

Laboratoire des chaussées

.....

**Retraitement en place
des chaussées**

**GUIDES ET
MANUELS
TECHNIQUES**

.....

Retraitement en place des chaussées

Le contenu de cette publication a été préparé
par le ministère des Transports

Réalisation :

Service de la qualité et des normes

Édition et révision linguistique :

Direction des communications

Responsable de la rédaction :

Guy Bergeron, ing. M. Sc.

Service des chaussées

© Gouvernement du Québec

Dépôt légal — 1996

Bibliothèque nationale du Québec

Bibliothèque nationale du Canada

ISBN 2-550-31030-6

Avant-propos

Les techniques de réfection de chaussées sont pour la plupart en constante évolution, notamment la technique de retraitement en place. Depuis 1989, le ministère des Transports du Québec utilise couramment cette technique pour la remise en état de certains tronçons. L'ensemble des travaux révèle que la réalisation de certains travaux spécifiques est essentielle afin de préciser l'applicabilité de la technique et d'en assurer la qualité. Cette version du guide se veut un outil pour aider le concepteur dans la préparation et la réalisation d'un projet. Les différents développements issus de travaux de recherche, suivis de performance de chaussées et autres expérimentations sont intégrés dans cette version.

Les différentes notions présentées dans ce guide font appel, entre autres, aux mécanismes régissant le comportement des chaussées et aux documents contractuels existants. La compréhension du texte est facilitée par de nombreuses figures, diagrammes, photos et par quelques exemples de calculs.

Remerciements

Ce guide a été réalisé au Service des chaussées du ministère des Transports sous la supervision de M. Guy Bergeron, ing. M.Sc. Nous tenons à souligner que la réalisation de ce guide n'aurait pu être menée à bien sans l'excellente collaboration de plusieurs ingénieurs et techniciens du MTQ. Également, les commentaires et suggestions des entreprises Constructions DJL inc., SINTRA inc., Construction SOTER inc. et TALON SEBEQ inc. ont contribué à améliorer divers aspects traités dans ce document.

Liste des symboles et abréviations

F.F. :	facteur de foisonnement
I.P. :	indice de plasticité
L.L. :	limite de liquidité
DJMA :	débit journalier moyen annuel
% V.L. :	pourcentage de véhicules lourds
% dir. :	pourcentage de véhicules par direction
% voie :	pourcentage de véhicules par voie de roulement
C.A. :	coefficient d'agressivité des véhicules lourds
F.A. :	facteur d'accroissement
ECAS :	équivalent de charge axiale simple
I_{gel} :	indice de gel ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{jr}$)
IRI :	indice de rugosité internationale
b.b. :	béton bitumineux
γ :	masse volumique (kg/m^3)
g.b. :	granulats bitumineux

Table des matières

Chapitre 1 Introduction	1
Chapitre 2 Références	3
Chapitre 3 Généralités	5
3.1 Définition	5
3.2 Avantages et inconvénients	6
3.3 Matériel	7
3.3.1 Engins utilisés pour le retraitement en place	7
Chapitre 4 CHAMPS D'APPLICATION DU RETRAITEMENT EN PLACE	15
4.1 Travaux d'expertise	15
4.2 Cas favorables à l'utilisation du retraitement en place	20
4.3 Cas défavorables à l'utilisation du retraitement en place	21
4.4 Limites de la technique	22
Chapitre 5 Dimensionnement et préparation d'un projet	29
5.1 Dimensionnement de chaussées	29
5.1.1 Dimensionnement structural	29
5.1.1.1 Évaluation du trafic	30
5.1.1.2 Option : Décohésionnement + revêtement	31
5.1.1.3 Option : Décohésionnement + stabilisation + revêtement	32
5.1.1.4 Option : Décohésionnement + rechargement + revêtement	33
5.1.2 Protection contre les effets du gel	33
5.1.3 Exemple de choix de l'option	34
5.1.3.1 Protection contre le gel	35
5.1.3.2 Dimensionnement structural	35
5.1.3.3 Faisabilité et coûts des options	37
5.2 Étude préliminaire	39
5.2.1 Épaisseur du revêtement bitumineux	39
5.2.1.1 Méthodes d'échantillonnage	39
5.2.1.2 Cadence	42
5.2.1.3 Géoradar	42

5.2.2	Caractéristiques du revêtement	42
5.2.2.1	Essais à effectuer	42
5.2.3	Matériaux de fondation	43
5.2.3.1	Méthodes d'échantillonnage	43
5.2.3.2	Essais à effectuer	43
5.2.3.3	Cadence	43
5.2.4	Fenêtre d'exploration	43
5.3	Analyse des résultats	44
5.3.1	Évaluation de l'épaisseur de planage	44
5.3.2	Évaluation de la profondeur de décohesionnement	47
5.3.3	Granulats d'apport	49
5.3.3.1	Évaluation de la granulométrie après décohesionnement	49
5.3.3.2	Matériaux de correction et calcul de la quantité requise	51
5.4	Autres points à préciser lors de l'étude préliminaire	56
5.5	Réutilisation des résidus de planage	56
Chapitre 6 Stabilisation : liants disponibles et formulation		59
6.1	Liant chimique : chlorure de calcium	59
6.2	Liant hydrocarboné	60
6.2.1	Définition et types d'émulsion	60
6.2.1.1.	Entreposage des émulsions	61
6.2.2	Bitume moussé	61
6.2.3	Autres liants et liants composites	62
6.3	Méthode de formulation	62
Chapitre 7 Déroulement des travaux de retraitement		63
7.1	Réunion de chantier	63
7.2	Attentions particulières à porter lors des travaux	64
Chapitre 8 Contrôle de la qualité		67
Bibliographie		69

TABLE DES ANNEXES**ANNEXE A**

Procédure de formulation	71
---------------------------------	----

ANNEXE B

Guide de contrôle de la qualité	97
--	----

ANNEXE C

Essais spéciaux	117
------------------------	-----

LISTE DES FIGURES**Figure 3.3-1**

Chambre de malaxage	8
----------------------------	---

Figure 3.3-2

Remplacement des dents	8
-------------------------------	---

Figure 3.3-3

Système d'épandage et de malaxage	8
--	---

Figure 3.3-4

Planage de la surépaisseur du revêtement à l'aide d'un planeur	9
---	---

Figure 3.3-5

Décohésionnement du revêtement et de la fondation – RACO 250	9
---	---

Figure 3.3-6

Décohésionnement du revêtement et de la fondation – CMI RS 500	9
---	---

Figure 3.3-7

Décohésionnement	10
-------------------------	----

Figure 3.3-8

Nivellement de la surface décohésionnée	10
--	----

Figure 3.3-9

Malaxage des granulats d'apport aux matériaux décohésionnés	10
--	----

Figure 3.3-10

Stabilisation précédée de la citerne de liants	11
---	----

Figure 3.3-11

Humification des matériaux stabilisés, compactage et nivellement	11
---	----

Figure 3.3-12

Pose du liant d'accrochage avant la pose du revêtement	11
---	----

Figure 4.1-1

Diagramme d'une étude de retraitement en place des chaussées	17
---	----

Figure 4.1-2

Arbre décisionnel	18
--------------------------	----

Figure 4.2-1

Carrelage	23
------------------	----

Figure 4.2-2

Carrelage dans le sentier des roues	23
--	----

Figure 4.2-3

Fissures transversales multiples	23
---	----

Figure 4.2-4	
Fissures transversales soulevées	24
Figure 4.2-5	
Fissure transversale ouverte (hiver)	24
Figure 4.2-6	
Fissure transversale (été)	24
Figure 4.2-7	
Flache	25
Figure 4.2-8	
Pelade	25
Figure 4.2-9	
Rapiécage	25
Figure 4.3-1	
Soulèvement au gel	26
Figure 4.3-2	
Comportement gélif : remblai-déblai	26
Figure 4.3-3	
Comportement différentiel au gel : présence d'une conduite	26
Figure 4.3-4	
Accotement étroit	27
Figure 4.3-5	
Tassement différentiel en bordure de la chaussée	27
Figure 4.3-6	
Tassement différentiel	27
Figure 5.2-1	
Étude préliminaire	40
Figure 5.2-1	
Mesure de l'épaisseur du revêtement : forage	45
Figure 5.2-2	
Réalisation d'un puits d'observation	46
Figure 5.3-1	
Étude préliminaire	48

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.2-1	
Avantages et inconvénients du retraitement en place	6
Tableau 3.3-1	
Matériel : Engins pour le décohesionnement de la chaussée	13
Tableau 4.4-1	
Applicabilité du retraitement en place	22
Tableau 5.1-1	
Épaisseur du revêtement bitumineux, option décohesionnement	31

Tableau 5.1-2	
Option décohesionnement + stabilisation épaisseur du revêtement bitumineux	32
Tableau 5.1-3	
Exemple, coûts des options	38
Tableau 5.2-1	
Étude préliminaire; méthodes d'échantillonnage	41
Tableau 5.2-2	
Analyse en laboratoire : fenêtre d'exploration	44
Tableau 5.3-1	
Exigences granulométriques	49
Tableau 5.3-2	
Granulométrie moyenne du b.b.c.	50
Tableau 5.3-3	
Épaisseur à corriger	52
Tableau 5.3-4	
Granulat de Correction	54

Chapitre 1

Introduction

L'entretien et la réhabilitation des chaussées sont des secteurs d'activité qui sont appelés à prendre de l'ampleur dans le futur. D'année en année, la répartition des budgets disponibles se complexifie compte tenu du nombre et du type d'intervention nécessaires pour réhabiliter un réseau de plus en plus sollicité.

L'épuisement des ressources, leur éloignement des chantiers et l'augmentation des coûts de transport sont également des facteurs qui compliquent la planification et la réalisation des travaux. Dans un tel contexte, il devient rentable et de plus en plus accepté dans la pratique de réutiliser les matériaux présents dans la chaussée en les retraitant et/ou en les bonifiant. Ainsi, depuis le début des années 80 en Amérique du Nord et en Europe, plusieurs techniques faisant intervenir le recyclage du béton bitumineux et du béton de ciment ont été mises au point. De nombreux progrès technologiques ont permis le développement de ces techniques et, par conséquent, leur utilisation accrue dans des cas de plus en plus variés. Les principales techniques de recyclage sont :

- le recyclage à froid des enrobés bitumineux (en place ou en centrale);
- le recyclage à chaud des enrobés bitumineux (en place ou en centrale);
- la thermoregénération;
- le recyclage du béton de ciment;
- le retraitement en place.

Mis à part quelques projets expérimentaux effectués dans les années précédentes, le MTQ a commencé à utiliser la technique de retraitement en place en 1989. Jusqu'à maintenant, plus de un million de mètres carrés de chaussées ont été retraités avec cette technique, ce qui a permis de réutiliser plus de 250 000 tonnes de résidus de béton bitumineux.

Ce document présente uniquement l'utilisation du retraitement en place comme technique de réhabilitation de chaussées. Il est important de noter que cette technique ne se substitue en rien à celles de réfection existante, mais s'ajoute plutôt à l'arsenal disponible pour la réhabilitation des chaussées.

Ce guide se veut avant tout un outil pour la préparation et la réalisation des projets. Principalement, ce guide a pour buts de :

- Donner une meilleure compréhension de la technique en précisant ses avantages et ses limites.
- Préciser la démarche permettant d'opter pour cette technique.
- Décrire les études préliminaires nécessaires avant la réalisation des travaux en chantier.
- Présenter les principaux liants utilisés pour la stabilisation des matériaux et donner la méthode de formulation en laboratoire.
- Fournir les éléments permettant de faire un dimensionnement structural.
- Apporter une assistance lors de la mise en oeuvre.
- Donner une procédure permettant d'effectuer le contrôle de la qualité lors des travaux.

Chapitre 2

Références

Le présent guide renvoie à l'édition suivante ou la plus récente des documents suivants :

Normes:

Bureau de normalisation du Québec

- NQ 2300-040 : M.B. – Détermination de la densité brute de M.B. compactés
- NQ 2300-100 : Mélanges bitumineux – Détermination de la teneur en bitume
- NQ 2300-110 : M.B. – Détermination de la masse du filler dans le produit de l'extraction
- NQ 2300-350 : M.B. – Analyse granulométrique des granulats
- NQ 2501-090 : Sol – Détermination de la limite de liquidité à l'aide de l'appareil de Casagrande et de la limite de plasticité
- NQ 2501-092 : Sol – Détermination de la limite de liquidité à l'aide du pénétromètre à cône suédois et de la limite de plasticité.
- NQ 2560-010 : Granulats – Échantillonnage
- NQ 2560-015 : Granulats – Réduction des échantillons pour essais en laboratoire
- NQ 2560-040 : Granulats – Analyse granulométrique par tamisage
- NQ 2560-070 : Granulats – Détermination du coefficient d'usure par attrition à l'aide de l'appareil Micro-Deval
- NQ 2560-200 : Granulats – Détermination par séchage de la teneur en eau
- NQ 2560-255 : Granulats – Essai au bleu de méthylène
- NQ 2560-350 : Granulats – Détermination par lavage de la quantité de particules passant pas tamis de 80 µm

Ministère des Transports du Québec

Tome I – Conception routière

Tome II – Construction routière – Chapitre 2 «Structures de chaussée»

Norme française

- NFP 98-117 : Assises de chaussées – Graves pouzzolanes – chaux

Documents:

AASHTO guide for Design of pavement structures, (1993).

Cahier des charges et devis généraux (C.C.D.G.), Les Publications du Québec.

Gouvernement du Québec, (1993), Manuel d'identification des dégradations des chaussées flexibles, Edm. Québec.

Gouvernement du Québec, (1989), Sols et Granulats, guide de contrôle technique, Les Publications du Québec.

Guide de conception et de réhabilitation des chaussées souples, 1997 (à venir), Les publications du Québec

Devis type «Retraitement en place des chaussées» D-1199.

Chapitre 3

Généralités

3.1 Définition

Le retraitement en place des chaussées est aussi connu sous l'appellation décohéssionnement-stabilisation et parfois pulvérisation-stabilisation, lorsqu'il y a stabilisation des matériaux.

Le procédé consiste, dans un premier temps, à concasser le revêtement bitumineux sur toute son épaisseur ainsi qu'une partie de la fondation granulaire sous-jacente. Une fois homogénéisé, le matériau décohéssionné est nivelé et densifié pour former une nouvelle fondation. La deuxième étape consiste à stabiliser le matériau à l'aide d'un liant sur une épaisseur définie, généralement comprise entre 100 et 150 mm. Cette dernière étape est facultative et la méthode peut se combiner avec les modes de réfection traditionnels. La pose d'un revêtement bitumineux complète le procédé.

En chantier, le retraitement en place implique une fréquence d'opérations précise, lesquelles sont brièvement décrites ci-dessous.

- 1) *Décohéssionnement de la chaussée* : Les appareils disponibles au Québec (voir section 3.3), permettent le décohéssionnement sur une profondeur maximale d'environ 300 mm. Pendant cette étape, sont effectués des travaux de contrôle visant à évaluer la conformité des matériaux ainsi produits, (voir annexe B).
- 2) *Reprofilage et compactage sommaire* : Lors de cette étape, la mise en forme de la chaussée et le compactage des matériaux sont effectués. Cette étape permet le maintien de la circulation pendant les travaux.
- 3) *Correction granulaire* : Apport de granulats conventionnels ayant les caractéristiques et dimensions spécifiques afin de corriger la granulométrie du matériau résultant du décohéssionnement de la chaussée.
- 4) *Nivelage et reprofilage de la chaussée* : À l'aide d'une niveleuse, les matériaux sont répartis uniformément et le profil existant est recorrecté si nécessaire.
- 5) *Compactage* : Le compactage est effectué généralement en deux phases, la première à l'aide de compacteurs pneumatiques et la seconde avec des compacteurs à cylindres d'acier, statique ou dynamique. La compacité maximale est évaluée par des essais en laboratoire et/ou par la réalisation de planches d'essais sur le chantier.
- 6) *Stabilisation* : Cette étape s'effectue lors d'un deuxième passage. Le matériau est stabilisé à l'aide d'un liant hydrocarboné ou chimique, sur une épaisseur comprise entre 100 et 150 mm. La quantité de liant ajoutée fait suite à une étude de formulation en laboratoire. Une période de cure, dont la durée varie de 1 à 7 jours, est requise avant la pose du revêtement.
- 7) *Compactage final* : La procédure est identique à celle suivie lors du premier compactage.
- 8) *Pose du revêtement bitumineux* : L'épaisseur du revêtement est fonction du trafic prévu. À la suite du retraitement en place de la chaussée, l'épaisseur minimale du revêtement est de 50 mm.

