité, de granulométrie, etc.).

- L'utilisation d'un filler ayant un indice de plasticité de plus faible valeur semble généralement bénéfique, mais cette observation est loin d'expliquer complètement la résistance à l'orniérage puisque l'écart d'orniérage pour les mélanges faits avec un filler calcaire ($\Delta = 32,3$) est plus grand que pour ceux qui l'ont été avec un filler de même composition que le sable ($\Delta = 29,5$), ce qui suggère que la fraction de sable a une très forte influence.

D'autres causes peuvent influencer sur la résistance à l'orniérage des mélanges bitumineux. Parmi elles, on trouve la quantité de bitume utilisé et sa qualité. Ces paramètres ne variaient pas au cours de notre étude, c'est-à-dire que, pour toutes les plaques, on trouvait 5 % de bitume 80-100. Cependant, certains granulats nécessitent de plus grandes ou de plus petites quantités de bitume pour bien performer, ce qui a pu entraîner une baisse de résistance des mélanges. Le même cas peut s'appliquer au compactage puisque toutes les plaques étaient compactées à 95 %, ce qui n'était peut-être pas l'idéal pour certains mélanges. Une variation du degré de compaction pourrait être bénéfique quant à la formation d'ornières et l'utilisation de la presse à cisaillement giratoire aiderait sans doute à trouver la compaction idéale pour chaque mélange fait avec différents granulats.

Enfin, le fait d'utiliser trois sources de granulats différentes pour la construction des plaques a pu modifier les performances à l'orniéreur. Les résultats ne seraient peut-être pas les mêmes si les mélanges avaient été faits avec des matériaux de même provenance. Les particules pourraient se placer différemment les unes par rapport aux autres et le squelette minéral du mélange pourrait être autre, d'où des différences dans les résistances à l'orniérage.

Il reste qu'il est très difficile de trouver la cause exacte de l'orniérage, étant donné qu'il existe une infinité de causes possibles. Par contre, on s'aperçoit que la fraction de sable d'un granulat peut modifier de façon très importante la résistance d'un mélange de béton bitumineux. Il ne faut donc pas en négliger le contrôle de la qualité.

L'orniéreur s'avère également un outil idéal afin de déterminer le comportement d'un enrobé, puisqu'aucun cas ayant donné de bons résultats à cet essai et ayant mal performé une fois posé sur la route n'a été rapporté. Avec cet appareil, on peut connaître la résistance à l'orniérage dans

un intervalle de temps assez court. Il est donc possible de tester chaque mélange bitumineux et de le modifier au besoin afin de le rendre plus résistant.

Recommandations

Afin de tester l'influence individuelle de chaque paramètre des granulats sur la résistance à l'orniérage, il serait utile de refaire une étude semblable à celle-ci, mais avec des granulats moins différents sur le plan minéralogique, puisqu'il est difficile de connaître exactement le degré d'influence de chaque paramètre. En effet, pour la présente étude, les granulats étant différents du point de vue minéralogique et mécanique, un paramètre a pu influencer davantage sur la résistance à l'orniérage d'un type de granulat, tandis que, dans le cas d'un autre granulat, ce paramètre aura montré très peu d'influence. Par exemple, le gravier granitique et la scorie d'acier présentent une angularité et une rugosité fort rapprochées, mais leur comportement à l'orniéreur est tout à fait différent. Les performances mécaniques de la scorie dominent sur sa forme, alors que pour le gravier granitique, c'est l'angularité qui semble régir le plus son comportement à l'orniérage.

Ainsi, pour connaître seulement l'influence de l'angularité des granulats, il serait préférable d'utiliser un même gravier granitique, mais possédant des niveaux de concassage différents. Donc, seuls les paramètres de forme des granulats changeraient, tout en gardant les autres constants. Un essai à l'orniéreur serait effectué pour chaque niveau de concassage et l'on pourrait alors voir l'influence pure de ce paramètre sur la formation d'ornières, pour un type de granulat donné, sans pour autant que ces résultats ne subissent l'influence de la composition minéralogique ou de tous les autres paramètres. La relation entre la forme des granulats et leur résistance aux ornières devrait alors être beaucoup plus claire que pour des essais effectués sur des granulats totalement différents.

La situation serait similaire si on voulait connaître seulement l'influence de la performance mécanique des granulats. Il s'agirait alors de tester, par exemple, des granulats de composition granitique semblable mais possédant des performances mécaniques différentes. Des essais à l'orniéreur indiqueraient l'influence individuelle des propriétés mécaniques sur l'orniérage pour ce type de granulat, les autres paramètres étant constants.

Une autre recommandation se rapporte aux fillers. Il serait utile, afin de mieux connaître l'effet de ceux-ci, de mener des travaux supplémentaires en fonction de leur nature et de leurs caractéristiques.

Ces travaux se traduiraient par la conception de mélanges identiques mais avec des fillers autres qu'un filler calcaire.

Enfin, ces travaux ont été l'occasion d'approfondir l'utilisation du microscope électronique à balayage (surtout l'analyseur d'images) et de définir une méthode de caractérisation propre à l'étude des granulats utilisés en béton bitumineux, ce qui n'avait pas été fait auparavant, et, du même coup, de vérifier la validité de l'essai du coefficient d'écoulement.

BIBLIOGRAPHIE

- Bentenson, W., P. Kruegler et J. Mounce. *Asphalt Pavement Rutting in the Western States*, Two Texas lectures and the WAASHTO report, report number special study 26.0, Texas State Department of Highways and Public Transportation, 1985.
- Brown, E.R. *The Effects of Maximum Aggregate Size on Rutting Potential and Others Properties of Asphalt-Aggregate Mixtures*, Transportation Research Board 69th annual meeting, 1990, 19 p.
- Brown, E.R., A. Crawley et J.L. McRae. *Effect of Aggregate on Performance of Bituminous Concrete*, ASTM Special Technical Publication 1016, 1989, p.34-63.
- Brown, E.R. et F. Parker. *Effects of Aggregate Properties on Flexible Pavement Rutting in Alabama*, Transportation Research Board 70th annual meeting, 1991, 40 p.
- Button, J.W., R.L. Lytton et D. Perdomo. *Influence of Aggregate on Rutting Asphalt Concrete Pavements*, Transportation Research Record 1259, 1990, p.141-152.
- Donnais, R. et S. Meilleur. *Étude du comportement à l'orniérage d'enrobés bitumineux MB-16 et MB-12.5*, Proceeding of the thirty-six annual conference of C.T.T.A., 1991, p.135-152.
- Durand, J.M. *Manuel d'identification des dégradations des chaussées flexibles*, Cahiers techniques des chaussées, ministère des Transports du Québec, 1993, p. 20-23.
- Foster, C.R. *Dominant Effect of Fine Aggregate on Strentgh of Dense-Graded Asphalt Mixes*, HRB Special Report 109, 1970.
- Grimaux, J.-P. et R. Hiernaux. *Utilisation de l'orniéristeur type LPC, Bitumes et enrobés bitumineux*, Laboratoire des ponts et chaussées, 1977, p.165-172.
- Kandhal, P.S., M.A. Khatri et J.B. Motter. *Evaluation of Particle Shape and Texture of Mineral Aggregates and their Blends*, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists from the Proceedings of the Technical Sessions, vol. 61, 1992, p. 217-240.
- Lai, J.S. *Evaluation of the Effect of Gradation of Aggregate on Rutting Characteristics of Asphalt Mixes*, Georgia Department of Transportation, 1988, 36 p.
- Livneh, M. et E. Shklarsky. *The use of Gravels for Bituminous Paving Mixtures*, Proceeding of APPT, vol. 33, 1964.
- Miller, J., H. Monroney et M. Traylor. *Illinois Develops Stable Mixes*, Engineer and Research Division, Illinois Asphalt Pavement Association, 1987.