3.2 Avantages et inconvénients

Les principaux avantages et inconvénients reliés à l'utilisation du retraitement en place peuvent se résumer comme suit :

Tableau 3.2-1

Avantages et inconvénients du retraitement en place

Avantages	Inconvénients
– Économie des ressources naturelles – Diminution des rebuts – Élimination du patron de fissures et homogénéisation des matériaux	– Stabilisation : période de cure requise – Stabilisation : conditions climatiques favorables requises – Méconnaissance du comportement à long terme des matériaux recyclés

Avantages

- La réutilisation des matériaux en place permet, d'une part, une économie des ressources naturelles non renouvelables qui sont de plus en plus rares à proximité des grands centres. Elle permet aussi de réduire les quantités de rebuts bitumineux dont on doit disposer dans des sites adéquats. Il y a réduction du transport par camions lors des travaux, ce qui diminue la fatigue du réseau routier adjacent au chantier et les impacts indirects sur le milieu.
- Le décohesionnement de la chaussée sur une profondeur de 300 mm permet une homogénéisation des matériaux et l'élimination de fissures présentes dans le revêtement et dans la partie supérieure de la fondation.
- La correction des profils longitudinaux et transversaux est possible après le décohesionnement de la chaussée.
- La réutilisation des matériaux en place permet de limiter le rehaussement du profil de la chaussée, un aspect important en milieu urbain. Le rehaussement final sera fonction de l'épaisseur d'enrobé enlevée par planage, du foisonnement du matériau décohesionné, de la quantité de granulats d'apport requis et bien sûr de l'épaisseur du nouveau revêtement.
- Par rapport à la reconstruction de la chaussée, la technique de retraitement en place est plus rapide. À titre indicatif, notons que la vitesse à laquelle les travaux sont effectués dépend de plusieurs facteurs dont : l'épaisseur et la nature du revêtement bitumineux en place, la profondeur de décohesionnement, le type d'engin utilisé et les retards reliés au trafic.

Inconvénients

- L'utilisation de cette technique tard en automne n'est pas recommandée, la période estivale étant la plus propice.
- Le contrôle de la teneur en eau peut s'avérer un problème dans le contexte climatique québécois. Ceci a des effets néfastes sur le comportement de la chaussée à court et long terme et peut contribuer à diminuer l'efficacité de la stabilisation des matériaux.

- À la suite de la stabilisation des matériaux décohesionnés, une période de cure est requise. Pendant cette période, le matériau est plus sensible aux effets du trafic et des intempéries et peut se dégrader de façon excessive. Ainsi, pendant la période de cure dont la durée est généralement inférieure à 7 jours (fonction du type de liant utilisé et des conditions climatiques) certaines précautions doivent être prises concernant la circulation ayant accès au chantier.
- L'utilisation de la technique de retraitement en place est assez récente, de sorte que l'évolution des propriétés à long terme des matériaux décohesionnés et stabilisés est peu connue. De plus, les matériaux que l'on retrouve dans une chaussée ancienne sont souvent de qualité variable, ce qui se traduit par une certaine hétérogénéité du matériau décohesionné. Ces points entraînent une certaine imprécision en ce qui concerne le dimensionnement de chaussées.
- En raison de la variabilité des matériaux rencontrés dans les chaussées, des études préliminaires adaptées à ce type de travaux sont essentielles. De plus, lors de la mise en oeuvre, une procédure de contrôle particulière doit être suivie afin d'assurer la qualité des travaux.

3.3 Matériel

Pour effectuer les travaux de retraitement en place, on utilise plusieurs types d'engins selon la nature des travaux. Dans cette section, on y décrit les principales caractéristiques des machines utilisées et leur utilisation lors des différentes étapes en chantier.

3.3.1 Engins utilisés pour le retraitement en place

Au Québec, cinq types de machines sont utilisées aussi bien pour le décohesionnement de la chaussée que pour la stabilisation des matériaux. De façon générale, ces machines sont munies d'une chambre de malaxage contenant un rotor et un système d'ajout du liant. Ces machines diffèrent principalement par leur puissance, leur manoeuvrabilité et leur productivité. Le tableau 3.3-1 résume les différentes caractéristiques de ces appareils.

Les composantes principales de la chambre de malaxage (figure 3.3-1) sont décrites ci-dessous :

- *Portes avant et arrière* : Ajustement permettant de maintenir un volume de matériaux suffisant dans la chambre selon l'épaisseur de malaxage et la vitesse d'avancement.
- *Barre de concassage* : Permet le concassage des particules de trop grandes dimensions (CAT RR250).
- *Rotor* : Muni de dents de forme conique ou de couteaux interchangeables (figure 3.3-2) permettant de concasser le revêtement et une partie de la fondation. Sert également à malaxer les matériaux décohesionnés avec le liant. Dans la plupart des cas, la rotation du rotor permet de projeter les particules vers le haut (upcut). En chantier, la vérification de l'usure des dents s'effectue généralement à chaque heure. Le remplacement des dents (1 min/dent) se fait progressivement à chaque inspection.
- *Système d'ajout du liant* : Composé d'un tube et de plusieurs jets interchangeables permettant l'épandage du liant dans la chambre de malaxage (figure 3.3-3).

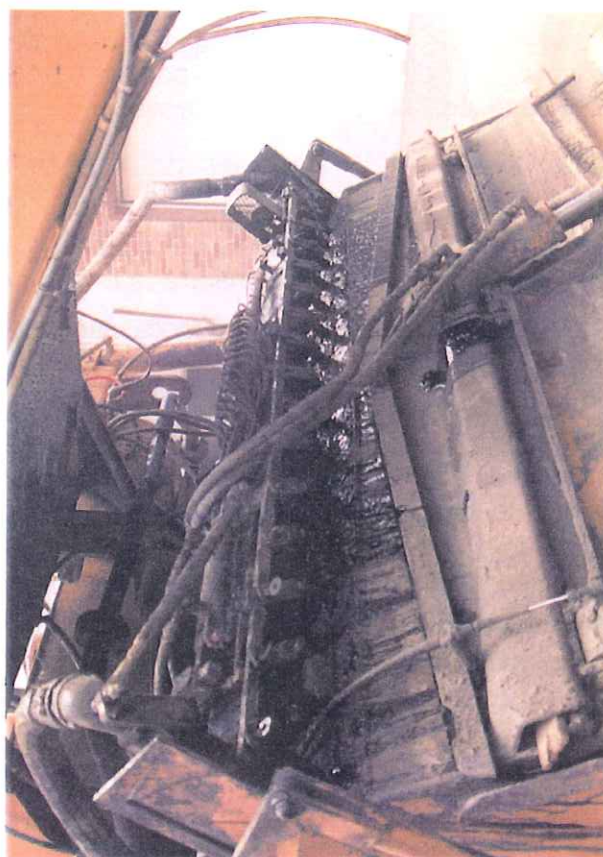
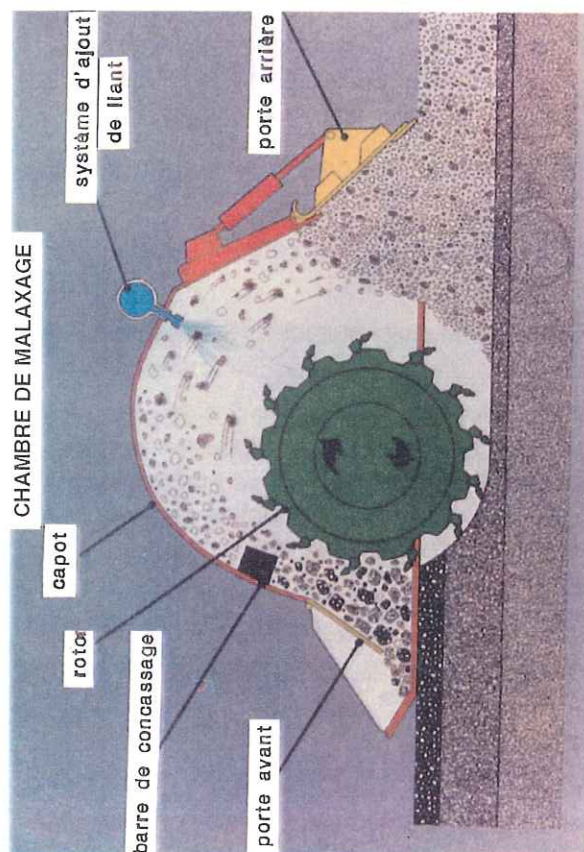


3.3-1	3.3-2
3.3-3	

Figure 3.3-1 Chambre de malaxage

Figure 3.3-2 Remplacement des dents

Figure 3.3-3 Système d'épandage et de malaxage





3.3-4	3.3-5
3.3-6	

Figure 3.3-4 Planage de la surépaisseur du revêtement à l'aide d'un planeur

Figure 3.3-5 Décohesionnement du revêtement et de la fondation – RACO 250

Figure 3.3-6 Décohesionnement du revêtement et de la fondation – CMI RS 500



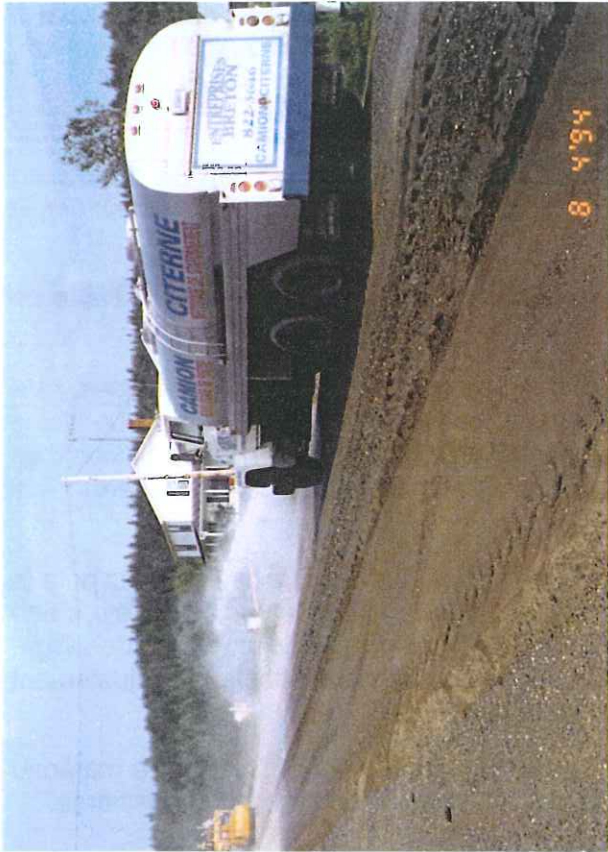
3.3-7	3.3-8
3.3-9	

Figure 3.3-7 Décohesionnement

Figure 3.3-8 Nivellement de la surface décohesionnée

Figure 3.3-9 Malaxage des granulats d'apport aux matériaux décohesionnés





3.3-10	3.3-11
3.3-12	

Figure 3.3-10 Stabilisation précédée de la citerne de liants

Figure 3.3-11 Humidification des matériaux stabilisés, compactage et nivellement

Figure 3.3-12 Pose du liant d'accrochage avant la pose du revêtement

Avant le décohéssionnement de la chaussée, l'épaisseur du revêtement doit être inférieure à 125 mm. L'enlèvement de la surépaisseur est habituellement réalisé à l'aide d'une planeuse conventionnelle ou à grand rendement (figure 3.3-4).

Le décohéssionnement de la chaussée est réalisé avec les engins indiqués au tableau 3.3-1. Les figures 3.3-5, 6 et 7 représentent respectivement les engins RACO-250, CMI RS-500 et CAT RR-250 en action. Habituellement, plusieurs passes (travées) sont requises (environ 3) pour décohéssionner la chaussée sur toute la largeur de la plate-forme.

À la suite du décohéssionnement, le matériau est nivelé (figure 3.3-8) et densifié à l'aide de rouleaux pneumatiques et d'acier.

Dans le cas où le matériau décohéssionné ne répond pas aux exigences granulométriques, l'apport de matériaux neufs est requis. Dans un premier temps, on épand le granulat à l'aide d'une niveleuse (quantité prédéterminée) et par la suite, on le mélange avec le matériau en place à l'aide d'un équipement utilisé pour le décohéssionnement (figure 3.3-9). Le matériau corrigé est également nivelé et densifié.

Les engins utilisés pour la stabilisation sont habituellement les mêmes que ceux utilisés pour le décohéssionnement. Ils sont munis d'un système d'ajout de liant composé d'un raccord, d'un filtre, d'une pompe et d'une barre d'épandage. Ce système est relié à une citerne montée sur une remorque (figure 3.3-10). Également, ces engins doivent être munis de systèmes automatisés servant à l'ajustement de la profondeur de malaxage et au contrôle des quantités de liant.

Après la stabilisation, le matériau est nivelé et densifié (figures 3.3-10 et 3.3-11). Ce matériau peut être humidifié notamment lors de la période de cure afin de limiter la présence de poussières.

Finalement, la pose du revêtement complète le procédé. Dans certains cas, la pose d'une couche d'accrochage (figure 3.3-12) peut être nécessaire pour assurer un bon collage du revêtement.

Tableau 3.3-1

Matériel : Engins pour le décohéssionnement de la chaussée

ENGINS UTILISÉS POUR LE RETRAITEMENT EN PLACE DES CHAUSSEES

CARACTÉRISTIQUES	BOMAG MPH-100	CATERPILLAR RR-250	CMI RS-400	CMI RS-500
Fiches techniques				
– Puissance (HP)	345	335	425	525
– Productivité théorique* (m ² /h)	1 649	1 783	2 318	2 909
– Largeur de décohéssionnement (mm)	2 005	2 438	2 438	2 438
– Profondeur maximale de malaxage (mm)	355	330	n.d.	406
– Rotor - type et nombre de dents	70 couteaux 167 coniques	188 coniques	n.d.	220 coniques
– Durée des dents (h)	8			6
Productivité observée en chantier**				
– Décohéssionnement (ratio 50 % gr./50 % g.b.c.)				
– épaisseur du revêtement (mm)	100	–	n.d.	100
– profondeur du décohéssionnement (mm)	200	200	n.d.	200
– productivité (m ² /h)	350-500	400 - 600	n.d.	700-1100
– Stabilisation				
– productivité (m ² /h)	750 - 1 000	750 - 1 000	n.d.	1 000
– épaisseur (mm)	100	115		100

Notes : * Ces valeurs sont similaires au rendement observé lors du malaxage de granulats d'apport à des matériaux décohéssionnés et ce, sur une profondeur de l'ordre de 200 mm.

** Les productivités citées sont celles observées en milieu rural et sont présentées qu'à titre indicatif. En milieu urbain, le déroulement des travaux est généralement plus lent.
n.d. Donnée non disponible

Chapitre 4

Champs d'application du retraitement en place

La technique de retraitement en place n'est pas adaptée à tous les types de routes et de dégradations. Tel que le montre la figure 4.1-1, l'utilisation de la technique de retraitement en place doit faire suite à des travaux d'expertise visant à préciser en quoi la technique est adaptée aux problèmes décelés.

4.1 Travaux d'expertise

Dans la plupart des cas, les sommes investies pour la remise en état d'une chaussée justifient largement la réalisation d'une étude de réfection complète. Ces études ont pour but de déterminer la ou les causes du mauvais comportement de la chaussée pour ensuite mieux orienter le concepteur parmi toutes les techniques de réfection disponibles pour la remise en état de la chaussée. Tout d'abord, l'analyse des données fournies par l'inventaire structural sur le réseau s'avère utile pour établir des priorités pour l'entretien et la réhabilitation. Ces données ne suffisent généralement pas à la détermination des causes du mauvais comportement au stade du projet ni à déterminer les modes de réfection appropriés. Une étude détaillée s'impose.

Les études de réfection comprennent trois étapes distinctes, soit :

- l'auscultation de la chaussée;
- la détermination des causes des problèmes décelés;
- le choix des solutions.

Lors d'une étude complète, l'auscultation de la chaussée comprend généralement quatre types de travaux, soit :

- la réalisation des sondages;
- la mesure de la qualité de roulement;
- la mesure de la capacité structurale;
- la réalisation de relevés visuels détaillés.

Les objectifs ainsi que les procédures propres à chacun de ces relevés sont décrits dans le guide intitulé « *Guide de conception et de réhabilitation des chaussées souples* ».

L'utilisation de la méthode de retraitement en place est envisagée après le diagnostic donnant la ou les causes du mauvais comportement de la chaussée. Compte tenu que le retraitement de la chaussée s'effectue généralement sur une profondeur maximale de 300 mm, la technique s'avère appropriée lorsque les dégradations affectant le comportement de la chaussée proviennent de la partie supérieure de la chaussée.

Processus décisionnel

Afin d'apprécier le potentiel d'utilisation de la technique pour un secteur donné, un processus décisionnel est proposé sous forme schématique à la figure 4.1-2. Les paragraphes qui suivent apportent quelques précisions sur l'utilisation de l'arbre de décision.

L'analyse s'effectue en regroupant les secteurs ayant des caractéristiques communes en ce qui a trait à la portance, aux types de fissures et à la qualité de roulement. Ainsi, on peut évaluer le potentiel d'utilisation de la technique selon la présence (o) ou l'absence de certains phénomènes ou types de dégradations pour un secteur homogène. Le comportement d'une chaussée est complexe et, dans certains cas, hétérogène. Ainsi l'aptitude du retraitement en place à résoudre les problèmes relevés sont variables d'un secteur à l'autre et peut nécessiter la réalisation de travaux complémentaires. À cet égard, les données concernant l'efficacité du drainage (D), les résultats des sondages (S) et la mesure des ornières (O) sont d'une grande utilité pour préciser la nature des problèmes et pour mieux évaluer le type et l'envergure des travaux complémentaires requis.

Qualité de roulement (ΔP)

Tel qu'il est montré à la figure 4.1-2, la différence de la qualité de roulement (ΔP) entre la période estivale et la période hivernale s'avère une donnée essentielle pour une première évaluation du comportement gélif d'un secteur. Un écart supérieur à 2.0 ($IRI_{HIVER} - IRI_{ÉTÉ}$), la présence de soulèvements (S.D.) ou de tassements différentiels (T.D.) sur le secteur analysé indiquent généralement un mauvais comportement des sols de support. Lorsque l'écart $IRI_{HIVER-ÉTÉ}$ est supérieur à 4.0, le problème est relié au gel et devrait être décelé lors du relevé visuel. Par conséquent, la technique de retraitement en place n'est généralement pas recommandée dans ces secteurs, à moins qu'elle ne soit combinée à un autre type de travaux adapté au problème. Par exemple, en présence d'un problème de gel ponctuel, la technique peut être retenue en autant que ce court secteur fasse l'objet d'une reconstruction et/ou de la réalisation des transitions appropriées.