Moore, R.B. et R.A. Welke. *Effects of Fine Aggregate on Stability of Bituminous Mixes*, Testing and Research Division, Testing Laboratory Section, Michigan DOT, Research Report 78, 1979, p. 34-79.

Tessier, G.R *Guide de construction et d'entretien des chaussées*, Association québécoise du transport et des routes, 1990, 394 p.

PROGRAMMES INFORMATIQUES

Programme 1 : Enregistrement des images

```
=i=0
=j=0
=n=0
=gr="i2"
=name="i1"
=print("\n Acquisition automatique d'images *n* images")
=print("\n Faire le setup de l'appareil avant de débiter")
=print("\n Etes-vous prêt ? ")
=j=softkeys("oui\nExit")
if (j=2) exit
if (j=1) begin
=print("\n Nombre d'images à acquérir ? ")
=n=input("Entrer le nombre d'images : ")
=print("\n Donner un nom à la série d'image")
=name=input("taper le nom : ")
=print("\n Quel est le grossissement du microscope?")
=gr=input("\n Entrer le grossissement : ")
while (i++<n)
begin
=print("\n Acquisition de l'image #" +i)
=print("\n Choisir un champs et presser sur *continue* por acuérir l'image")
pause
=print("\n Acquisition de l'image")
* Acquire Run input=ssg grey=Image1
$ qload ssg_load acq_cmd
$ tnshell =set_global (ioflag,no)
$ ssg_load -r=/ r0/ SSG.ssg
$ tnshell =set_global (ioflag,no)
$ acq_cmd Abort >>>/nil
$ tnshell '=set_impar (Image1 , ampoffset , 0)'
$ display Image1
$ display 'mag=@gr'
$ shell 'acquire -i=Image1 -f=5 -p=32767 -c=0 -s=1024 -u'
$ ssgfunc raster 0 1 8 8 0 9
```

```

=print("\n Presser *continue* pour enregistrer l'image sur le disque dur")
pause
=print("\n Ecriture de l'image sur le disque dur")
* Write GREY grey=Image3 Byte Hard file=@name@i
$ chd /hard/Images
$ witd -i=Image1 -f=/hard/Images/@name@i
$ touch /hard/Images/@name@i
End

```

Programme 2 : Calcul des paramètres

```

=h=0
=i=0
=j=0
=l=0
=n=0
=m=0
=B1=0
=B2=0
=print("\n Programme de traitement d'images")
=print("\n Combien d'image à traiter ?")
=i=input("\n Entrer le nombre : ")
=print("\n Combien d'images à imprimer ?")
=m=input("\n Entrer le nombre : ")
=print("\n Entrer le nom de la série d'images à traiter")
=img=input("\n Nom des images : ")
=print("\n Création de l'image binaire ")
=print("\n Entrer la limite basse de l'image")
=l=input("\n Limite basse : ")
=print("\n Entrer la limite haute de l'image")
=h=input("\n Limite haute : ")
=print("\n Entrer le nom du fichier où sauver les résultats")
=file=input("\n Entrer le nom : ")
=print("\n Prêt à commencer ?")
=n=softkeys ("Yes\nExit")
if (n=2) exit

```

```

if (n=1)
begin
while (j++<i)
begin
=print("traitement de l'image" +j);
* Read Grey grey=Image1 Hard file=bb
$ chd /hard/Images
$ rfd -i=Image1 -f=/hard/Images/@img@j
=b1=image1>l and image1 <h
$ display Binary1
* Process Binary Filter filter=erode source=Binary1 dest=Binary2 count=3
$ display dismode=binary
$ binfilter -n=3 -f=Erode -s=Binary1 -d=Binary2
*Process Binary Filter filter=tSeparate source=Binary2 dest=Binary3
temp=Binary1
$ display dismode=binary
$ binfilter -n=0 -r=/dd/Bin_Filters/segment -a=Binary1 -s=Binary2 -d=Binary3
* Display Binary binary=Binary3
$ display dismode=binary
$ display Binary3
=print("\n Mesure des paramètres")
* Analyse Sizing Run old_data=@file binary=Binary3
$ chd /hard/Data
$ fixax ; size_run -b=Binary3 -d=@file.part
if(j<=m)
begin
=print(" Impression de l'iamge mesurée")
=print("j=",j
=print("m=",m)
* Image_Print Neg_Image
$ imprint -n
End

```

RÉSULTATS OBTENUS AU MEB

GRANULAT		AIRE	PÉRIM.	CIRCUL.	RUGOSITÉ	PÉRIM. CONV.	AIRE CONV.	CIRC. CONV.	P. MIN.	P. MAX.	LARG.	R. FORME	R. PÉRIM.
COR	1.25	2080516.01	7316.76632	2.28070757	24.3122188	6061.27066	2343679.31	1.34039118	1314.44392	2420.25066	1438.0855	1.83592779	1.2071341
		977478.413	1855.33815	0.77669706	11.2448932	1413.53972	1061170.68	0.2314636	374.24584	642.39711	436.361359	0.70646696	1.3125476
	630	422058.246	3350.99	2.48852669	20.6992279	2581.07783	479199.362	1.31716033	571.855669	1021.61245	625.19205	1.85447471	1.298291
		300162.171	1437.14591	0.78057946	9.50350852	949.889085	337729.216	0.2386102	266.627709	364.181445	300.243078	0.74197572	1.5129618
	315	144887.773	2011.78421	2.53234204	24.0686456	1524.93388	163717.43	1.28446035	343.210356	600.837261	369.047732	1.75167859	1.31926
		101950.401	844.949165	0.9226522	11.348835	527.577007	113533.581	0.17602699	136.795351	212.668947	146.558888	0.57149191	1.6015656
	160	27850.2771	1002.05738	3.28499918	21.549725	674.617894	31662.8554	1.29601058	146.610549	268.82513	157.982187	1.85815538	1.4853703
		19570.8741	404.794892	1.18751209	10.1286679	225.872281	21846.866	0.20215989	59.2915356	92.356898	66.5951153	0.66235486	1.7921406
	80	7775.75107	521.692156	3.59388312	15.3846269	345.658631	8782.83393	1.20315486	81.4357743	133.235408	86.7801944	1.43748693	1.7285002
		4987.20042	205.565561	1.09219169	8.55956144	104.233959	5573.09795	0.14095506	28.3252116	40.660691	30.740199	0.49955291	1.9721554
	Moyenne pond.	747319.437	3557.41773	2.67823564	22.3127485	2838.55486	842771.37	1.30399173	621.356433	1129.34375	677.604752	1.79524356	1.3453435
GRG	1.25	2075167.71	6455.45765	1.66604188	16.3746021	5572.47188	2229767.05	1.15151027	1400.14921	2088.21174	1494.47188	1.44025611	1.158455
		876780.448	1343.37415	0.27100141	7.34057599	1047.91024	927482.105	0.09886847	312.152092	438.299842	340.802669	0.35788339	1.2819554
	630	372149.193	2695.52449	1.66933357	14.857868	2367.97311	405946.696	1.16615648	586.311612	892.299714	636.621612	1.44995347	1.1383256
		178875.785	627.938683	0.32119111	5.5432167	532.329064	194433.369	0.10313131	154.494277	200.581483	170.616203	0.32108241	1.1796062
	315	101593.43	1478.85365	1.90880628	16.7818821	1232.28373	112360.793	1.19241477	298.15991	471.159864	323.712452	1.52454161	1.2000918
		68150.5069	502.548138	0.48878283	7.91510848	375.95033	74793.2667	0.18012887	101.716141	147.121837	110.940434	0.48627167	1.3367408
	160	28429.6287	784.271828	1.93099433	17.5157759	653.534772	31326.3976	1.20008237	158.061749	250.083726	170.710147	1.54448051	1.2000461
		17757.2444	257.842383	0.52281825	7.52400605	192.336196	19395.8582	0.12509232	54.299617	73.1382617	58.6090401	0.41923348	1.3405817
	80	7227.85809	401.552404	2.30611072	22.4305376	334.63959	7935.00601	1.24410448	76.953018	130.699796	82.9297973	1.86016213	0.429297
		4469.03709	125.010612	0.55904539	8.42949017	100.941905	4845.70433	0.16914114	27.2040587	40.6451958	29.5898288	0.51425368	1.2384412
	Moyenne pond.	726066.689	2995.45506	1.82231786	16.8453232	2578.40495	782261.037	1.18030201	641.776891	970.753666	688.862952	1.51349765	1.1174288

GRANULAT		AIRE	PÉRIM.	CIRCUL.	RUGOSITÉ	PÉRIM. CONV.	AIRE CONV.	CIRC. CONV.	P. MIN.	P. MAX.	LARG.	R. FORME	R. PÉRIM.
GRE	1.25	516153.356	3501.39828	2.0802154	20.0999068	2855.18391	576045.402	1.2115269	670.792046	1104.16821	712.717397	1.65119626	1.2263302
		271583.535	964.469824	0.67520224	8.32437205	690.372958	295795.524	0.16623893	203.76138	281.668426	219.839111	0.53812374	1.3970272
	630	2678695	8888.35167	2.57833111	24.7409227	6546.14516	3058027.52	1.21441643	1530.38286	2530.8927	1660.33231	1.60775341	1.3577994
		1515149.98	3594.47256	1.40778019	12.2264161	1820.6445	1727558.78	0.16074745	474.488082	742.883326	517.505776	0.53044444	1.9742858
	315	120473.983	1651.62587	1.93941589	19.0395984	1370.04221	132321.152	1.20517632	315.959611	532.976284	338.920374	1.62737416	1.2055292
		63316.9869	486.065885	0.51253219	9.30409601	359.44847	69365.7614	0.1434511	85.6568821	154.566347	93.4624185	0.45637743	1.3522547
	160	30254.7943	834.052735	1.97997786	19.0326514	691.506833	33698.854	1.20634814	164.375027	266.889191	177.098644	1.58178856	1.2061381
		15109.2599	220.884709	0.47401367	8.18834877	166.429511	16589.5599	0.14099671	45.0342702	69.1812898	50.0472888	0.46054949	1.3271968
	80	8379.35725	471.209434	2.52343105	19.9162389	363.829349	9309.2218	1.21545	85.7115497	140.742573	92.5060915	1.58729401	1.3536747
		4203.34186	126.88621	0.70790297	8.12576764	87.5605236	4609.56115	0.15314023	24.9218613	35.3019891	27.7361454	0.44811347	1.4491258
	Moyenne pond.	724371.064	3401.85689	2.16135232	20.5623144	2639.63227	821629.347	1.2099344	617.708469	1021.2822	664.496451	1.61847351	1.2534562
SCO	1.25	2302081.41	8728.61333	2.99975898	18.0965941	5877.12231	2537747.2	1.14666941	1465.03254	2210.20456	1549.93256	1.48691374	1.4851849
		1147303.56	2857.21426	1.81133855	8.94654238	1390.81169	1236270.79	0.13851509	405.19879	567.062176	433.958274	0.47698411	2.0543502
	630	569695.345	4359.01691	2.95989832	16.953115	2888.96765	627237.946	1.13718678	721.322198	1080.82704	774.307447	1.44469953	1.5088493
		289569.468	1517.75843	1.40137397	9.17281365	777.999739	315941.918	0.11332282	219.414335	303.722079	233.123036	0.37272988	1.950847
	315	136618.327	2420.17892	3.95560841	16.9518812	1418.91686	152147.061	1.134871	357.539124	533.537141	376.492229	1.46948206	1.7056524
		78084.0673	879.072687	2.2822856	8.42724239	385.072179	85335.5752	0.13315323	106.703773	151.243654	113.559082	0.42652018	2.2828777
	160	31521.5677	1298.97037	4.81704519	17.8349985	694.726008	35562.1564	1.14288842	170.76738	261.745782	182.214014	1.49043188	1.8697592
		15306.9177	452.927624	2.5490791	7.82499396	157.790877	16666.5419	0.1288009	44.7079814	63.2868597	48.1059013	0.42357066	2.8704297
	80	8781.36775	616.181789	4.21352389	15.6442201	360.714809	9929.3986	1.12628314	91.5743637	134.839297	96.4723892	1.41227243	1.8052816
		4862.96011	246.150027	2.39174435	8.41726397	102.382852	5400.76458	0.0954009	27.8228479	40.2889934	29.8459533	0.35514263	2.4042115
	Moyenne pond.	842265.533	4340.93535	3.66134258	17.3740907	2826.18533	928861.973	1.13983307	705.242059	1061.73474	748.230242	1.4696543	1.6404451