Fissures ouvertes (F.O.)

La présence de fissures ouvertes (F.O.) et/ou de fissures transversales soulevées (F.T.S.) constituent également des indicateurs quant au comportement hivernal de la chaussée. Les fissures longitudinales ou les lézardes ouvertes, en période hivernale, proviennent généralement du comportement des sols d'infrastructure ou du moins d'un problème relié au gel qui affecte l'ensemble de la chaussée et non uniquement la partie supérieure. Dans un tel cas, la technique est peu adaptée puisqu'elle est inapte à éliminer ce type de dégradations. Par contre, les fissures transversales soulevées qui sont observées pendant la période hivernale peuvent provenir d'un comportement de la partie supérieure de la chaussée. L'infiltration d'eau et de saumure par les fissures transversales (retrait thermique de l'enrobé) modifie les propriétés mécaniques et le comportement au gel des matériaux de fondation. Ainsi, le potentiel d'utilisation de la technique varie non seulement selon la présence ou l'absence de fissures ouvertes, mais également selon le type de fissures.

Portance (P.F.)

En ce qui concerne les secteurs affectés par une portance faible (P.F.), la méthode demeure applicable; cependant la cause exacte de cette faiblesse doit être précisée par des sondages. Dans le cas où la faible portance est reliée à la nature de l'infrastructure et/ou à la faible épaisseur de la fondation, le potentiel d'utilisation de la technique est plutôt faible; les travaux complémentaires et les surépaisseurs (fondation, revêtement) requis sont importants et coûteux. De plus, dans un tel cas, le rehaussement important du profil est inévitable, ce qui peut s'avérer problématique voire impossible dans certains secteurs. Lorsqu'un secteur affiche une portance faible causée par la faible épaisseur et/ou l'état de dégradation avancé du revêtement (ex. : carrelage sévère), le retraitement en place est plus adapté puisque la cause de cette faiblesse se situe en surface de la chaussée.

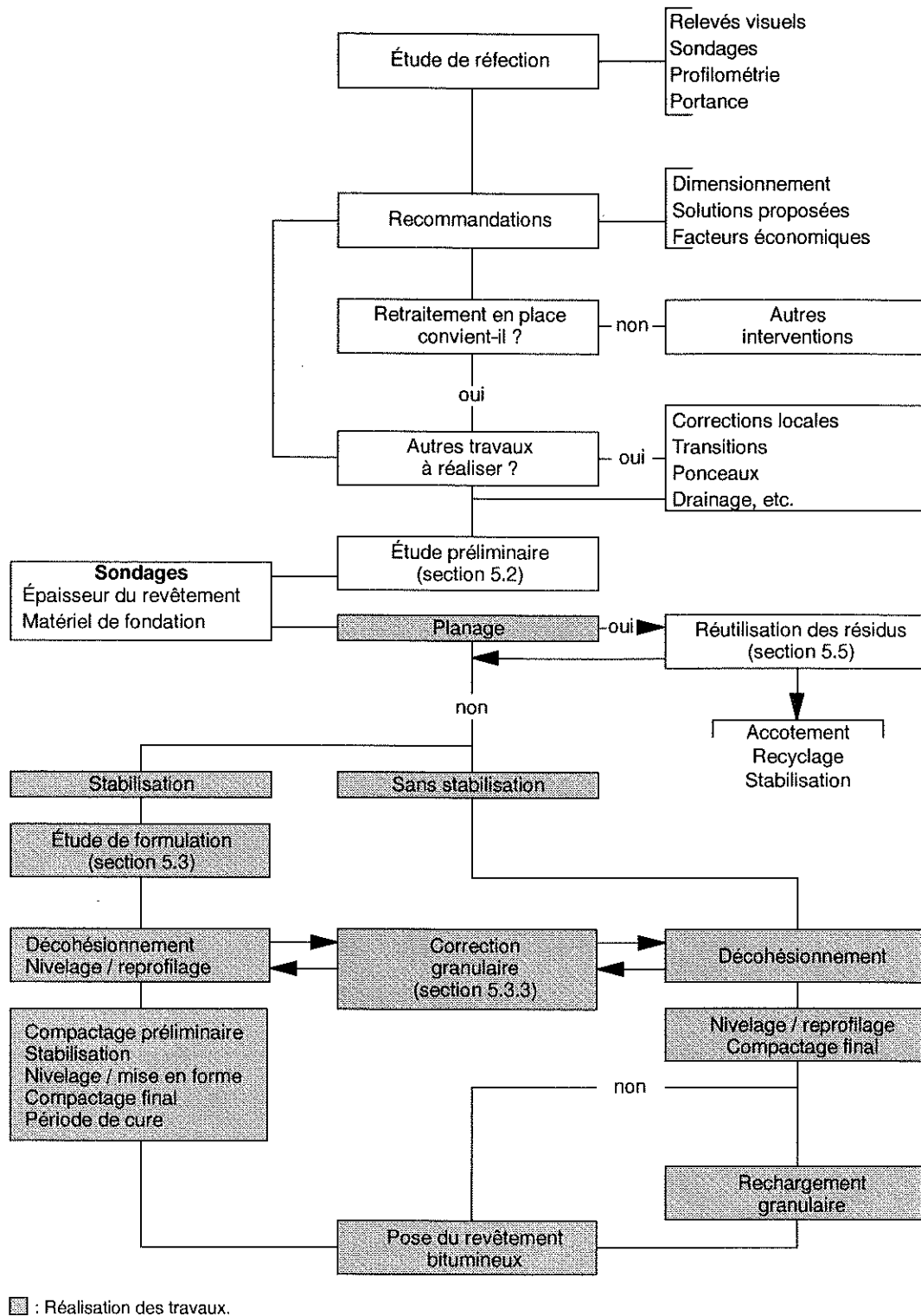


FIGURE 4.1-1 : Diagramme d'une étude de retraitement en place des chaussées

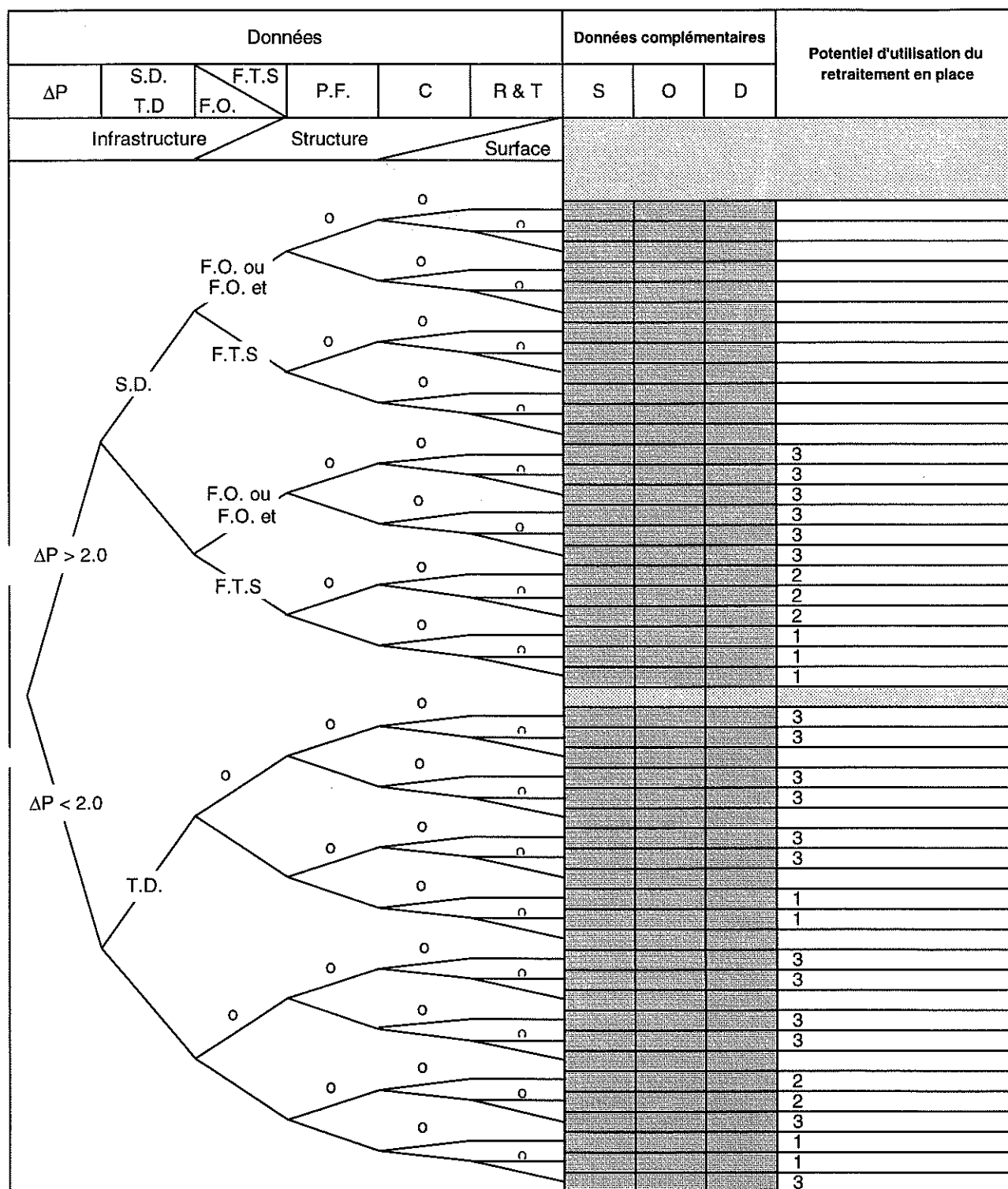


Figure : 4.1-2 : Arbre décisionnel

Légende : voir page suivante.

Légende

Potentiel d'utilisation du retraitement en place

- 1 —> Solution adéquate
- 2 —> Solution partielle, travaux complémentaires requis
- 3 —> Généralement non recommandable, requiert une étude plus détaillée

Sondages : (S)

- A —> Structure de chaussée conforme
- B —> Structure de chaussée non conforme (épaisseur et matériaux)
- C —> Structure de chaussée inadéquate

Ornières : (O)**

- A —> < 10 mm
- B —> 10-20 mm
- C —> > 20 mm

Obstruction au drainage : (D)**

- A —> Faible
- B —> Moyen
- C —> Majeur

** : voir Manuel d'identification des dégradations de chaussées

Données :

- ΔP : différence de profilométrie
- S.D : soulèvement différentiel
- T.D : tassement différentiel
- F.O : fissuration ouverte
- F.T.S : fissuration transversale soulevée
- P.F : portance faible
- C : carrelage
- R & T : rapiéçage et trous

Les points cités ci-dessus mettent en lumière l'importance d'effectuer avec minutie un relevé visuel détaillé des secteurs sous étude en utilisant les termes exacts et en effectuant des mesures précises (ornières, ouvertures des fissures), afin de faire un diagnostic le plus juste possible. L'analyse des données doit permettre de localiser la cause du mauvais comportement. À ce sujet, le guide portant sur l'évaluation, le diagnostic et la réhabilitation des chaussées (MTQ) décrit les principes d'analyse et la démarche à suivre.

À ce stade-ci de l'étude, bien qu'il est difficile de préciser les travaux complémentaires requis, le concepteur peut évaluer globalement la faisabilité du retraitement en place en estimant pour le tronçon sous étude la proportion de secteurs où la technique est adaptée. Si la technique est retenue, un dimensionnement considérant les critères structuraux et de protection contre les effets du gel doit être réalisé.

4.2 Cas favorables à l'utilisation du retraitement en place

En résumant la figure 4.1-2 et en considérant l'état des connaissances actuelles, la technique de retraitement en place est une solution adaptée dans les cas suivants :

Cas favorables à l'utilisation du retraitement en place

- Secteurs jugés non gélifs
- Dégradations reliées au comportement de la partie supérieure de la chaussée
 - Carrelage de sévérité moyenne à majeure
 - Fissures transversales de sévérité moyenne
 - Flaches de sévérité faible à majeure
 - Nids-de-poule de sévérité moyenne à majeure
 - Léger renforcement requis
 - Pelades de sévérité moyenne à majeure
- Secteurs jugés non gélifs : les secteurs sont caractérisés par l'absence de soulèvements différentiels ou de déformations hivernales. La différence de qualité de roulement été-hiver est négligeable et les fissures y sont généralement peu ouvertes.
- Secteurs affectés par des dégradations associées à un mauvais comportement de la partie supérieure de la chaussée ou à la fatigue du revêtement. Le phénomène se traduit généralement par la présence des types de dégradations suivants :
 - Carrelage de sévérité moyenne à majeure :
 - généralisé sur toute la largeur des voies (figure 4.2-1);
 - localisé dans les pistes de roues généralement accompagnées d'ornières simples (figure 4.2-2).
 - Fissures transversales de sévérité moyenne :
 - fissures multiples accompagnées d'un léger affaissement et parfois d'arrachement dans le sentier des roues. Ces fissures diminuent la qualité de roulement de façon notable (figure 4.2-3);
 - fissures soulevées pendant la période hivernale. Des observations ont permis de préciser que plus le soulèvement de part et d'autre de la fissure se produit sur une courte distance, plus ce dernier provient des couches situées près de la surface (voir figure 4.2-4). À titre indicatif, lorsque le soulèvement se produit sur une distance supérieure à un mètre (1,0 m) de part et d'autre de la

fissure, la cause de ce soulèvement se situe généralement au niveau de la fondation. Une attention particulière doit être apportée lors des relevés afin de déceler la présence de fissures transversales dont l'ouverture est supérieure à 20 mm et se prolongeant dans l'accotement gravelé (figures 4.2-5 et 6). Le soulèvement de ces fissures est plutôt occasionné par un problème de gel des sols de support. Dans un tel cas, la technique de retraitement en place s'avère inefficace.

- Flaches de sévérité faible à majeure (figure 4.2-7).

Ce type de dégradation peut être causé par la piètre qualité et l'hétérogénéité des matériaux de fondation. Dans un tel cas, il est important de délimiter les secteurs dégradés et d'évaluer la qualité des matériaux de fondation, pour préciser la faisabilité de la technique.

- Pelades de sévérité moyenne à majeure (figure 4.2-8) :

Ces dégradations sont causées par un défaut du revêtement, plus particulièrement au mauvais collage de la couche d'enrobé de surface. La technique de retraitement en place s'applique, mais lorsqu'il y a uniquement des pelades, des techniques de réfection dites de surface telles que le planage, le recyclage en place de l'enrobé, etc., doivent être considérées.

- Nids-de-poule de sévérité moyenne à majeure :

Ce type de dégradation est généralement accompagné de rapiécages manuels ou mécanisés (figure 4.2-9), ce qui a pour conséquence de faire varier localement l'épaisseur du revêtement. Ce point doit être précisé lors de l'étude préliminaire afin de porter un meilleur jugement sur la faisabilité de la technique (voir section 5.2).

- Secteurs ne nécessitant qu'un léger renforcement :

La cause exacte de la faiblesse structurale doit être déterminée et considérée lors du dimensionnement.

4.3 Cas défavorables à l'utilisation du retraitement en place

Tel qu'elle est citée précédemment, la technique de retraitement en place a un potentiel d'utilisation relativement élevé lorsque l'on considère le fait qu'elle peut être utilisée avec d'autres techniques de réfection. Cependant, il existe certains cas où le retraitement de la chaussée s'avère inadapté :

Cas défavorables à l'utilisation du retraitement en place

- Phénomènes liés au gel
 - passage remblai-déblai, contacts sol-roc
 - mauvais comportement hivernal et printanier au droit des traverses, utilités publiques et ponceaux
 - fissures de centre et lézardes ouvertes
- Dégradations liées à l'instabilité du corps de la chaussée
 - géométrie transversale non conforme
 - tassements différentiels

- Secteurs affectés par des phénomènes liés au gel :

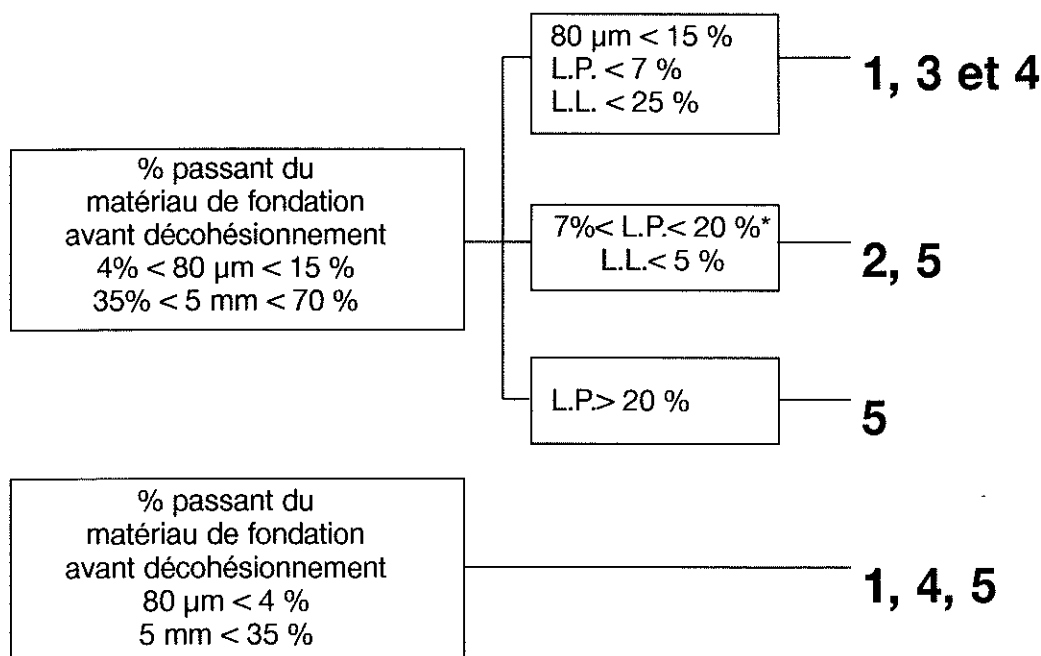
- Mauvais comportement hivernal de la chaussée à proximité d'un passage remblai-déblai (transversal ou longitudinal) et de contacts sol-roc (figures 4.3-1 et 2).