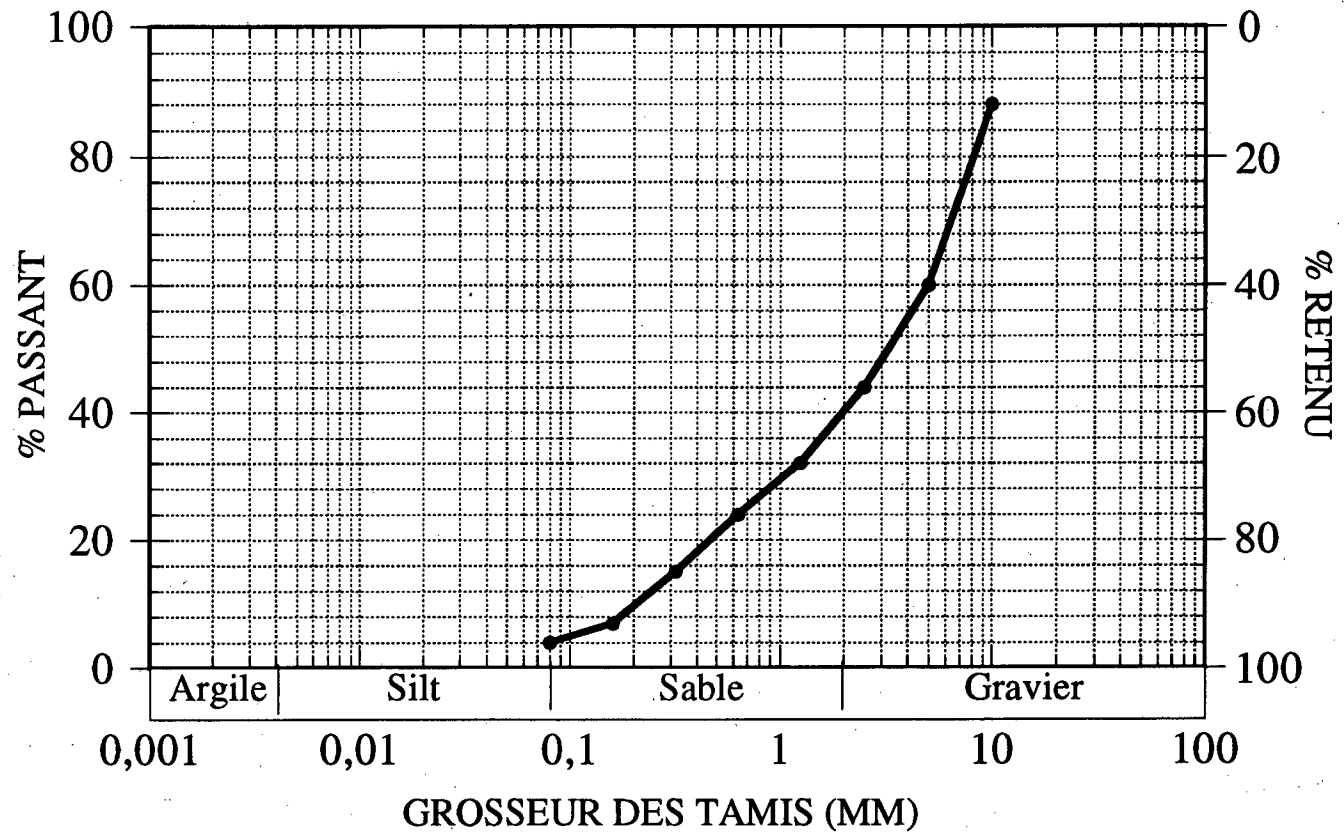
GRANULAT		AIRE	PÉRIM.	CIRCUL.	RUGOSITÉ	PÉRIM. CONV.	AIRE CONV.	CIRC. CONV.	P. MIN.	P. MAX.	LARG.	R. FORME	R. PÉRIM.
PHO	1.25	2245653.58	7781.76333	2.42506052	26.1598702	6249.03293	2511975.14	1.3692373	1299.32787	2521.98034	1412.74501	1.97374563	1.2452748
		1405720.9	2461.68539	0.76735637	11.8440557	1751.52111	1521028.48	0.2757605	468.565798	764.29292	511.307511	0.83685391	1.4054557
	630	532993.867	3825.27085	2.43524709	24.1243309	3031.00576	606247.152	1.32192448	658.354539	1210.97867	710.708564	1.83001394	1.2620467
		311339.431	1253.34579	0.85024738	10.6680957	829.235515	354365.342	0.22263181	218.304564	355.092972	233.508594	0.64791801	1.5114473
	315	129503.794	1998.90613	2.80744335	23.2200162	1473.23289	146983.363	1.30188698	319.582712	590.434894	347.715799	1.82151989	1.3568161
		83371.3071	805.747752	1.66140257	11.4898532	454.194502	93620.3241	0.25683836	106.117199	201.244191	118.21821	0.7757451	1.7740148
	160	29887.3885	975.10927	2.84276085	21.1445295	705.875515	33894.1865	1.28174815	159.783866	277.783675	172.842551	1.7442437	1.3814182
		16392.6762	391.316107	1.64555881	9.25933917	192.819692	18548.651	0.2021524	53.5714419	79.8481289	60.8535479	0.63484716	2.0294406
	80	6375.90509	467.401574	3.8336719	19.4587522	330.365417	7313.58699	1.33587056	70.3547301	133.035005	75.175037	2.0467773	1.5460565
		4226.95721	181.587469	1.55532766	10.0237838	99.4269094	4843.98111	0.30817874	26.8288791	42.153659	28.98861	0.87404705	1.8263413
	Moyenne pond.	815888.872	3779.41402	2.70231989	23.5856432	2978.34094	915240.586	1.32462058	630.608758	1197.17205	684.407907	1.87032549	1.3235133
SCC	1.25	2056695.27	7352.92237	2.26823266	22.8485583	5834.53978	2298587.74	1.27247791	1298.18154	2312.26022	1376.65285	1.83026914	1.2602403
		1007527.26	2071.00264	0.63668837	10.0324716	1392.52556	1123632.52	0.21678733	405.510985	584.522657	441.568552	0.70054859	1.4872277
	630	491594.821	3726.9288	2.45803854	20.4929041	2795.26359	543497.214	1.23376724	630.628313	1097.05754	671.662797	1.74426891	1.3333014
		261969.704	1087.11914	0.80360376	9.02077085	677.705636	287627.556	0.18145459	196.13953	276.011034	210.723175	0.5625858	1.604117
	315	158659.885	2193.91921	2.60472165	21.6425926	1556.39134	175169.08	1.19395929	363.652341	607.139648	384.279989	1.63607901	1.4096193
		89830.841	800.273098	0.83842299	10.8744352	451.091814	99239.0875	0.13242135	114.663175	186.98564	119.942105	0.43185253	1.7740803
	160	27955.4513	1023.02376	3.28203373	17.953342	663.629411	31491.679	1.2041211	154.360349	258.059947	164.822392	1.64633086	1.5415588
		15034.9664	377.317566	1.36778605	8.63229131	182.116758	16695.116	0.1701717	48.5069958	77.2458071	52.072819	0.53134633	2.0718443
	80	7893.56598	478.841698	2.37023888	17.0796688	354.105732	8828.02983	1.20044246	83.4809849	137.450084	88.4769559	1.53307051	1.3363223
		3607.76984	143.401615	0.9341891	8.19651627	81.8094934	4012.83494	0.16814759	21.9984066	33.9690308	24.3748446	0.5033131	1.7528725
	Moyenne pond.	757209.128	3685.41217	2.59231454	20.6943752	2818.88652	844649.246	1.22799507	634.535045	1111.61674	673.391662	1.71029876	1.3704326

GRANULAT		AIRE	PÉRIM.	CIRCUL.	RUGOSITÉ	PÉRIM. CONV.	AIRE CONV.	CIRC. CONV.	P. MIN.	P. MAX.	LARG.	R. FORME	R. PÉRIM.
SYE	1.25	2696697.53	8181.65218	2.1752621	25.358781	6637.04532	3028407.48	1.27012758	1491.44852	2599.47782	1625.13741	1.71260694	1.2327251
		1632236.45	2574.00614	0.5252353	12.2280825	1884.07913	1817465.99	0.19263684	501.796169	780.156326	558.111419	0.59084	1.3661879
	630	442364.168	3900.19522	3.20113933	22.5959824	2752.53533	536604.546	1.28441767	622.853533	1077.97318	671.791283	1.78430556	1.4169465
		299241.527	1475.47186	1.21069105	10.1992738	877.213369	350617.164	0.20299796	250.95293	336.032785	278.946961	0.6678473	1.6819988
	315	144397.408	1972.35696	2.38690822	22.3400708	1533.56168	165026.009	1.24897461	355.453243	598.522901	384.659743	1.69010559	1.2861282
		85838.194	635.768175	0.68053868	8.23636265	413.744464	96408.6632	0.17991997	128.397959	159.882612	143.693719	0.56327279	1.5366204
	160	27821.8933	897.844197	2.63936911	22.0210761	689.384424	31771.844	1.32918291	148.558946	276.338704	161.627095	1.85853877	1.3023854
		17784.0905	293.042002	0.85198946	9.20806025	200.943164	19619.9861	0.25042794	53.7974937	84.8106833	59.63507	0.69919918	1.4583328
	80	6873.04367	466.081621	3.32971415	18.2078981	336.309334	7804.20656	1.29779371	73.0487011	134.510467	79.386384	1.83820075	1.485517
		4866.79717	176.985277	1.15819184	9.43670581	110.51335	5337.3452	0.18852639	28.2737907	45.5825232	30.7776289	0.53960181	1.6014832
	Moyenne pond.	936051.367	3892.83997	2.60746323	22.9231543	3049.77213	1059913.69	1.2821122	687.172685	1195.46166	746.72732	1.76048976	1.3144765
DOL	1.25	1923593.71	6649.32097	2.09133545	23.1506852	5661.63267	2095871.49	1.36574279	1181.62856	2286.39848	1269.57584	2.00651679	1.1744529
		1223125.41	2068.89769	0.74886941	8.98249563	1582.09821	1301636.97	0.26855976	440.737648	643.887125	498.910369	0.81563154	1.3076923
	630	456249.111	3233.26618	2.02438854	21.4796814	2734.79799	501542.945	1.29646191	596.52497	1086.10438	646.988131	1.81253035	1.1822687
		266703.243	928.049915	0.57011467	9.24700201	724.804968	287757.736	0.18093318	200.549585	294.189547	223.354063	0.59456272	1.2804133
	315	104184.28	1528.64393	2.05784808	21.6625955	1300.07538	114860.601	1.32323692	271.645869	527.464348	288.357341	1.97616076	1.1758118
		78655.7983	522.592149	0.6133882	9.32516682	417.693352	84195.3895	0.22813132	108.234907	171.127045	117.036518	0.66291353	1.2511383
	160	22588.5285	748.379034	2.19102817	18.9314379	603.909596	25057.9967	1.27373909	132.07867	241.50388	140.679364	1.83684913	1.2392236
		14643.3781	244.332246	0.61449444	8.16201914	171.638301	16042.2549	0.17943772	46.3467627	70.7295481	48.2575738	0.57783932	1.4235299
	80	7614.69923	528.381362	4.52977016	20.2996559	349.679949	8529.07311	1.23510311	78.7570046	137.660369	84.0629015	1.54618888	1.8658972
		4173.71371	164.563254	1.10665322	8.21877987	92.5811207	4532.09612	0.14404609	25.4285422	37.8740502	27.6443463	0.50053917	1.7775034
	Moyenne pond.	696858.206	3174.69882	2.27323256	21.4239876	2684.97427	760564.951	1.31412408	567.236393	1080.4452	609.591369	1.89243127	1.2411343