- Secteur dont la qualité de roulement $IRI_{HIVER} - IRI_{ÉTÉ}$ est supérieure à 2.0 en présence de fissures de centre et de lézardes ouvertes en période hivernale.
- Secteur affichant un mauvais comportement hivernal et printanier à proximité de ponceaux et de toutes autres traverses (conduites) et utilités publiques présentes sous la chaussée. Ce dernier cas est plus fréquent en milieu urbain; il est attribuable dans plusieurs cas à des transitions inadéquates ou inexistantes (figure 4.3-3).
- Secteurs affectés par des dégradations reliées à l'instabilité du corps de la chaussée :
 - Secteur dont la géométrie transversale est non conforme, dont les pentes des talus sont trop abruptes en présence d'accotements étroits (figure 4.3-4).
 - Secteur affecté par des tassements différentiels (déformations permanentes) reliés à des variations de la structure de chaussée et/ou à la nature des sols supports (figures 4.3-5 et 6).

4.4 Limites de la technique

Les résultats de l'étude préliminaire permettent de préciser si la technique peut être retenue ou s'il est nécessaire d'envisager des mesures correctives. Le tableau 4.4-1 précise l'applicabilité de la technique ainsi que des options de retraitement en place de la chaussée.

Tableau 4.4-1
Applicabilité du retraitement en place



* : Les résultats de l'essai au bleu de méthylène doivent être considérés. La stabilisation avec liant mixte tel que ciment ou chaux + liant hydrocarboné (voir ch. 6) peut être envisagée.

- 1 – décohesionnement + revêtement bitumineux,
- 2 – décohesionnement + stabilisation $CaCl_2$ + revêtement bitumineux,
- 3 – décohesionnement + stabilisation liant hydrocarboné + revêtement bitumineux,
- 4 – décohesionnement + rechargement granulaire + revêtement bitumineux,
- 5 – autres méthodes de réhabilitation.



4.2-1	4.2-2
4.2-3	

Figure 4.2-1 Carrelage

Figure 4.2-2 Carrelage dans le sentier des roues

Figure 4.2-3 Fissures transversales multiples





4.2-6	4.2-5
4.2-4	

Figure 4.2-4 Fissures transversales soulevées

Figure 4.2-5 Fissure transversale ouverte (hiver)

Figure 4.2-6 Fissure transversale (été)





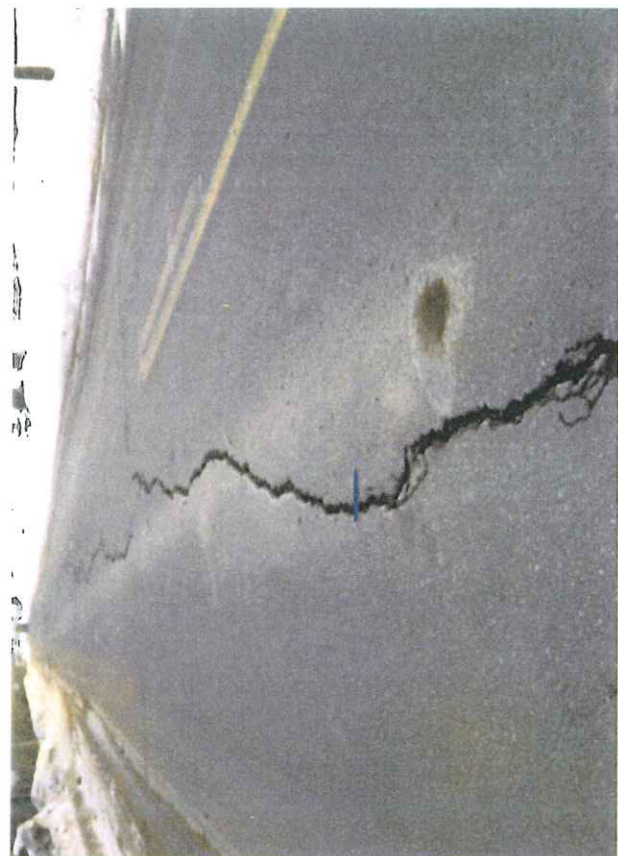
4.2-7	4.2-8
4.2-9	

Figure 4.2-7 Flache

Figure 4.2-8 Pelade

Figure 4.2-9 Rapiécage





4.3.1	4.3-2
4.3-3	

Figure 4.3-1 Soulèvement au gel

Figure 4.3-2 Comportement gélif: remblai - déblai

Figure 4.3-3 Comportement différentiel au gel: présence d'une conduite





4.3-4	4.3-5
4.3-6	

Figure 4.3-4 Accotement étroit

Figure 4.3-5 Tassement différentiel en bordure de la chaussée

Figure 4.3-6 Tassement différentiel



Les équipements disponibles et les connaissances concernant le comportement des matériaux limitent l'utilisation de la méthode aux cas particuliers suivants :

– **Secteurs dont le revêtement a une épaisseur inférieure à 125 mm :**

Cette restriction implique le planage de l'ancienne chaussée où l'épaisseur du revêtement est supérieur, à 125 mm, ce qui rend la méthode plus coûteuse. La méthode pour délimiter les secteurs en surépaisseur est précisée à la section 5.3.

– **Secteurs dont les matériaux de fondation ont un diamètre maximal (D_{max}) inférieur à 40 mm :**

Dans le cas contraire, l'utilisation de la méthode demeure possible, mais entraîne généralement une augmentation des coûts d'entretien des équipements. La présence de tels matériaux dans la fondation doit être signalée dans l'étude préliminaire.

– **Secteurs dont les matériaux de fondation ont une granulométrie étalée contenant moins de 15 % de particules fines ($< 80 \mu m$) :**

Dans le cas contraire, l'utilisation de la méthode demeure possible à condition que des ajouts granulaires ou autres corrections soient apportés après le décohesionnement, afin que le matériau résultant rencontre les exigences granulométriques prescrites au devis D-1199. L'estimation de la quantité de granulats d'apport est décrite à la section 5.3.3. L'utilisation de certains types de liants (en développement) permet d'atténuer les effets néfastes d'une trop grande proportion de fines.

Chapitre 5

Dimensionnement et préparation d'un projet

Ce chapitre traite, en premier lieu, de notions générales concernant les principes et les hypothèses utilisés pour le dimensionnement de la chaussée. Une approche permettant de comparer des structures équivalentes et aidant du même coup le concepteur à choisir l'option la mieux adaptée est également exposée. Les travaux reliés aux études préliminaires de même qu'une analyse de ces résultats sont présentés aux sections 5.2 et 5.3. Enfin, la préparation d'un projet de retraitement en place implique la vérification de certains points et la planification de quelques travaux. Ces points sont précisés à la dernière section de ce chapitre. Lors de la préparation d'un projet, il est obligatoire de suivre la démarche décrite dans ce chapitre.

5.1 Dimensionnement de chaussées

Lorsque les résultats d'une étude de réfection indiquent que la technique de retraitement en place est une solution appropriée, le concepteur doit choisir l'option la mieux adaptée ainsi que l'épaisseur d'enrobé requis pour le revêtement. Les interventions possibles à la suite du décohesionnement de la chaussée sont nombreuses et peuvent se résumer comme suit :

décohesionnement + revêtement bitumineux,
décohesionnement + stabilisation (100 à 150 mm) + revêtement bitumineux,
décohesionnement + rechargement granulaire + revêtement bitumineux,
décohesionnement + rechargement granulaire traité + revêtement bitumineux.

Ces options ont chacune des particularités en ce qui a trait à leur faisabilité, leur performance à court et long terme et leurs coûts. Le choix final de l'option doit faire suite à un dimensionnement adapté aux conditions particulières du site étudié.

Ce dimensionnement s'effectue sur deux volets, soit l'approche structurale et la protection contre les effets du gel. Dans l'optique d'apporter une solution à long terme aux problèmes découverts, l'option choisie doit satisfaire ces deux critères. Dans le premier cas, les propriétés des matériaux en place et du sol support de même que le trafic sont considérés. La protection contre le gel est précisée en évaluant une épaisseur requise de matériau dit non gélif en fonction de la nature du sol support et des conditions climatiques de la région concernée.

5.1.1 Dimensionnement structural

Le dimensionnement structural consiste à déterminer l'épaisseur des couches composant le corps de la chaussée permettant de supporter le trafic anticipé sans se déformer de façon excessive. Cette approche nécessite une bonne connaissance des propriétés mécaniques des matériaux utilisés, du sol support et des sollicitations associées aux passages des véhicules. La détermination des propriétés mécaniques des matériaux peut s'avérer problématique, compte tenu de la nature même des travaux reliés au retraitement en place d'une chaussée et de la variabilité des matériaux que l'on peut retrouver dans une chaussée ancienne.

À la suite du décohesionnement d'une chaussée, la structure de chaussée est composée essentiellement de deux couches : en partie supérieure, le matériau granulaire contenant des granulats bitumineux et, sous-jacent, la fondation en place. L'apport structural de ces couches varie essentiellement en fonction de leur épaisseur et de leurs propriétés. La capacité structurale de la chaussée après décohesionnement est inférieure à celle qu'il y avait avant les travaux, puisque le revêtement, une fois concassé, n'a plus la même contribution structurale. Par ailleurs, la capacité structurale est modifiée si l'épaisseur du revêtement est réduite par planage. Ainsi, la diminution de la capacité structurale à la suite du décohesionnement est significative et variable selon la nature des matériaux en place et les épaisseurs de revêtement enlevées par planage; il est essentiel que l'option choisie fasse suite à un dimensionnement structural. Cette approche a donc pour but d'adapter la «nouvelle» structure aux conditions locales.

Les paragraphes qui suivent décrivent brièvement la démarche à suivre pour dimensionner la partie supérieure de la chaussée. Dans le cas où le dimensionnement structural de la chaussée est jugé nécessaire sur toute son épaisseur, le Guide «*Conception et rehabilitation des chaussées souples*» s'applique intégralement.

Tel que nous l'avons mentionné précédemment, la procédure de dimensionnement structural doit permettre de considérer les propriétés de chacune des couches et le trafic. Le modèle proposé par «l'American Association of State Highway and Transportation Officials» (AASHTO, 1993) permet de considérer ces paramètres tout en fixant le niveau de service désiré sur le tronçon sous étude.

5.1.1.1 Évaluation du trafic :

La majorité des méthodes disponibles servant au dimensionnement structural des chaussées considère le paramètre «trafic» par le cumulatif «d'Équivalent de charge axial simple» (ECAS) anticipé pendant la vie utile de la chaussée. L'annexe D du guide AASHTO 1993 décrit la procédure servant à la conversion du trafic en ECAS cumulatif. Le trafic se compose de divers types de véhicules lesquels sollicitent la chaussée à différentes intensités; ils n'ont donc pas tous le même coefficient d'agressivité (C.A.). Cette procédure se résume par l'équation ci-dessous, où le nombre cumulatif ECAS pour une période design de (n) années est évalué en considérant le DJMA, le pourcentage de poids lourds et l'agressivité moyenne des véhicules sur le tronçon étudié.

$$ECAS_{TOT} = DJMA * \%V.L. * \%Dir. * \%voie * C.A. * F.A. * n.j/an$$

DJMA :	débit journalier moyen annuel
% V.L. :	pourcentage de véhicules lourds
% Dir. :	pourcentage de véhicules par direction
% voie :	pourcentage de véhicules par voie de roulement
C.A. :	coefficient d'agressivité
F.A. :	facteur d'accroissement = $((1+g)^n - 1)/g$
	n : période d'analyse (année)
	g : taux d'accroissement
n.j/an :	300 jours/an

Une revue de différents relevés aux postes de pesée a permis de préciser que le coefficient d'agressivité moyen pour les routes locales varie de 0,7 à 1,4 et de 1,1 à 2,5 pour les routes régionales et collectrices. Pour les routes nationales et autoroutes, le coefficients d'agressivité varie selon le pourcentage de véhicules lourds et la localisation du secteur concerné. Pour plus d'information sur ce sujet et sur l'évaluation du coefficient d'agressivité moyen, consultez le guide *Conception et rehabilitation des chaussées souples*.

L'estimation du taux d'accroissement du trafic (g) pour un secteur donné s'effectue en se référant aux cartes de débit journalier (Service programmes routiers et circulation) des années antérieures.

5.1.1.2 Option : décohesionnement + revêtement

Les travaux reliés à cette option se résument comme suit :

- décohesionnement de la chaussée (planage au préalable, si requis);
- reprofilage et compactage préliminaire;
- correction de la granularité, si requis;
- mise en forme et compactage final;
- pose du revêtement bitumineux.

Le dimensionnement de la partie supérieure de la chaussée consiste à déterminer l'épaisseur du revêtement de façon à ce que la contrainte transmise dans le matériau décohesionné soit inférieure à la contrainte admissible. Des travaux de recherche en laboratoire (Bergeron G. *et al.*) ont permis de démontrer que les propriétés mécaniques d'un matériau granulaire de calibre MG-20 diminuent en fonction du contenu en granulats bitumineux. Ce phénomène implique d'augmenter l'épaisseur du nouveau revêtement de façon à ce que la contrainte transmise au matériau décohesionné soit moindre et soit compatible avec ses propriétés mécaniques. Le tableau 5.1-1 indique l'épaisseur de revêtement requis lorsque la fondation est constituée d'un granulat vierge de calibre MG-20 et l'augmentation de cette épaisseur lorsque la fondation contient 25 % et 50 % de granulats bitumineux. Dans le cas où l'augmentation de l'épaisseur d'enrobé est importante, l'option de rechargement granulaire (de calibre MG-20) peut s'avérer plus économique (voir section 5.1.1.3).

Tableau 5.1-1

Épaisseur du revêtement bitumineux, option décohesionnement

Classe de route	DJMA ¹ (incluant 10 % de véh. lourds)	Matériaux conformes (C.C.D.G.)		Augmentation suggérée de l'épaisseur du revêtement bitumineux (mm)	
		Revêtement bitumineux (mm)		Matériaux de fondation Contenu en granulat bitumineux	
		zone sud ²	zone nord	25 %	50 %
Locale	< 500	60	60	0	10
	500 - 1 000	70	70	0	10
	1 000 - 2 000	90	85	0	15
	> 2 000	100	90	0	15
Collectrice et régionale	< 1 000	90	80	0	10
	1 000 - 2 000	100	90	0	15
	2 000 - 3 000	115	105	0	20
	3 000 - 4 000	130	120	0	25
	4 000 - 5 000 ³	140	130	5	35
Nationale	< 1 000	100	90	0	15
	1 000 - 2 000	115	105	0	15
	2 000 - 3 000	130	120	0	20
	3 000 - 4 000	140	130	0	35
	4 000 - 5 000 ³	140	130	10	45

1– Pour les routes présentant un pourcentage de plus de 10 % de véhicules lourds ou un trafic lourd inégalement réparti sur les voies ou une chaussée fortement sollicitée (exploitation forestière, carrières, etc.), le DJMA à utiliser dans le tableau doit être corrigé, au préalable, en suivant les étapes décrites dans la norme structures de chaussée (tome II, ch. 2).

2– La zone sud correspond aux régions couvertes par la vallée de l'Outaouais, les basses terres du Saint-Laurent, l'Estrie et la région Chaudière-Appalaches (c'est-à-dire les régions au sud de la ligne reliant Wakefield (Hull), Saint-Jérôme, Grand-Mère, Saint-Raymond-de-Portneuf, l'Île d'Orléans et Saint-Jean-Port-Joli).

3– Les routes dont le DJMA projeté est supérieur à 5 000 et celles dont le nombre de véhicules lourds excède 250 par jour par voie ne sont pas traitées dans ce tableau. Elles doivent faire l'objet d'un dimensionnement spécifique.

5.1.1.3 Option : décohesionnement + stabilisation + revêtement

Les travaux reliés à cette option sont presque identiques à ceux effectués lors d'un «décohesionnement + revêtement» sauf que le matériau décohesionné est stabilisé à l'aide d'un liant hydrocarboné sur une épaisseur de 100 à 150 mm. À la suite d'une période de cure du matériau stabilisé, la pose d'un revêtement complète le procédé. La stabilisation implique la réalisation d'une étude de formulation en laboratoire et d'essais spécifiques lors du contrôle en chantier. Ces aspects sont traités aux chapitres 6 et 7.

L'état des connaissances actuel permet d'affirmer que les propriétés structurales d'un matériau décohesionné et stabilisé se comparent avantageusement à celles d'un granulat de calibre MG-20. Il en découle que l'épaisseur de revêtement requise est inférieure à celle prescrite dans la norme Structure de chaussées (tome II-*Construction routière*, ch. 2) pour une période d'analyse de 15 ans. L'épaisseur du revêtement pour différentes classes de route, de trafic et d'épaisseurs stabilisées est présentée au tableau 5.1-2.

Les propriétés mécaniques des matériaux stabilisés augmentent avec la cure du matériau. Ce phénomène évolue rapidement lors des jours (semaines) suivants le compactage et lors de conditions climatiques favorables ($T \gg 10^\circ\text{C}$, venteux). Des mesures de déflexion ont indiqué que les propriétés des matériaux stabilisés sont plutôt faibles à la suite de la pose du revêtement et qu'une période d'au moins une année est requise avant qu'elles atteignent leur valeur maximale. Ce point a donc été considéré pour l'évaluation des épaisseurs de revêtement, de façon à limiter l'apparition de dégradations prématurées. La rigidité du revêtement bitumineux varie en fonction des températures (moyennes mensuelles) d'une région donnée. Pour les régions situées au nord des villes mentionnées au tableau 5.1-1, où les températures moyennes sont plus basses, l'épaisseur du revêtement peut être réduite de 10 mm.

L'épaisseur minimale d'enrobé recommandée sur une surface stabilisée est de 50 mm.

Tableau 5.1-2

Option décohesionnement + stabilisation épaisseur du revêtement bitumineux

DJMA (incluant 10 % de véhicules lourds)	Revêtement bitumineux (mm) épaisseur de matériaux stabilisés		Limite de sollicitation maximale pour chaque classe de trafic ECAS _{tot}
	100 mm	150 mm	
Routes locales			
< 500	50	—	120 000
500 – 1 000	50	—	240 000
1 000 – 2 000	60	—	481 000
> 2 000	90	75	961 000
Routes régionales et collectives			
< 1 000	70	—	360 000
1 000 - 2 000	80	65	721 000
2 000 - 3 000	90	75	1 081 000
3 000 - 4 000	110	95	1 441 000
4 000 - 5 000	130	115	1 802 000
Routes nationales			
< 1 000	70	—	420 000
1 000 - 2 000	95	80	841 000
2 000 - 3 000	110	90	1 261 000
3 000 - 4 000	130	110	1 682 000
4 000 - 5 000	135	115	2 102 000

Note : Le nombre d'ECAS cumulatif pour chaque type de route a été évalué en considérant un accroissement du trafic (g) de 4 % pendant la période d'analyse (n) fixée à 15 ans.

Les résultats d'un suivi de performance axé sur l'évolution de la capacité structurale de planches d'essais ont permis de préciser les propriétés mécaniques des matériaux décohesionnés et stabilisés. Les mesures de déflexions effectuées un mois après la fin des travaux, dans le cadre d'un suivi de performance, indiquent que les propriétés structurales des matériaux traités avec la mousse de bitume (voir section 6.2.2) et avec l'émulsion CMS-2 sont, à court terme, légèrement supérieures à celles des matériaux traités avec les émulsions CSS-1 et SS-1. Ceci se traduit par une contribution structurale un peu plus élevée pour cette couche (i.e. un module de déformation effectif) et, par conséquent, une épaisseur de revêtement moindre. Ainsi, pour les routes dont le trafic journalier est supérieur à 1 000 véh./jour (10 % de véh. lourds), l'épaisseur de revêtement prescrite au tableau 5.1-2 peut être réduite de 10 mm. Mentionnons que des relevés additionnels sont prévus sur plusieurs sites au cours des prochaines années, afin de préciser cet aspect, et d'ajuster les épaisseurs proposées.

5.1.1.4 Option : décohesionnement + rechargement + revêtement

Cette option consiste à effectuer un rechargement granulaire conventionnel après le décohesionnement de la chaussée. Les étapes suivies sont généralement les suivantes :

- décohesionnement de la chaussée;
- mise en forme et compactage final;
- pose d'un matériau granulaire de calibre MG-20, profilé et densifié selon le C.C.D.G.;
- pose du revêtement.

Le rechargement granulaire agit à titre de fondation tandis que le matériau décohesionné devient la sous-fondation. Le matériau décohesionné doit alors rencontrer les exigences granulométriques d'un matériau de calibre MG-112, tel qu'elles sont décrites dans le C.C.D.G.

L'épaisseur du rechargement est déterminée de façon à assurer une répartition adéquate des contraintes transmises au matériau sous-jacent. Le tableau 2.4-2 tiré de la norme «Structures de chaussées» du tome II- *Construction routière* s'applique en considérant le matériau décohesionné comme une sous-fondation de type A. Les épaisseurs de fondation mentionnées sont des épaisseurs minimales. Dans le cas où l'épaisseur du rechargement granulaire prévue serait inférieure à 150 mm, il est recommandé d'évaluer l'épaisseur du revêtement comme décrit pour l'option «décohesionnement + revêtement». Dans le cas où l'épaisseur du rechargement est augmentée de façon à ce que la structure de chaussée réponde au critère de protection contre le gel (section 5.1.2), l'épaisseur du revêtement prescrite au tableau 2.4-2 de la norme «Structures de chaussées» s'applique également.

5.1.2 Protection contre les effets du gel

Dans la plupart des pays nordiques, l'épaisseur de la structure granulaire est ajustée de façon à assurer une protection partielle contre les effets associés au comportement gélif du sol support. Dans les secteurs où ce type de protection est jugé insuffisant, une protection totale est utilisée en aménageant des transitions.

Dans le cadre d'un projet de retraitement en place, les secteurs visés montrent généralement un comportement peu gélif; les dégradations doivent être associées au comportement de la partie supérieure de la chaussée. Cependant, il existe des cas où la faible épaisseur de la structure de chaussée contribue à la formation de soulèvements différentiels mineurs et à l'évolution des dégradations de surface; la technique du retraitement en place peut tout de même être retenue à condition que l'épaisseur de la chaussée soit augmentée.

L'épaisseur totale de la structure est fonction de l'indice de gel (Igel) du secteur étudié. L'épaisseur requise est ajustée selon la nature du sol support et le type de route. Elle est diminuée pour les routes régionales et locales et lorsque le sol de support est de nature graveleuse dans des conditions favorables (nappe phréatique éloignée, remblai etc.). La procédure à suivre pour déterminer l'épaisseur totale de la structure de chaussée est décrite dans le guide *Conception et rehabilitation des chaussées souples*.

5.1.3 Analyse d'option et exemple

À la suite d'une étude de réfection, la technique de retraitement en place a été retenue. Le comportement de la chaussée est caractérisé par les paramètres suivants :

- Portance insuffisante : (rechargement requis : équivalent 50 mm de béton bitumineux).
- Comportement hivernal : Comportement gélif modéré et uniforme. La variation de l'indice de roulement (IRI) été/hiver est de l'ordre de 2.0.
- Dégradations : – Fissures longitudinales peu ouvertes accompagnées d'un carrelage fin dans les pistes de roues. Ornières à grand rayon de sévérité moyenne à majeure.
- Quelques fissures polygonales.

Autres caractéristiques

- Trafic : DJMA : 800 à 1 000 véhicules par jour;
% véhicules lourds : 9 %;
accroissement annuel du trafic : 4.0 % (voir tableau 5.1-2);
- Route régionale : milieu rural;
- Profil : adéquat et plutôt plat;
- Accotements : plus de 2,5 m de largeur;
- Indice de gel : 1150 °C x jours;
- Structure de chaussée :
 - Revêtement bitumineux : – épaisseur 80 à 120 mm;
 - Fondation granulaire : – sable graveleux, trace de silt;
% passant le tamis 5 mm : 57 à 70;
% passant le tamis 80 µm : 7 à 12;
– épaisseur 600 à 850 mm;
 - Sol de support : – sable silteux (SM fin).

L'approche proposée pour déterminer l'option la mieux adaptée consiste, dans un premier temps, à déterminer l'épaisseur des différentes couches (revêtement, rechargement granulaire, stabilisation) pour chacune des options, tout en satisfaisant les critères de dimensionnement structural et de protection contre le gel. Les trois « scénarios » sont ensuite comparés en fonction de leur faisabilité et de leurs coûts.

5.1.3.1 Protection contre le gel

Site étudié : route régionale

- indice de gel* : 1150 °C x jr;
- nature du sol support : sable silteux avec trace de gravier (SM fin) : F.S.= 1,15;
- route nationale : FR = 0,90.
- épaisseur de protection de base (Pbase) = 877 mm (voir guide *Conception et réhabilitation des chaussées souples*).

Protection requise = Pbase x F.S. x F.R.

$$877 \times 1,15 \times 0,90 = 907 \text{ mm} \Rightarrow 925 \text{ mm.}$$

5.1.3.2 Dimensionnement structural

OPTION 1 : Décohésionnement et revêtement

La structure de chaussée sera composée d'un revêtement bitumineux reposant sur un matériau décohesionné (50 % g.b.c./50 % matériau granulaire) sous lequel on retrouve la fondation existante.

Étape 1 : Évaluation de la profondeur de décohesionnement

L'épaisseur de l'enrobé en place varie de 80 à 120 mm. Dans le but de s'assurer que la proportion de granulats bitumineux soit inférieure à 50 % en tout point sur le secteur étudié, la profondeur de décohesionnement pourrait être évaluée en fonction de l'épaisseur maximale, soit 120 mm. Compte tenu de la précision des appareils et des hétérogénéités locales des épaisseurs d'enrobé, on détermine généralement la profondeur de décohesionnement en arrondissant à 50 mm près vers le haut. Dans le présent exemple, la profondeur de décohesionnement serait de 250 mm. Notons que l'épaisseur de la couche de matériau décohesionné sera d'environ 275 mm, si l'on considère le foisonnement du revêtement en place.

Étape 2 : Évaluation de l'épaisseur du revêtement

L'épaisseur du revêtement est évaluée à l'aide du tableau 5.1-1. Pour une route régionale, selon le trafic journalier estimé entre 800 - 1000 et un pourcentage de véhicules lourds de 9 %, l'épaisseur du revêtement sera de 80 mm + 10 mm (augmentation suggérée) = 90 mm. On considère que le matériau décohesionné répond aux exigences du Devis type D-1199.

Synthèse de l'option 1

La structure de chaussée est composée de :

- revêtement bitumineux : 90 mm;
- matériau 50 % gb/50% gr : 275 mm;
- fondation en place : 420 – 570 mm;
- épaisseur totale de la structure de chaussée : 785 – 935 mm.

Avantages et inconvénients de l'option 1

- La réalisation des travaux est relativement simple et plus courte, car il n'y a pas de stabilisation des matériaux décohesionnés.

* : l'indice de gel est défini comme étant la somme des degrés – jours au-dessous du point de congélation durant une année.

- Le rehaussement du profil est de l'ordre de 110 mm ce qui implique une légère diminution de la largeur des accotements (environ 220 mm de chaque côté). Ce léger rehaussement ne justifie probablement pas le rehaussement ou le remplacement des glissières de sécurité. Notons que le rehaussement du profil est augmenté en fonction de la quantité de granulats d'apport requise pour rencontrer les exigences du devis. Dans ce cas-ci, nul besoin de granulats d'apport. À titre indicatif, l'apport de granulats entraîne généralement un rehaussement variant de 50 à 100 mm.
- L'épaisseur de la structure de chaussée est un peu faible par endroits pour assurer une protection adéquate contre les effets du gel. L'analyse des dégradations de même que le comportement hivernal de ces secteurs devraient être précisés avant le choix final de l'option. La possibilité de rehausser le profil dans ces secteurs doit également être évaluée.

OPTION 2 : Décohésionnement + stabilisation + revêtement

Cette intervention inclut la stabilisation des matériaux décohésionnés sur une épaisseur de 100 à 150 mm et la pose du revêtement.

Étape 1 : L'épaisseur de décohésionnement est identique, qu'il y ait ou non stabilisation.

Étape 2 : Évaluation de l'épaisseur du revêtement.

Tel qu'il est mentionné au tableau 5.1-2, l'épaisseur du revêtement bitumineux requis est de 70 mm lorsque la stabilisation s'effectue sur 100 mm d'épaisseur. Dans le présent exemple, la stabilisation sur 150 mm n'est pas justifiée, compte tenu du trafic journalier.

Synthèse de l'option 2 :

La structure de chaussée est composée de :

- revêtement bitumineux : 70 mm;
- matériau (50 % gb + 50 % gr) stabilisé : 100 mm;
- matériau (50 % gb + 50 % gr) : 175 mm;
- fondation en place : 420 – 570 mm;
- épaisseur totale de la structure de chaussée : 765 – 915 mm.

Avantages et inconvénients de l'option 2

- Tout comme l'option 1, cette approche limite le rehaussement du profil à environ 90 mm.
- L'épaisseur de matériaux non gélifs est insuffisante par endroits.
- L'étape de la stabilisation et la période de cure (une semaine et plus dans certains cas) allongent la durée des travaux. De plus, la circulation peut endommager la surface pendant cette période.
- L'étape de la stabilisation doit être effectuée dans des conditions climatiques favorables ($T \gg 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ et absence de précipitation). Dans le cas contraire, le matériau stabilisé n'aura pas les propriétés mécaniques escomptées, ce qui peut causer une dégradation prématurée de la chaussée.

OPTION 3 : Décohésionnement + rechargement granulaire + revêtement

Cette option consiste à effectuer, après le décohésionnement de la chaussée, un rechargement granulaire conventionnel. La pose du revêtement complète les travaux.

Étape 1 : Évaluation de la profondeur de décohésionnement

La profondeur de décohésionnement est identique qu'il y ait ou non stabilisation. Le matériau décohésionné agit à titre de sous-fondation; il devra être conforme aux exigences granulométriques du calibre MG-112.

Étape 2 : Évaluation de l'épaisseur du rechargement et du revêtement

Tel qu'il est présenté au tableau 2.4-2 de la norme «Structure de chaussées» du tome II-*Construction routière*, l'épaisseur de la fondation et du revêtement requis sont respectivement de 150 mm et 80 mm. D'après le critère de protection contre les effets du gel, l'épaisseur totale de la structure de chaussée est de 925 mm. Comme les épaisseurs de matériau décohesionné et de fondation en place sont respectivement de 275 mm et entre 420 et 570 mm, l'épaisseur maximale requise du rechargement est de 150 mm. Lorsque l'épaisseur du rechargement évaluée selon le critère de protection contre le gel diffère de celui prescrit par la norme, l'épaisseur choisie est la plus grande des deux. Dans le présent exemple, l'épaisseur choisie est de 150 mm.

Synthèse de l'option 3 :

La structure de chaussée est composée de :

- revêtement bitumineux : 80 mm;
- matériau granulaire (calibre MG-20) : 150 mm;
- matériau (50 % gb + 50% gr) : 275 mm;
- fondation en place : 420 – 570 mm;
- épaisseur totale de la structure de chaussée : 925 – 1075 mm.

Avantages et inconvénients de l'option 3

- L'épaisseur de la structure granulaire permet d'assurer une protection suffisante contre les effets du gel d'après le critère décrit à la section 5.1.2. Ceci a des effets bénéfiques sur le comportement à long terme de la chaussée.
- À la suite du décohesionnement de la chaussée, le matériau résultant rencontre généralement les exigences du calibre MG-112, d'où un apport moindre de granulats de correction.
- La correction des profils longitudinaux et transversaux est possible lors de la pose du rechargement granulaire.
- À la suite des travaux, le rehaussement du profil sera en moyenne de 255 mm ce qui entraîne des travaux de raccordement avec les entrées privées, chemins et rues adjacents. De plus, ce rehaussement se traduit par une diminution de la largeur des accotements de l'ordre de 500 mm de chaque côté de la chaussée. Dans le présent exemple, la largeur des accotements demeure suffisante d'après la norme (2,5 m - 0,5 m = 2,0 m).
- L'option proposée implique un apport de matériau neuf considérable, ce qui peut s'avérer une approche problématique dans certaines régions où la disponibilité des ressources granulaires est moindre.

5.1.3.3 Faisabilité et coûts des options

La faisabilité d'une option repose essentiellement sur les caractéristiques propres au site : le trafic aux heures de pointe, la proximité des sources granulaires et celle de la centrale d'enrobage. La connaissance du site étudié permet de préciser l'option la plus avantageuse sur le plan technique, tout en faisant une meilleure estimation des inconvénients aux usagers et résidents pendant la durée des travaux. La faisabilité d'une option dépend, entre autres, des aspects suivants :

- Lors de la préparation du projet, la période pendant laquelle les travaux seront réalisés peut être prévue. De façon générale, plus les travaux sont projetés tard en automne, plus l'option impliquant la stabilisation des matériaux est risquée sur le plan technique. Les températures plus froides et les précipitations parfois abondantes pendant cette période contribuent à ralentir la cure du matériau. On

retrouve également des conditions similaires dans les secteurs à l'ombre. Le matériau stabilisé est plus vulnérable aux effets du trafic, ce qui peut nécessiter des travaux de correction de la surface stabilisée avant la pose du revêtement. Rappelons que les faibles propriétés structurales du matériau stabilisé après une période de cure insuffisante peuvent causer l'apparition prématurée de dégradations à la surface de la chaussée.