GRANULAT		AIRE	PÉRIM.	CIRCUL.	RUGOSITÉ	PÉRIM. CONV.	AIRE CONV.	CIRC. CONV.	P. MIN.	P. MAX.	LARG.	R. FORME	R. PÉRIM.
GRL	1.25	2687496.63	8435.98006	2.51603962	21.5107224	6338.38724	2899599.44	1.20722628	1490.39063	2435.05256	1595.87105	1.64493058	1.3309348
		1549431.77	3584.53385	1.90530348	10.7521027	1757.19548	1654910.28	0.21220272	502.655483	708.66371	557.403326	0.65107903	2.0399175
	630	551087.425	3654.79331	2.15075414	18.190175	2854.11964	601311.805	1.1750074	692.346657	1092.03299	737.070231	1.55929414	1.2805326
		327964.826	1249.29419	0.85420202	8.71208993	790.231527	353481.347	0.13765881	215.474377	316.126351	234.13341	0.45964051	1.5809217
	315	105405.259	1639.57562	2.27630075	17.2860987	1269.42852	115470.059	1.21685791	296.544074	490.771855	319.909723	1.67442395	1.2915856
		64227.5862	631.798035	1.16839482	9.89100738	387.861724	69143.4225	0.24924666	100.663282	165.040231	110.869294	0.7885776	1.628926
	160	28481.4609	976.410896	2.97842328	18.5177076	667.669895	31732.5201	1.20849465	155.938728	258.610983	166.297656	1.63561238	1.4624156
		15552.3604	371.825809	1.63408082	8.79506684	181.566894	16994.9163	0.15474813	47.5538209	75.1503879	51.6391846	0.51806634	2.0478723
	80	7021.53442	446.054396	2.66202737	19.3291445	336.214508	7853.3799	1.24494345	77.1668061	131.359118	83.0239061	1.81533071	1.3266959
		3669.72674	136.135513	1.36639154	7.79791281	80.2706605	3983.64416	0.21609583	24.6517597	32.1157544	27.3723343	0.66930462	1.6959561
	Moyenne pond.	946405.564	3859.39345	2.49246709	19.1338513	2916.71159	1023058.46	1.20603208	689.284192	1120.92017	737.641373	1.64535567	1.337979
CAL	1.25	2186339.5	6978.57528	2.0298938	22.1512669	5862.40012	2399774.9	1.29397706	1300.46137	2304.05994	1407.28453	1.79455902	1.1903956
		1571166.46	2501.99635	0.55205714	10.8095675	1981.19226	1708076.8	0.23939008	509.288637	813.761356	569.671714	0.74020501	1.2628741
	630	445491.171	3308.47439	2.24107136	20.5222518	2688.38894	492306.086	1.28264283	603.829157	1058.21864	650.497253	1.76255798	1.2306532
		279092.412	1017.19339	0.95677781	9.50659723	755.230396	301345.395	0.19700484	208.448498	308.598396	235.869176	0.61734119	1.346865
	315	106122.869	1670.47456	2.37985126	20.3961251	1309.22506	119122.818	1.2832051	287.862862	520.412687	310.562316	1.81493707	1.2759262
		70903.2865	592.571591	0.84919787	8.94794547	404.611711	78857.7182	0.19221168	108.582486	163.585539	121.191498	0.61200912	1.4645438
	160	25820.0477	833.273561	2.32331735	19.6683813	652.563535	28974.9806	1.25386265	146.71102	257.667774	156.146866	1.75822517	1.2769233
		13352.6171	220.170093	0.64054125	8.31540533	153.169528	14667.9771	0.17638269	44.3342625	63.6181358	48.6334406	0.55986813	1.4374275
	80	7401.00847	463.671281	3.00246083	22.6772226	347.241207	8352.31552	1.25704163	76.9886463	137.725042	81.9617847	1.75278817	1.4522847
		4429.60798	164.322622	0.97543381	10.0118186	100.989874	4956.63832	0.1721014	25.7324421	42.4195094	28.205178	0.55692882	1.6271198
	Moyenne pond.	774596.814	3332.5543	2.28249698	20.9734265	2747.52926	851617.74	1.27849348	610.78974	1081.8175	659.537839	1.78234429	1.2546387

COURBE GRANULOMÉTRIQUE DU MÉLANGE

Courbe granulométrique du mélange (MB-12,5)



FORMULES DES MÉLANGES

FORMULE DE MÉLANGE AVEC MASSE VOLUMIQUE RÉELLE

Projet : MTQ
 Laboratoire : MTQ

Date : 1993-94
Opérateur : M. Paradis

GRANULATS	grossier (2,5 mm et plus) :	<u>GRE</u>
	fin (2,5 mm et moins) :	<u>COR</u>
	filler (< 80 µm) :	<u>CAL</u>

grossier (2.5 mm et plus): GRE
fin (2.5 mm et moins): COR
filler (< 80 μ m): CAL

BITUME Type: Ultramar 80-100

Type: Ultramar 80-100

DENSITÉ DES GRANULATS

$$\text{D.G.} = \frac{100\%}{\frac{56 \text{ \% grossier}}{2.64} + \frac{40 \text{ \% fin}}{2.79} + \frac{4 \text{ \% filler}}{2.70}} = 2.700$$

MASSE VOLUMIQUE CALCULÉE

$$\text{M.V.C.} = \frac{100\%}{\frac{95.03}{2.700} \% \text{ granulats} + \frac{4.97}{1.015} \% \text{ bitume}} = 2.494$$

MASSE VOLUMIQUE MESURÉE (densité max) = 2.527

Compacité : 95 % Volume du moule : 9000 cm³

Volume du moule : 9000 cm³

Masse du mélange : $\frac{2.527}{1} \times \frac{95}{100} \times \frac{9000}{1} = 21606 \text{ gr}$

Masse des granulats : $\frac{21606}{100} \times 95.03 \% = 20532$ gr

$$\text{Masse du bitume : } \frac{21606}{100} \times \frac{4.97}{100} \% = \frac{1074}{100} \text{ gr}$$

GRANULOMÉTRIE

		20	14	10	5	2.5	1.25	630	315	160	80	fond
% pas.				88	60	44	32	24	15	7	4	
% ret.				12	28	16	12	8	9	8	3	4
masse				2464	5749	3285	2464	1643	1848	1643	616	821

FORMULE DE MÉLANGE AVEC MASSE VOLUMIQUE RÉELLE

Projet : MTQ
Laboratoire : MTQ

Date : 1993-94
Opérateur : M. Paradis

GRANULATS grossier (2.5 mm et plus) : GRE
fin (2.5 mm et moins) : DOL
filler (< 80 µm) : CAL

BITUME Type : Ultramar 80-100

DENSITÉ DES GRANULATS

$$D.G. = \frac{100\%}{\frac{56 \text{ \% grossier}}{2.64} + \frac{40 \text{ \% fin}}{2.79} + \frac{4 \text{ \% filler}}{2.70}} = 2.700$$

MASSE VOLUMIQUE CALCULÉE

$$M.V.C. = \frac{100\%}{\frac{95.03 \text{ \% granulats}}{2.700} + \frac{4.97 \text{ \% bitume}}{1.015}} = 2.494$$

MASSE VOLUMIQUE MESURÉE (densité max) = 2.529

Compacité : 95 %

Volume du moule : 9000 cm³

Masse du mélange : $\frac{2.529}{2.700} \times \frac{95}{100} \times 9000 = 21623 \text{ gr}$
Masse des granulats : $\frac{21623}{2.700} \times \frac{95.03}{100} = 20548 \text{ gr}$
Masse du bitume : $\frac{21623}{2.700} \times \frac{4.97}{100} = 1075 \text{ gr}$

GRANULOMÉTRIE

		20	14	10	5	2.5	1.25	630	315	160	80	fond
% pas.				88	60	44	32	24	15	7	4	
% ret.				12	28	16	12	8	9	8	3	4
masse				2466	5753	3288	2466	1644	1849	1644	616	822

FORMULE DE MÉLANGE AVEC MASSE VOLUMIQUE RÉELLE

Projet : MTQ
Laboratoire : MTQ

Date : 1993-94
Opérateur : M. Paradis

GRANULATS grossier (2.5 mm et plus) : GRE
fin (2.5 mm et moins) : GRE
filler (< 80 µm) : CAL

BITUME Type : Ultramar 80-100

DENSITÉ DES GRANULATS

$$D.G. = \frac{100\%}{\frac{56 \text{ \% grossier}}{2.64} + \frac{40 \text{ \% fin}}{2.64} + \frac{4 \text{ \% filler}}{2.70}} = 2.642$$

MASSE VOLUMIQUE CALCULÉE

$$M.V.C. = \frac{100\%}{\frac{95.03 \text{ \% granulats}}{2.642} + \frac{4.97 \text{ \% bitume}}{1.015}} = 2.447$$

MASSE VOLUMIQUE MESURÉE (densité max) = 2.501

Compacité : 95 % Volume du moule : 9000 cm³

Masse du mélange : $\frac{2.501}{2.447} \times \frac{95}{100} \times 9000 = 21384 \text{ gr}$
Masse des granulats : $\frac{21384}{2.642} \times \frac{95.03}{100} = 20321 \text{ gr}$
Masse du bitume : $\frac{21384}{2.447} \times \frac{4.97}{100} = 1063 \text{ gr}$

GRANULOMÉTRIE

		20	14	10	5	2.5	1.25	630	315	160	80	fond
% pas.				88	60	44	32	24	15	7	4	
% ret.				12	28	16	12	8	9	8	3	4
masse				2439	5690	3251	2439	1626	1829	1626	610	813

FORMULE DE MÉLANGE AVEC MASSE VOLUMIQUE RÉELLE

Projet : MTQ
Laboratoire : MTQ

Date : 1993-94
Opérateur : M. Paradis

GRANULATS grossier (2.5 mm et plus) : GRE
fin (2.5 mm et moins) : GRG
filler (< 80 µm) : CAL

BITUME Type : Ultramar 80-100

DENSITÉ DES GRANULATS

$$D.G. = \frac{100\%}{\frac{56 \text{ \% grossier}}{2.64} + \frac{40 \text{ \% fin}}{2.66} + \frac{4 \text{ \% filler}}{2.70}} = 2.650$$

MASSE VOLUMIQUE CALCULÉE

$$M.V.C. = \frac{100\%}{\frac{95.03 \text{ \% granulats}}{2.650} + \frac{4.97 \text{ \% bitume}}{1.015}} = 2.453$$

MASSE VOLUMIQUE MESURÉE (densité max) = 2.487

Compacité : 95 % Volume du moule : 9000 cm³

Masse du mélange : $\frac{2.487}{2.453} \times \frac{95}{100} \times 9000 = 21264$ gr
Masse des granulats : $\frac{21264}{2.650} \times 95.03 = 20201$ gr
Masse du bitume : $\frac{21264}{2.453} \times 4.97 = 1063$ gr

GRANULOMÉTRIE

		20	14	10	5	2.5	1.25	630	315	160	80	fond
% pas.				88	60	44	32	24	15	7	4	
% ret.				12	28	16	12	8	9	8	3	4
masse				2424	5656	3232	2424	1616	1818	1616	606	808

FORMULE DE MÉLANGE AVEC MASSE VOLUMIQUE RÉELLE

Projet : MTQ
Laboratoire : MTQ

Date : 1993-94
Opérateur : M. Paradis

GRANULATS grossier (2.5 mm et plus) : GRE
 fin (2.5 mm et moins) : GRL
 filler (< 80 µm) : CAL

BITUME Type : Ultramar 80-100

DENSITÉ DES GRANULATS

$$D.G. = \frac{100\%}{\frac{56 \text{ \% grossier}}{2.64} + \frac{40 \text{ \% fin}}{2.91} + \frac{4 \text{ \% filler}}{2.70}} = 2.744$$

MASSE VOLUMIQUE CALCULÉE

$$M.V.C. = \frac{100\%}{\frac{95.03 \text{ \% granulats}}{2.744} + \frac{4.97 \text{ \% bitume}}{1.015}} = 2.530$$

MASSE VOLUMIQUE MESURÉE (densité max) = 2.835

Compacité : 95 % Volume du moule : 9000 cm³

Masse du mélange : $\frac{2.835}{2.530} \times 95\% \times 9000 = 24239 \text{ gr}$
Masse des granulats : $\frac{24239}{2.744} \times 95.03\% = 23035 \text{ gr}$
Masse du bitume : $\frac{24239}{2.530} \times 4.97\% = 1205 \text{ gr}$

GRANULOMÉTRIE

		20	14	10	5	2.5	1.25	630	315	160	80	fond
% pas.				88	60	44	32	24	15	7	4	
% ret.				12	28	16	12	8	9	8	3	4
masse				2764	6450	3686	2764	1843	2073	1843	691	921

FORMULE DE MÉLANGE AVEC MASSE VOLUMIQUE RÉELLE

Projet : MTQ
Laboratoire : MTQ

Date : 1993-94
Opérateur : M. Paradis

GRANULATS grossier (2.5 mm et plus) : GRE
fin (2.5 mm et moins) : PHO
filler (<80 µm) : CAL

BITUME Type : Ultramar 80-100

DENSITÉ DES GRANULATS

$$D.G. = \frac{100\%}{\frac{56 \text{ \% grossier}}{2.64} + \frac{40 \text{ \% fin}}{2.520} + \frac{4 \text{ \% filler}}{2.70}} = 2.592$$

MASSE VOLUMIQUE CALCULÉE

$$M.V.C. = \frac{100\%}{\frac{95.03 \text{ \% granulats}}{2.592} + \frac{4.97 \text{ \% bitume}}{1.015}} = 2.406$$

MASSE VOLUMIQUE MESURÉE (densité max) = 2.459

Compacité : 95 %

Volume du moule : 9000 cm³

Masse du mélange : $\frac{2.459}{2.406} \times \frac{95}{100} \times 9000 = 21024$ gr