- Tel qu'il est recommandé dans le devis type D-1199, la circulation doit être réduite (résidents seulement) ou détournée pendant la période de cure. Lors de quelques projets, il a été noté qu'une réduction de la vitesse de circulation contribue à limiter l'évolution des dégradations de la surface stabilisée. Une signalisation particulière est donc requise pendant la période de cure et doit être prévue dans l'appel d'offres. Lorsque la période de cure ne peut être respectée, le concepteur doit considérer ce point comme étant défavorable à la stabilisation; il doit tenir compte du trafic et de la probabilité de mauvaises conditions climatiques. Généralement, il y a peu de bris (arrachement) à la surface stabilisée lorsqu'il n'y a pas de précipitations, même sous un trafic de l'ordre de 2000 véh./jour. En présence de précipitations, il y a formation de nids-de-poule en moins de quelques jours même sous un trafic d'environ 1000 véh./jour.
- Le rehaussement du profil relié à un rechargement granulaire (option 3) peut se traduire par la réalisation de nombreux travaux de raccordement. Ces travaux peuvent nécessiter des quantités additionnelles de matériaux granulaires qui doivent être estimées, de même que les coûts d'achat et de transport des matériaux. Cette option se traduit généralement par une diminution de la largeur des accotements, ce qui doit être évalué en regard des normes en vigueur (tome I- *Conception routière*).
- La faisabilité d'une option dépend également de la durée projetée pour les travaux. Ce facteur peut s'avérer important en zone urbaine où le débit journalier est parfois plus élevé.

Avant d'arrêter son choix sur une option, il est recommandé d'estimer les coûts par m² rattachés à chacune des options. À titre d'exemple, les coûts des trois options apparaissant au tableau 5.1-3 ont été déterminés d'après des coûts de projets réalisés en 1994. La note explicative accompagnant le devis type D-1199 peut être utilisée aux fins d'estimation.

Tableau 5.1-3
Exemple, coûts des options

	Option 1	Option 2	Option 3
Décohésionnement	2,00-2,50 \$/m ²	2,00-2,50 \$/m ²	2,00-2,50 \$/m ²
Mise en forme, compactage			
Correction de la granulométrie (granulat d'apport et malaxage)*	1,25 \$/m ² correction 250 mm	0,80 \$/m ² correction 150 mm 3,30 \$/m ²	
Stabilisation (liant hydrocarboné et épandage-malaxage)			
Rechargement granulaire (épandage, mise en forme, compactage)			** épaisseur 150 mm 3,30 \$/m ²
Revêtement bitumineux (40\$/tonne)	90 mm 8,20 \$/m ²	70 mm 6,40 \$/m ²	80 mm 7,30 \$/m ²
*** Travaux connexes			
Coût total (\$/m ²)	11,45-11,95	12,50-13,00	12,00-13,00

* Pour l'exemple, la correction granulométrique a été estimée à 35 kg/m² de granulats de calibre 20-5 mm pour chaque 100 mm de matériau corrigé. Le coût des granulats, incluant l'épandage et le malaxage, a été évalué à 15 \$/tonne.

** Pour l'exemple, le coût à la tonne du granulat de calibre MG 20 a été évalué entre 8,00 \$ et 10,00 \$.

*** Les coûts reliés à la signalisation, au remplacement de glissières de sécurité et ceux reliés aux travaux de raccordement avec les entrées privées et aux abords des ouvrages d'art diffèrent d'une option à l'autre.

En résumé, l'approche proposée pour faire le choix de l'option permet d'évaluer séparément les volets technique, économique et faisabilité. La comparaison des avantages et inconvénients de chacune des options oriente le concepteur vers l'option la plus justifiée en fonction de l'importance accordée à chacun des facteurs considérés. Dans cette optique, la réalisation d'une analyse multicritères serait souhaitable.

5.2 Étude préliminaire

Comme son nom l'indique, cette étude doit être effectuée le plus tôt possible lors de la préparation d'un projet. Les travaux reliés à cette étude visent à compléter les données fournies par l'étude de réfection, afin de préciser les paramètres suivants :

- Planage : étendue des secteurs et épaisseur à enlever.
- Décohésionnement : profondeur permettant de respecter les exigences du devis.
- Granulats d'apport : quantité de granulats requis tout en précisant les zones à corriger.

Pour atteindre ces objectifs, des sondages doivent être effectués pour déterminer :

- l'épaisseur du revêtement bitumineux existant;
- la granulométrie et la teneur en bitume du revêtement;
- la granulométrie des matériaux de fondation;
- les propriétés physiques des matériaux de fondation.

Les paragraphes qui suivent donnent une brève description des méthodes d'échantillonnage, des essais à effectuer ainsi que la cadence à suivre lors des travaux. La figure 5.2-1 donne sous une forme schématique les principales étapes d'une étude préliminaire. La synthèse des résultats provenant des différents essais effectués lors de cette étude doivent apparaître dans le document d'appel d'offres.

5.2.1 Épaisseur du revêtement bitumineux

Ce paramètre est généralement évalué par carottage et peut être déterminé par une méthode indirecte : le géoradar. Une première estimation de l'épaisseur du revêtement (interventions antérieures) est possible en consultant le système des inventaires des infrastructures de transport (0012), qui donne le détail des travaux, et en évaluant le nombre de travaux d'entretien effectués antérieurement sur le tronçon concerné. Cette démarche permet de choisir une méthode d'échantillonnage plus appropriée.

5.2.1.1 Méthodes d'échantillonnage

L'épaisseur du revêtement est mesurée en prélevant des carottes sur toute l'épaisseur de l'enrobé. Dans le cas où les travaux sont effectués avec une foreuse (tarière mécanique), l'épaisseur du revêtement est mesurée en place, si un échantillon intact ne peut être récupéré. La réalisation de puits d'observation est également possible et permet la récupération d'un échantillon de la fondation granulaire sous-jacente. À chaque point de mesure, la largeur du revêtement doit être notée. Le tableau 5.2-1 résume les avantages et limites de chacune des méthodes d'échantillonnage disponibles.

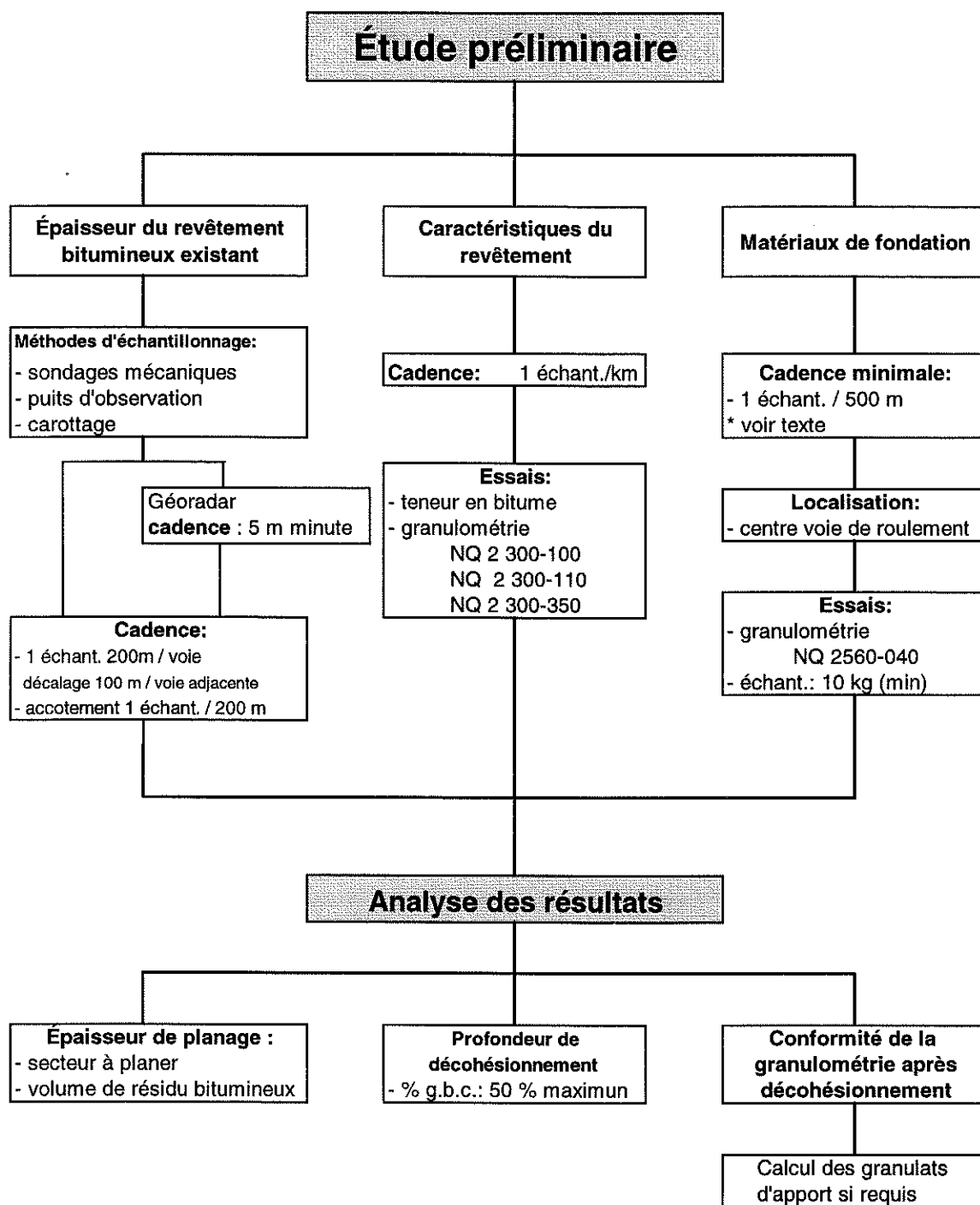


Figure 5.2-1 : Étude préliminaire

Tableau 5.2-1

Étude préliminaire; méthodes d'échantillonnage

Méthodes	Avantages et limitations
Sondages :	– Méthode rapide : Plus de 50 points de mesure peuvent être effectués par journée de travail avec une foreuse mobile (tarière mécanique). – Échantillon remanié : Il est pratiquement impossible de préciser la partie de l'échantillon qui sera récupérée par planage. Permet de recueillir dans la même opération un échantillon de la fondation granulaire sous-jacente (volume de l'échantillon restreint).
Puits d'observation:	– Méthode plus lente : À l'aide d'une scie à béton, la réalisation du puits (300 x 300 mm) nécessite environ 1 h (inclut la mesure de l'épaisseur du revêtement, l'échantillonnage de la fondation granulaire et le remblayage du puits). Permet de recueillir un échantillon représentatif de la fondation granulaire dont le volume est généralement suffisant pour réaliser divers essais en laboratoire. Permet de connaître l'épaisseur de revêtement qui sera récupérée par planage.
Carottage :	– Durée : approximativement 30 min/carotte Permet une mesure précise de l'épaisseur du revêtement.
Géoradar :	– Permet une mesure précise (± 10 mm) en continu de l'épaisseur du revêtement. Quelques échantillons peuvent être prélevés lors de l'étalonnage de l'appareil. Durée : selon la fréquence des lectures. • Note : Absence de gel dans le sol lors des relevés.

5.2.1.2 Cadence

Un sondage est effectué tous les **200 m**, pour chacune des voies de roulement. Le sondage d'une voie doit commencer avec un décalage de **100 m** avec la voie adjacente. Pour les accotements revêtus, la cadence est également de **200 m**.

Si l'épaisseur du revêtement varie de plus de 35 mm entre deux points de mesure ou s'il y a des zones de rapiéçage, des échantillons supplémentaires sont prélevés afin de déterminer le début et la fin de la zone en surépaisseur. Dans le cas où les premiers résultats indiquent des variations brusques de l'épaisseur du revêtement sur de courtes distances, l'utilisation du géoradar (plusieurs lignes de lecture possibles) est justifiée.

5.2.1.3 Géoradar

Des développements récents dans le domaine du géoradar ont permis l'utilisation de cette technique pour l'auscultation de chaussées, notamment pour la mesure de l'épaisseur du revêtement.

Le principe du radar repose sur l'émission d'ondes électromagnétiques et la réflexion de celles-ci à la surface. La vitesse à laquelle voyagent les ondes dans un milieu est fonction de ses propriétés diélectriques. Connaissant les propriétés diélectriques des différents matériaux traversés par l'onde (air, enrobé, granulats), on peut évaluer l'épaisseur des différentes couches selon le temps de parcours de l'onde entre les différentes interfaces entre les couches et le récepteur. Pour plus de détails concernant le principe du géoradar, voir GPR (1994).

Les derniers développements ont consisté principalement à concevoir un système capable d'émettre des ondes électromagnétiques à une fréquence précise et constante, de développer un système d'acquisition adapté et un logiciel de traitement.

Le système est monté sur un véhicule et les essais se font à une vitesse variant entre 25 km/h et 75 km/h selon la fréquence des lectures. La précision de la mesure est de ± 10 mm. En regard des objectifs d'une étude préliminaire, une évaluation de l'épaisseur tous les 5 m est amplement suffisante et peut être effectuée à une vitesse de 75 km/h.

5.2.2 Caractéristiques du revêtement existant

- La teneur en bitume du revêtement existant doit être déterminée. Connaissant la proportion de béton bitumineux dans le matériau décohesionné, la teneur en bitume de l'enrobé permet de faire une première estimation du contenu en bitume du matériau décohesionné.
- La granulométrie du revêtement permet de préciser le type d'enrobé en place. Cette information ainsi que l'épaisseur du revêtement permettent une meilleure estimation de la granulométrie du matériau après décohesionnement.

5.2.2.1 Essais à effectuer

S'il y a lieu, les carottes sont sciées afin de séparer la couche de revêtement qui sera récupérée par planage de la couche qui sera décohesionnée. Les deux échantillons sont alors analysés séparément.

Un échantillon représentatif d'un secteur de un km est utilisé pour effectuer les essais suivants :

- Teneur en bitume (NQ 2300-100) et analyse granulométrique (NQ 2300-110 et NQ 2300-350).

5.2.3 Matériaux de fondation

5.2.3.1 Méthodes d'échantillonnage

Les matériaux de fondation sont prélevés *in situ* sur une profondeur de 125 mm. Ces travaux peuvent être effectués à l'aide d'une foreuse ou par des puits d'observation dont la dimension est d'environ 300 mm x 300 mm.

Localisation

Méthode par forage (figures 5.2-1 a, b et c)

Les forages sont effectués au centre des voies de roulement. Selon l'outillage utilisé, la masse de l'échantillon prélevé peut être insuffisante pour la réalisation des essais en laboratoire. La masse de granulat requise pour une granulométrie est de 10 kg, ce qui nécessite généralement plus d'un trou de sondage à la tarière mécanique (diamètre de 150 mm). Les sondages sont réalisés très près les uns des autres de façon à prélever un échantillon représentatif du secteur analysé.

Méthode par puits d'observation : (figures 5.2-2 a, b et c)

La localisation des prélèvements est choisie de façon à faciliter l'aménagement du puits. Par exemple, on tirera avantage de fissures existantes dans le revêtement bitumineux. La présence de particules dont le diamètre est supérieur à 40 mm doit être notée et les secteurs concernés doivent être délimités (échantillonnage supplémentaire). Ces particules peuvent causer une usure prématurée ou des bris aux équipements utilisés pour le décohesionnement de la chaussée.

5.2.3.2 Essais à effectuer

Les essais à effectuer sont les suivants :

- analyse granulométrique (NQ 2560-040 et NQ 2560-350);
- limites de consistance (NQ 2501-090 ou NQ 2501-092).

En cas de doute sur la qualité des matériaux, les essais suivants sont requis pour évaluer les propriétés mécaniques des granulats et la propreté des granulats fins :

- micro deval (NQ 2560-070);
- valeur au bleu de méthylène (NQ 2560-255).

L'essai au bleu de méthylène est justifié lorsque la stabilisation est prévue.

5.2.3.3 Cadence

Les matériaux de fondation sont échantillonnés à une cadence minimale de un échantillon par 500 m. Lorsque pour deux échantillons consécutifs, les pourcentages passant les tamis 5 mm et 80 µm diffèrent respectivement de plus de 10 % et de 5 %, des échantillons supplémentaires doivent être prélevés afin de préciser la longueur des secteurs concernés.

5.2.4 Fenêtre d'exploration

Cette approche consiste à décohesionner la chaussée sur une longueur minimale de 10 m afin de prélever des échantillons. On effectue des fenêtres aux endroits où l'épaisseur du revêtement est connu (par carottage) afin d'enlever, si requis, la surépaisseur du revêtement par planage. Les fenêtres sont effectuées au centre de la voie de roulement à une cadence minimale de une fenêtre par

5 000 m². Cette technique a pour avantage de récupérer des échantillons dits représentatifs, permettant de faire une meilleure estimation des besoins en granulats d'apport et d'effectuer la formulation en laboratoire avant le début des travaux. Compte tenu des coûts de location de ces équipements, cette approche semble plus justifiée pour des projets d'envergure (supérieurs à 30 000 m²) et lorsque la stabilisation a été retenue. À titre indicatif, la réalisation d'une fenêtre d'exploration varie entre 500 \$ et 700 \$, ce qui comprend tous les travaux et la remise en état de la chaussée.

Lors de la réalisation des fenêtres, il est recommandé de noter tous les renseignements pertinents et de prélever quelques échantillons (50 kg) supplémentaires dans le cas où des analyses additionnelles seraient requises. Les essais recommandés apparaissent au tableau 5.2-2.

Tableau 5.2-2

Analyse en laboratoire : fenêtre d'exploration

Échantillonnage : (prélèvement : 50 kg par échantillon)	BNQ- 2560-010
Analyse de la granulométrie	NQ- 2560-040 NQ- 2560-350 (voir note, guide de contrôle, VII)
Teneur en eau	BNQ- 2560-200
Teneur en bitume	NQ- 2300-100 NQ- 2300-110

5.3 Analyse des résultats

La présente section décrit brièvement les étapes à suivre afin d'évaluer l'épaisseur de planage, la profondeur du décohesionnement et le besoin en granulat d'apport.

5.3.1 Évaluation de l'épaisseur de planage

Le devis D-1199 stipule que l'épaisseur du revêtement doit être réduite par planage à 100 mm $\pm$ 10 mm aux endroits où elle est supérieure à 125 mm. Dans l'exemple présenté à la figure 5.3-1, des travaux de planage sont requis uniquement dans trois secteurs sur des épaisseurs différentes. Notons qu'à moins d'une indication contraire (rapiéçage), le secteur représentatif d'un point d'échantillonnage est de 125 m de chaque côté lorsque la cadence d'échantillonnage est de 250 m. Lors de l'analyse, il est important de vérifier, pour chacune des voies de roulement, si les variations d'épaisseur se produisent dans les mêmes secteurs. Si ce n'est pas le cas, les secteurs de même que l'épaisseur à planer devront être déterminés pour chacune des voies.

Tel qu'il est montré à la figure 5.3-1, on évalue la quantité de résidus de planage en calculant le volume d'enrobé plané. Le tonnage est évalué en considérant la masse volumique de l'enrobé en place, généralement comprise entre **2 300 et 2 350 kg/m³**. On attribue un facteur de foisonnement de **1,3** pour estimer le volume de résidus de planage. Les différentes techniques disponibles destinées à la réutilisation des résidus sont brièvement décrites à la section 5.5.

Figure 5.2.1

Mesure de l'épaisseur du revêtement : forage

- Enfoncer la tarière à vitesse réduite et arrêter dès que les granulats de la fondation remontent à la surface.



- Brosser les parois du trou de façon à déterminer visuellement la limite inférieure du revêtement.
- Prendre la mesure (mm) et noter sur la carte d'échantillonnage.



- S'il y a lieu, l'épaisseur de revêtement qui sera récupérée par planage est inscrite sur la carte d'échantillonnage.
- Remplir le trou de sondage et densifier avec l'outillage de forage. Obturer avec un mélange à froid sur une épaisseur minimale de 5 cm.

Figure 5.2.2

Réalisation d'un puits d'observation

- Localiser le puits au centre de la voie de roulement. La présence de fissures peut faciliter et accélérer le sciage du revêtement.

- La dimension minimale du puits est de 300 x 300 mm.



- Noter sur la carte d'échantillonnage s'il s'agit d'une zone de rapiéçage et l'épaisseur de revêtement qui sera récupérée par planage.



- Après échantillonnage de la fondation granulaire, remblayer le puits et densifier les matériaux granulaires (prélevés sur l'accotement) à l'aide d'une plaque vibrante. Obturer avec un mélange à froid sur une épaisseur minimale de 5 cm.

5.3.2 Évaluation de la profondeur (P.D.) et de la largeur du décohesionnement

Profondeur de décohesionnement (P.D.) :

La profondeur de décohesionnement doit être établie en s'assurant qu'en tout point sur le projet, le contenu en granulat bitumineux est inférieur à 50 %. Compte tenu des variations des épaisseurs de revêtement, lorsqu'on fixe la profondeur de décohesionnement, le contenu en granulats bitumineux dans le matériau décohesionné, varie d'un endroit à l'autre. À l'inverse, si l'on fixe le contenu en granulat bitumineux, la profondeur de décohesionnement doit être ajustée afin de conserver la même proportion de granulat bitumineux et de granulat de la fondation. Le dernier cas s'avère justifié uniquement lorsque la stabilisation du matériau décohesionné est prévue ou un contenu constant en granulat bitumineux assure la validité de l'étude de formulation. On a généralement avantage, afin de faciliter la réalisation des travaux, à fixer la profondeur de décohesionnement constante à condition que la variation de la proportion en granulat bitumineux n'excède pas 20 %. Dans le cas contraire, il est préférable d'ajuster la profondeur de décohesionnement pour chaque secteur (au moins un kilomètre) où l'épaisseur du revêtement est différente. Dans l'exemple de la figure 5.3-1, la profondeur de décohesionnement est fixée à 250 mm (après planage) puisque l'épaisseur maximale du revêtement est de 125 mm au km 5+000. Le contenu en granulat bitumineux variera, selon les sondages, de 36 % entre les km 6+000 et 7+000 à 50 % au km 5+000. Si la stabilisation des matériaux décohesionnés est prévue, l'effet de cette variation pourra être précisée en laboratoire lors de la formulation.

Après l'établissement de la profondeur de décohesionnement, le concepteur doit évaluer le rehaussement du profil de la chaussée associé au décohesionnement. L'équation ci-dessous permet de faire une première estimation du rehaussement.

$$\Delta h = 0,3 \times b.b.$$

Δh : rehaussement (mm),

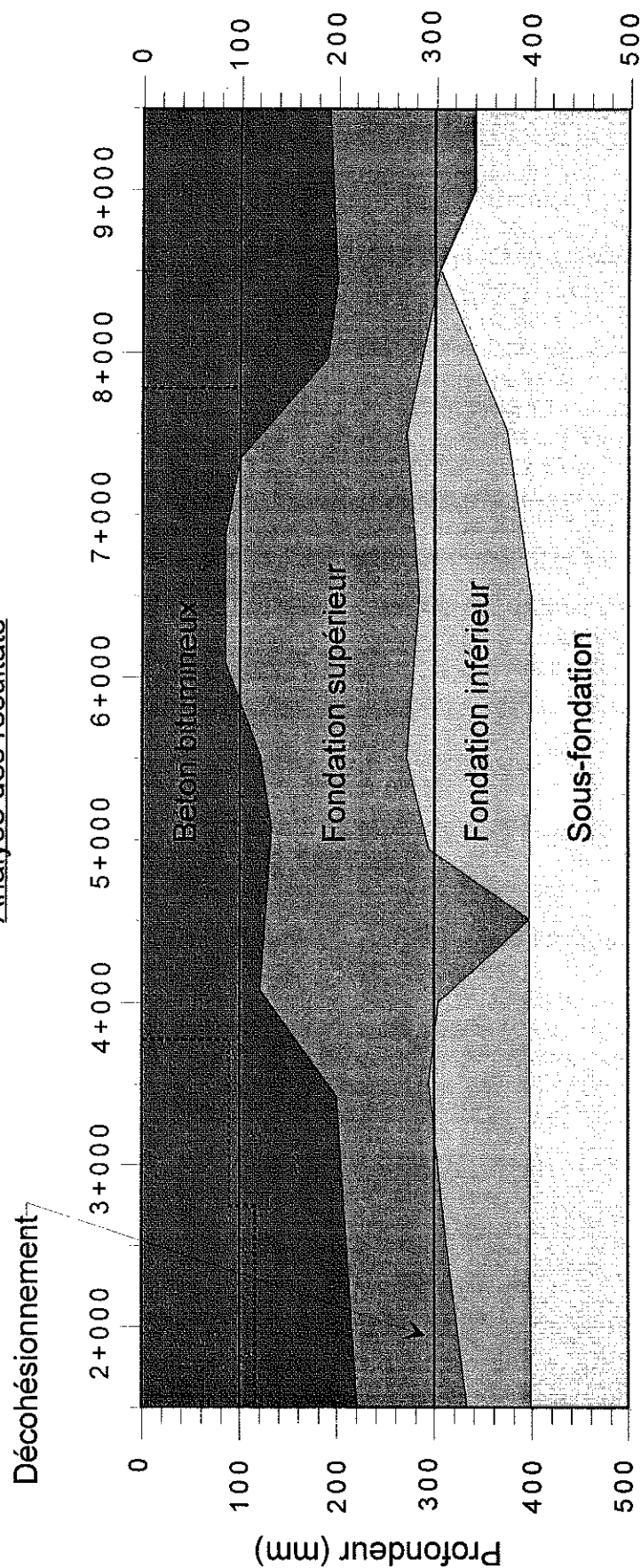
b.b. : épaisseur du revêtement (mm).

Largeur de décohesionnement :

Il est recommandé de décohesionner la chaussée sur toute la largeur de la plate-forme (voies + accotements). Cette pratique favorise une uniformité transversale dans la structure de chaussée et facilite le drainage lors de travaux (précipitations). Dans le cas contraire, il faut prévoir (pour la durée des travaux) une façon d'éviter l'accumulation d'eau dans l'encaissement créé par le décohesionnement de la voie de roulement notamment à l'intérieur des courbes.

Figure 5.3-1 : Étude préliminaire

Analyse des résultats



1	2	3	Volume * (m³)
Planage secteurs :	Épaisseurs à planer	Largeur du revêtement	
km 1+500 à 2+700	120 mm	7,5 m	1 170
km 2+700 à 3+750	90 mm	7,5 m	709
km 7+750 à 9+500	100 mm	7,4 m	1 295

* Volume avant foisonnement.

Volume total : 3 174 m³.

5.3.3 Granulats d'apport

Tel qu'il est mentionné à l'article 5.7 du devis type D-1199, le matériau décohesionné doit rencontrer les exigences granulométriques présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 5.3-1
Exigences granulométriques

Ouverture du tamis	Pourcentage passant
40 mm	100
28 mm	80-100
14 mm	50-90
5 mm	25-55
315 µm	5-20
80 µm	3-10

Lors de l'étude préliminaire, le concepteur doit évaluer la granulométrie du matériau décohesionné et préciser le besoin en granulat d'apport afin de prévoir les sommes requises dans la programmation budgétaire. Plus tard, l'estimation de la quantité et du type de granulats requis seront vérifiées. Cette démarche comporte certaines imprécisions reliées à la représentativité des données et aux hypothèses de calcul; elle est prévue dans le devis type D-1199, notamment en ce qui a trait aux modalités de paiement.

5.3.3.1 Évaluation de la granulométrie après décohesionnement

Description de la méthode

La méthode consiste à effectuer un combiné granulométrique des matériaux de fondation et du revêtement bitumineux concassé (b.b.c.). Le calcul est répété pour chaque secteur homogène. Un secteur «homogène» (matériaux de fondation) est délimité quand au moins trois résultats granulométriques semblables sont obtenus consécutivement.

Procédure de calcul

Les paragraphes qui suivent font référence à l'**annexe C** tirée du devis descriptif. La méthode de calcul est disponible sur support informatique (fichier LOTUS ou EXCEL 5.0) au Service des chaussées.

– Granulométrie de la fondation

Une moyenne granulométrique est calculée par secteur homogène.

– Granulométrie du béton bitumineux concassé (b.b.c.)

Lors du décohesionnement de la chaussée, la fragmentation du revêtement est fonction de plusieurs facteurs dont le type d'équipement, l'épaisseur du revêtement, la méthode de travail. Les trois paramètres doivent être connus pour choisir la granulométrie du b.b.c. utilisée pour le calcul (voir tableau 5.3-2).

H_{fond} : épaisseur de fondation,

γ_{fond} : masse volumique de la fondation en place.

Proportion de granulat bitumineux :

$$= \frac{H_{\text{b.b.}} \cdot \gamma_{\text{b.b.}}}{[(H_{\text{b.b.}} \cdot \gamma_{\text{b.b.}}) + (H_{\text{f}} \cdot \gamma_{\text{f}})]}$$

$$= \frac{110 \text{ mm} \cdot 2350 \text{ kg/m}^3}{[(110 \text{ mm} \cdot 2350 \text{ kg/m}^3) + (140 \text{ mm} \cdot 2200 \text{ kg/m}^3)]}$$

$$= 45,6 \% = 46 \%$$

	Tamis					
	40	28	14	5	315 μm	80 μm
b.b.c. proportion : 46 %	46,0	43,2	40,0	25,8	4,6	2,8
Fondation supérieure proportion : 54 %	54,0	51,8	43,2	34,6	6,5	5,9
Estimation après décohésionnement : 100 %	100	95	83,2	60,4	11,1	8,7
Exigences % limite inférieure limite supérieure	100 100	80 100	50 90	25 55	5 20	3 10
Conformité O : oui N : non	O	O	O	N	O	O

Dans le présent exemple, la non-conformité au tamis 5 mm indique que l'apport de granulat sera requis.

5.3.3.2 Matériaux de correction et calcul de la quantité requise

L'estimation de la quantité de granulat d'apport doit tenir compte de la disponibilité des granulats susceptibles de combler la déficience granulométrique. Il est important de noter que lorsque la non-conformité du matériau est causée par une proportion trop élevée de particules fines, la correction de la granularité par ajout de « pierre » (supérieur à 5 mm) s'avère inadaptée et très coûteuse. Dans un tel cas, l'utilisation de cette approche doit être reconsidérée ou des méthodes palliatives doivent être envisagées (voir chapitre 6). De façon générale, on utilise un granulat dont le diamètre est supérieur à 5 mm (calibres 5-20, 10-28, 14-20).

Lorsque la non-conformité se situe uniquement au tamis 40 mm et que le pourcentage passant est supérieur à 95 %, la quantité de granulats d'apport requise peut être jugée non significative. Si le pourcentage est inférieur à 95 %, la non-conformité après décohésionnement est probable et le risque de ségrégation de grosses particules est accru. Dans un tel cas, le secteur concerné doit être délimité en s'assurant de la représentativité des échantillons prélevés (fondation supérieure), et des mesures correctives doivent être prévues. Un rechargement de faible épaisseur (calibre MG20) peut alors être prévu. Si le secteur concerné est de faible étendue, l'enlèvement (manuel) des grosses particules peut être envisagé.

Exemple : Granulat d'apport disponible : granulats concassés 5-28

	Ouverture des tamis					
	40	28	14	5	315 µm	80 µm
Calibre 5-28	100	100	62	7,0	3,0	2,5

Le concepteur doit également préciser sur quelle épaisseur la correction de la granularité s'applique. Le tableau 5.3-3 indique l'épaisseur minimale à corriger pour différents cas.

Tableau 5.3-3
Épaisseur à corriger

	Épaisseur stabilisée	Épaisseur de la couche à corriger
Avec stabilisation	100 mm	150 mm
	150 mm	200 mm
Sans stabilisation	Corriger toute l'épaisseur décohesionnée	
Rechargement granulaire	La correction de la couche décohesionnée est facultative. La nature des matériaux de même que l'envergure de la non-conformité doivent être considérées.	

– Méthode de calcul

La méthode proposée a pour but de déterminer la quantité (épaisseur) de granulats d'apport nécessaire pour corriger la granularité des matériaux décohesionnés sur une épaisseur déterminée.

Dans le but de limiter les comportements différentiels provenant de la partie supérieure de la chaussée, il est préférable que l'épaisseur de la couche après correction soit constante sur tout le projet. Compte tenu de la variabilité des matériaux, la quantité de granulats d'apport requise pour rétablir la granularité diffère d'un secteur à l'autre. Le calcul des quantités doit donc être effectué pour chaque secteur uniforme.

Le principe de la méthode consiste à évaluer la quantité de granulats qui, une fois incorporée au matériau décohesionné, permet d'obtenir une couche d'épaisseur constante après compactage.

Équation (1) : $E_p(A) + E_p(B) = E'_{cor}$.

$E_p(A)$: Épaisseur de matériaux décohesionnés (mm).

$E_p(B)$: Épaisseur de granulats d'apport (mm).

E'_{cor} : Épaisseur de la couche « corrigée » après compactage.

Compte tenu des variations de la masse volumique du matériau après ajout des granulats de correction, la valeur E_{cor} doit être corrigée.

$$E'_{cor} = E_{cor} * F_c$$

où

E_{cor} : Épaisseur de la couche corrigée (voir tableau 5.3-3),

$$F_c = \frac{\gamma_{\text{matériau décohesionné après correction (kg/m}^3\text{)}}}{\gamma_{\text{matériau décohesionné avant correction (kg/m}^3\text{)}}}$$

$$F_c \approx 1,05$$

Exemple : $E'_{cor} = 200 \text{ mm} \times 1,05 = 210 \text{ mm}$
d'où :
Eq(1) : $E_p(A) + E_p(B) = 210 \text{ mm}$.

La quantité de granulats d'apport s'évalue pour chaque tamis non conforme selon l'équation (2).

Équation (2) :

$$\left[\frac{E_p(A)}{E'_{cor}} \times (\% \text{ passant } X) \right] + \left[\frac{E_p(B)}{E'_{cor}} \times \frac{\gamma_{apport}}{\gamma_{déco.Av.}} \times (\% \text{ passant } X) \right] = \% \text{ passant } X$$

Matériaux décohesionnés + Granulats d'apport

où

% passant X : % passant visé au tamis (Xmm) après correction,

γ^* apport : masse volumique du granulat d'apport (lors de l'épandage),

$\gamma_{déco. Av.}$: masse volumique du matériau décohesionné avant correction.

* Le tableau 5.3-4 fournit, à titre indicatif, les caractéristiques de matériaux susceptibles de combler les déficiences.