Masse des granulats : $\frac{21024}{100} \times 95.03 = 19979$ gr

Masse du bitume : $\frac{21024}{100} \times 4.97 = 1045$ gr

GRANULOMÉTRIE

		20	14	10	5	2.5	1.25	630	.315	160	80	fond
% pas.				88	60	44	32	24	15	7	4	
% ret.				12	28	16	12	8	9	8	3	4
masse				2397	5594	3197	2397	1598	1798	1598	599	799

FORMULE DE MÉLANGE AVEC MASSE VOLUMIQUE RÉELLE

Projet : MTQ
Laboratoire : MTQ

Date : 1993-94
Opérateur : M. Paradis

GRANULATS grossier (2.5 mm et plus) : GRE
fin (2.5 mm et moins) : SCC
filler (< 80 µm) : CAL

BITUME Type : Ultramar 80-100

DENSITÉ DES GRANULATS

$$D.G. = \frac{100\%}{\frac{56 \text{ \% grossier}}{2.64} + \frac{40 \text{ \% fin}}{2.81} + \frac{4 \text{ \% filler}}{2.70}} = 2.707$$

MASSE VOLUMIQUE CALCULÉE

$$M.V.C. = \frac{100\%}{\frac{95.03 \text{ \% granulats}}{2.707} + \frac{4.97 \text{ \% bitume}}{1.015}} = 2.500$$

MASSE VOLUMIQUE MESURÉE (densité max) = 2.561

Compacité : 95 %

Volume du moule : 9000 cm³

$$\begin{aligned} \text{Masse du mélange : } & \frac{2.561}{2.500} \times \frac{95}{100} \times 9000 = 21897 \text{ gr} \\ \text{Masse des granulats : } & \frac{21897}{2.500} \times \frac{95.03}{100} = 20809 \text{ gr} \\ \text{Masse du bitume : } & \frac{21897}{2.500} \times \frac{4.97}{100} = 1088 \text{ gr} \end{aligned}$$

GRANULOMÉTRIE

		20	14	10	5	2.5	1.25	630	315	160	80	fond
% pas.				88	60	44	32	24	15	7	4	
% ret.				12	28	16	12	8	9	8	3	4
masse				2497	5826	3329	2497	1665	1873	1665	624	832

FORMULE DE MÉLANGE AVEC MASSE VOLUMIQUE RÉELLE

Projet : MTQ
Laboratoire : MTQ

Date : 1993-94
Opérateur : M. Paradis

GRANULATS grossier (2.5 mm et plus) : GRE
fin (2.5 mm et moins) : SCO
filler (< 80 µm) : CAL

BITUME Type : Ultramar 80-100

DENSITÉ DES GRANULATS

$$D.G. = \frac{100\%}{\frac{56}{2.64} \% \text{ grossier} + \frac{40}{3.07} \% \text{ fin} + \frac{4}{2.70} \% \text{ filler}} = 2.799$$

MASSE VOLUMIQUE CALCULÉE

$$M.V.C. = \frac{100\%}{\frac{95.03}{2.799} \% \text{ granulats} + \frac{4.97}{1.015} \% \text{ bitume}} = 2.574$$

MASSE VOLUMIQUE MESURÉE (densité max) = 2.663

Compacité : 95 % Volume du moule : 9000 cm³

Masse du mélange : $\frac{2.663}{2.574} \times \frac{95}{100} \times 9000 = 22769$ gr

Masse des granulats : $\frac{22769}{2.574} \times \frac{95.03}{100} = 21637$ gr

Masse du bitume : $\frac{22769}{2.574} \times \frac{4.97}{100} = 1132$ gr

GRANULOMÉTRIE

		20	14	10	5	2.5	1.25	630	315	160	80	fond
% pas.				88	60	44	32	24	15	7	4	
% ret.				12	28	16	12	8	9	8	3	4
masse				2596	6058	3462	2596	1731	1947	1731	649	865

FORMULE DE MÉLANGE AVEC MASSE VOLUMIQUE RÉELLE

Projet : MTQ
Laboratoire : MTQ

Date : 1993-94
Opérateur : M. Paradis

GRANULATS grossier (2.5 mm et plus) : GRE
 fin (2.5 mm et moins) : SYE
 filler (< 80 µm) : CAL

BITUME Type: Ultramar 80-100

DENSITÉ DES GRANULATS

$$D.G. = \frac{100\%}{\frac{56 \text{ \% grossier}}{2.64} + \frac{40 \text{ \% fin}}{2.70} + \frac{4 \text{ \% filler}}{2.70}} = 2.666$$

MASSE VOLUMIQUE CALCULÉE

$$M.V.C. = \frac{100\%}{\frac{95.03 \text{ \% granulats}}{2.666} + \frac{4.97 \text{ \% bitume}}{1.015}} = 2.466$$

MASSE VOLUMIQUE MESURÉE (densité max) = 2.498

Compacité : 95 %

Volume du moule : 9000 cm³

Masse du mélange : $\frac{2.498}{2.466} \times \frac{95}{100} \times 9000 = 21358$ gr

Masse des granulats : $\frac{21358}{2.666} \times \frac{95.03}{100} = 20297$ gr

Masse du bitume : $\frac{21358}{2.466} \times \frac{4.97}{100} = 1061$ gr

GRANULOMÉTRIE

		20	14	10	5	2.5	1.25	630	315	160	80	fond
% pas.				88	60	44	32	24	15	7	4	
% ret.				12	28	16	12	8	9	8	3	4
masse				2436	5683	3247	2436	1624	1827	1624	609	812

RÉSULTATS D'ORNIÉRAGE BRUTS

Profondeurs d'ornière brutes (réelles) obtenues à l'ornièreur

Granulats	Fillers différents*	Filler calcaire*
GRG	18,2 mm (10 000)	15,0 mm (9 597)
CAL	6,1 mm (17 000)	8,4 mm (30 000)
GRE	7,9 mm (17 000)	11,0 mm (30 000)
GRL	21,8 mm (9 500)	15,3 mm (4 080)
SCO	6,0 mm (17 000)	14,7 mm (30 000)
PHO	8,7 mm (17 000)	8,3 mm (16 560)
SYE	16,9 mm (10 000)	19,3 mm (30 000)
COR	7,7 mm (17 000)	14,5 mm (30 000)
SCC	7,9 mm (8 782)	15,2 mm (11 600)
DOL	7,8 mm (17 000)	15,0 mm (22 160)

* Le nombre entre parenthèses indique le nombre de cycles auquel on obtient ces profondeurs.