Exemple : non-conformité au tamis 5 mm

$$\left[\frac{E_p(A)}{210 \text{ mm}} \times 60,4 \% \right] + \left[\frac{(210 - E_p(A))}{210 \text{ mm}} \times \frac{1660 \text{ kg/m}^3}{2150 \text{ kg/m}^3} \times 7,0\% \right] = 50 \% \text{ passant visé}$$

$$0,288 E_p(A) + 5,40 - 0,0257 E_p(A) = 50 \%$$

$$E_p(A) = 170,0 \text{ mm}.$$

Dans l'équation (1) :

$$E_p(A) + E_p(B) = 210.$$

$$E_p(B) = 210 - 170 \text{ mm d'où}$$

$$E_p(B) = 40 \text{ mm}.$$

Il est important de noter que la quantité de granulat d'apport est directement reliée au pourcentage passant visé. Il est préférable que ce pourcentage passant visé au tamis 5 mm soit au minimum 5 % inférieur à la limite supérieure exigée. Une valeur de 7 % est utilisée pour une estimation plus sécuritaire. On vérifie ensuite pour tous les tamis le pourcentage passant après l'ajout du granulat d'apport.

Tableau 5.3-4
Granulat de Correction

Région	Calibre (mm)	Granulométrie* (mm)						Masse vol. tassée (kg/m ² /mm)	Masse vol. non tassée (kg/m ² /mm)	Géologie
		n	28	20	14	5	0,08			
Estrée	20-5 28-14	6	100	99	51	2	0,75	1,636	1,460	Appalaches
Coeur du Québec	20-5 28-14	6	100	64	7	2	1,0	1,589	1,412	Basses-terres du Saint-Laurent
		5	100	95	47	3	1,0	1,581	1,397	
Monterégie	20-5 28-14	1	100	58	7	2	1,1	1,548	1,357	Basses-terres du Saint-Laurent
		3	100	96	62	3	1,0	1,597	1,414	
Abitibi-Témiscamingue	20-5 28-14	1	100	86	9	1	0,2	1,367	1,202	Grenville supérieur
		3	100	97	60	4	0,8	1,643	1,505	
Laurentides	20-5 28-14	N/D								Grenville
		2	100	98	65	3	1	1,537	1,368	
Chaudière-Appalaches	20-5 28-14	2	100	95	35	2	0,7	1,544	1,367	Appalaches
		7	100	94	50	3	0,8	1,595	1,418	
Outaouais	20-5 28-14	1	100	87	8	0	0,4	1,570	1,388	Basses-terres du Saint-Laurent
		3	100	97	67	3	0,9	1,566	1,391	
Lanaudière	20-5 28-14	N/D								Basses-terres du Saint-Laurent
		1	100	86	32	5	3,9	1,669	1,473	

* Granulométrie moyenne de n échantillons
N/D = non disponible

Proportion de granulats d'apport : $\frac{H1}{(H1 + H2)}$.

Exemple :

$$\frac{40 \text{ mm}}{(40 \text{ mm} + 170 \text{ mm})} = 19 \text{ \%}$$

Proportion de granulats d'apport = 19 %.

Proportion de matériau décohesionné : 81 %.

	40 mm	28 mm	14 mm	5 mm	315 µm	80 µm
Proportion de :						
Granulats d'apport : 19 %	19,00	19,00	11,78	1,33	0,57	0,48
Matériau décohesionné : 81 %	81,00	76,95	67,39	48,92	8,99	7,05
Mat. corrigé	100	95,95	79,17	50,24	9,56	7,52
Exigence min.	100	80	50	25	5	3
Exigence max.	100	100	40	55	20	10
Conformité (O/N)	O	O	O	O	O	O

Le taux d'application des granulats d'apport, exprimé en kg/m², est évalué à l'aide de l'équation (3). Pour ce calcul, il est recommandé d'utiliser la masse volumique non tassée (voir tableau 5.3-4).

Exemple :

Équation (3) :

$$\begin{aligned}
 \text{Taux d'application (kg/m}^2\text{)} &= \text{Épaisseur x masse volumique} \\
 &\quad \text{correction (mm)} \quad \text{(kg/m}^2\text{/mm)} \\
 &= 40 \text{ mm} \quad \times \quad 1,410 \text{ kg/m}^2\text{/mm} \\
 &= 56,4 \text{ kg/m}^2 \text{ (arrondir à l'unité)} \\
 &= 56 \text{ kg/m}^2
 \end{aligned}$$

Pour le calcul du tonnage total pour le secteur concerné, il est recommandé, dans le cas où il y a stabilisation, de prévoir les quantités pour corriger la granulométrie sur la pleine largeur à stabiliser. Par contre, s'il n'y a pas de stabilisation, la correction peut se limiter à la largeur des voies plus 600 mm de chaque côté.

Dans l'exemple, la correction de la granularité se résume comme suit :

- 1) Épandre le granulat d'apport (γ non tassé : 1 410 kg/m³) sur une épaisseur de 40 mm sur un matériau décohesionné et densifié à une masse volumique de 2 150 kg/m³.
- 2) Malaxer le matériau sur une profondeur de 210 mm et densifier à une masse volumique de 2 250 kg/m³.
- 3) Après compactage, la couche de matériau décohesionné et corrigé aura 200 mm. Le pourcentage passant au tamis 5 mm devrait se situer à près de 50 %.

Plusieurs facteurs influencent la précision de l'estimation dont les hypothèses de calcul, les masses volumiques des matériaux, l'uniformité des secteurs et les taux de pose. Il est important de

s'assurer lors des travaux que la méthode utilisée pour l'épandage des granulats permet d'obtenir une couche d'épaisseur constante (voir ch. 7).

5.4 Autres points à préciser lors de l'étude préliminaire

Dans le but de faire une estimation des coûts la plus juste possible et d'éviter des problèmes lors de la réalisation des travaux, certains travaux connexes doivent être effectués. L'état de la pratique actuelle permet de justifier les types de travaux préparatoires suivants :

- Dans le but de connaître en tout temps lors des travaux la position de ligne de centre, débuts et fins de courbe, etc., il est recommandé d'implanter une ligne d'opération (piquets décalés) en bordure de l'accotement. Les piquets sont localisés aux limites des accotements à tous les 20 m. Le dégagement par rapport à la ligne de centre ainsi que les pentes transversales sont inscrits sur le repère. Ces travaux sont utiles au moment des appels d'offres et facilitent la localisation de diverses caractéristiques observées sur la chaussée. Il est important de s'assurer au début des travaux que tous les repères sont en bon état.
- Le retraitement en place d'une chaussée permet de légères corrections des profils longitudinaux et transversaux. Il est recommandé lors de la préparation du projet de vérifier la conformité des profils (pentes), de déterminer les secteurs à corriger et d'estimer les quantités de matériaux requis. La correction de devers et le rajustement des pentes des accotements peut nécessiter un apport de nouveaux matériaux.
- Dans le but d'assurer un comportement uniforme de la partie supérieure de la chaussée, il est recommandé d'utiliser un matériau ayant un contenu en g.b. semblable à celui des matériaux décohesionnés. Une partie des résidus de planage peut donc être réutilisée en s'assurant que le mélange de résidus et de granulats vierges soit homogène. L'utilisation des engins servant au décohesionnement permet généralement d'obtenir un matériau homogène.
- Les bordures en béton bitumineux sont souvent en mauvais état et ne peuvent être laissées en place lors des travaux. Elles ne peuvent généralement pas être décohesionnées avec les équipements de décohesionnement et leur enlèvement doit être prévue. La réutilisation de ces résidus est traitée au chapitre 6.
- Le rehaussement du profil est fonction, bien sûr, de l'option choisie et de l'épaisseur de revêtement enlevé par planage. Il peut s'avérer nécessaire de déplacer ou de remplacer les glissières de sécurité sur certains secteurs. Ces secteurs doivent être localisés lors de l'étude préliminaire.
- Le rehaussement du profil se traduit par une réduction de la largeur de la plate-forme. À titre d'exemple, un rehaussement de 200 mm entraîne une réduction de la largeur des accotements de 400 mm de chaque côté, si on considère la pente des talus constante de 1V:2H. Il est donc essentiel d'évaluer la largeur des accotements, des voies de roulement et des ponceaux afin de préciser les possibilités de rehausser le profil et/ou d'élargir la plate-forme (de déplacer les fossés) selon l'emprise disponible.
- Lors de la préparation du devis, il est important de mentionner si l'entrepreneur doit détourner la circulation sur une autre route ou sur les accotements, ou s'il doit aménager une route de déviation. Le détournement de la circulation pendant la période de cure s'applique surtout aux véhicules lourds et les jours de pluie.

5.5 Réutilisation des résidus de planage

Tel qu'il est décrit à la section 5.3.1, le planage de l'ancien revêtement est parfois nécessaire avant le décohesionnement de la chaussée. Lors de la préparation d'un projet, la réutilisation ou le rejet des résidus bitumineux doivent être précisés.

Techniques disponibles

• Recyclage à chaud en centrale

L'utilisation de cette technique est courante au Canada (Emery J., 1991). Elle permet de fabriquer des enrobés de qualité comparable à des enrobés conventionnels à des coûts avantageux. Le C.C.D.G. spécifie que la proportion maximale de résidus bitumineux incorporée lors de la fabrication de mélange à chaud est de 20 % pour les couches de roulement et de 40 % pour les couches de base. Cette technique n'est pas autorisée pour la fabrication d'enrobé pour les autoroutes.

• Recyclage à froid

Les techniques de fabrication à froid d'enrobé en centrale ou en place permettent la réutilisation d'une quantité importante de résidus. Les différentes particularités propres à cette technique, son domaine d'utilisation, la fabrication et la mise en oeuvre, doivent être considérés. L'approche la plus courante consiste à stabiliser le résidu bitumineux préalablement tamisé ($D_{\max}$ 37,5 mm) à l'aide d'une émulsion de bitume conventionnel (CSS-1, SS-1) ou à haute flottaison (HF). Des émulsions contenant des polymères ou des agents régénérateurs sont également utilisées (voir MS-21, Asphalt Inst.). La pose de ces enrobés est effectuée à l'aide d'un finisseur; le compactage est souvent difficile à basse température. La variabilité des propriétés du matériau entraîne une certaine imprécision en ce qui concerne le dimensionnement. Les travaux de Lafond J.-F. (1993) et de Bradbury A. (1991) apportent des précisions concernant cet aspect. Les enrobés fabriqués à l'aide de résidus sont généralement utilisés comme couche de base pour des routes à faible et moyen débits.

• Matériaux de déblai de 2^e classe

Le C.C.D.G. prévoit la réutilisation de revêtement bitumineux lorsque ce dernier est réduit en fragment de 300 mm ou moins.

• Matériaux granulaires

Les résidus de planage ont généralement une granulométrie étalée et un diamètre nominal de 40 mm. Les résultats de projets expérimentaux du MTQ tendent à indiquer que l'utilisation de résidus de planage comme matériaux de fondation conduit à des performances variables et dans la plupart des cas non satisfaisantes (Gagner *et al.*, 1987). Les travaux de Lupien C. (1987) indiquent que les propriétés de matériaux composés de résidus de planage sont généralement inadéquates comme matériaux de fondation. Cependant, des matériaux composés à la fois de matériaux vierges et de granulats bitumineux ont un potentiel d'utilisation plus élevé comme matériaux de fondation et de sous-fondation (Bergeron *et al.*, 1994), (Senior, 1993). Le domaine d'emploi du matériau varie selon le calibre du matériau, la nature du matériau vierge, la proportion de granulat bitumineux et le type de route. L'utilisation des résidus de planage comme matériau granulaire (100 %) pour le rechargement d'accotements ou d'entrées privées gravelées peut s'avérer une option économique.

Dans le cas où aucune des approches décrites ci-dessus ne peut être retenue, la mise en réserve ou au rebut des résidus doit être envisagée. À cet égard, le règlement sur les déchets solides (Q-2.r.14) s'applique. Pour plus d'informations concernant le règlement en vigueur, communiquer avec votre direction régionale du ministère de l'Environnement et de la Faune.

Chapitre 6

Stabilisation, liants disponibles et formulation

La stabilisation de matériaux granulaires dans le domaine des chaussées est une pratique courante depuis plusieurs années, un peu partout à travers le monde. Les liants utilisés varient selon le type de matériaux à traiter, son utilisation et, bien sûr, selon sa disponibilité et son efficacité. Les travaux de Terrel et Epps (1974) apportent des informations sur les différents liants utilisés pour la stabilisation de matériaux granulaires, les critères de choix des liants, les particularités de mise en oeuvre et de manipulation propres à chaque liant.

Il existe deux types de liants, les liants chimiques et les liants hydrocarbonés. Les liants de type chimique, une fois incorporés au matériau et à l'eau, produisent une réaction entraînant la modification ou la formation de nouvelles phases minérales. À titre d'exemple, citons les liants hydrauliques tels que le ciment Portland et les cendres volantes. Les liants hydrocarbonés comme le bitume réagissent avec l'agrégat selon ses propriétés de surface, sans qu'il y ait modification de sa composition.

Dans les deux cas, l'ajout d'un liant a pour effet d'augmenter la cohésion entre les grains et les propriétés mécaniques du matériau dans son ensemble (résistance en compression, traction, etc.). Cela se traduit par une capacité accrue du matériau à distribuer les contraintes auxquelles il est soumis, d'où l'intérêt de stabiliser les matériaux composant la structure de chaussée. L'ajout de liant est caractérisé généralement par une diminution de la perméabilité du matériau. De plus, la stabilisation d'un matériau granulaire a pour effet de limiter les fluctuations de ses propriétés mécaniques en fonction des variations du contenu en eau.

Au Québec, les liants les plus utilisés pour la stabilisation de matériaux provenant du retraitement d'une chaussée sont les liants hydrocarbonés (les émulsions de bitume, le bitume moussé) et, dans quelques cas, le chlorure de calcium (CaCl_2).

Les sections qui suivent donnent une brève description des propriétés des liants ainsi que les avantages et inconvénients reliés à leur utilisation.

6.1 Liant chimique : chlorure de calcium (CaCl_2)

L'utilisation du CaCl_2 comme abat-poussière est une pratique courante au Québec depuis de nombreuses années. On l'a aussi utilisé pour la stabilisation de matériaux de fondation.

Le chlorure de calcium est un produit chimique hygroscopique et déliquescent. Sous certaines conditions de pression atmosphérique et d'humidité relative, il absorbe ou libère une quantité d'eau contenue dans le sol et dans l'air ambiant. Le CaCl_2 peut également se dissoudre partiellement. En solution, le CaCl_2 augmente la tension de vapeur de l'eau et en retarde son évaporation; il modifie le film d'eau entre les particules en donnant une meilleure cohésion que l'eau pure.

Dans le sol, le CaCl_2 lubrifie les particules fines, ce qui facilite la mise en place et le compactage. Les liens chimiques avec les particules fines sont influencés par la nature des particules ainsi que par leurs propriétés de surface. Les particules argileuses (phyllosilicates) rendent possible des échanges ioniques avec le CaCl_2 assurant ainsi un lien plus durable. L'indice de plasticité et l'essai au bleu de méthylène donnent un aperçu du contenu en minéraux argileux. En présence de minéraux calcaires (CaCO_3) et très riche en quartz (SiO_2), la rétention du CaCl_2 est moins bonne.

Les matériaux de fondation souhaitables pour une stabilisation au CaCl_2 doivent rencontrer les exigences granulométriques suivantes :

Tamis	% passant
40 mm	100
5 mm	35-70
80 μm	4-20

Note : L'indice de plasticité (I_p) et la limite de liquidité (L.P.) doivent être respectivement inférieurs à 20 % et 25 %.

L'ajout de CaCl_2 modifie également la température de congélation de l'eau capillaire, ce qui a pour effet de diminuer la gélivité du sol traité. Après des essais en laboratoire, Floyd (1941) a observé que l'ajout de 1 % de CaCl_2 est suffisant pour empêcher le sol de se dégrader sous l'effet du gel.

Le CaCl_2 est ajouté en solution avec une concentration de 35 % ou en flocons (CaCl_2 : 77 %) lorsque le matériau à stabiliser a une teneur en eau élevée. Lors de la stabilisation d'une fondation de 100 mm d'épaisseur, on répand généralement entre 3,5 et 4,5 l/m^2 soit environ 1 % en poids de CaCl_2 par rapport aux granulats. Après le malaxage, la mise en forme et la densification, on épand en surface un deuxième passage d'environ 1 l/m^2 de stabilisant.

Aucune méthode de formulation en laboratoire n'a encore été développée pour ce type de liant. Il est souhaitable d'évaluer en laboratoire la masse volumique et la teneur en eau optimale (Proctor modifié) du matériau après l'ajout de 1 % de CaCl_2 . Ces essais permettent d'estimer la teneur en eau requise en chantier avant l'ajout du liant (65 % d'eau). En général, la teneur en eau avant l'ajout du liant doit se situer entre 1 % et 1,5 % sous la teneur en eau optimale.

À la suite de l'étape de stabilisation en chantier, le gain de résistance est plutôt lent et évolue pendant plusieurs semaines. Selon Gill et Jenkins (1990), celui-ci devient perceptible de façon notable 48 jours après la fin des travaux. On recommande généralement une période d'attente minimale de 10 à 15 jours avant la pose du revêtement. La cure est influencée par les conditions climatiques; d'ailleurs, il n'est pas recommandé d'effectuer des travaux à des températures inférieures à 12 °C. En présence de forte pluie, la cure est lente et une partie du liant en solution peut être entraînée par ruissellement.

Jusqu'à présent, peu de projets de stabilisation au CaCl_2 ont été effectués au Québec. Ces projets concernent des routes à faible débit dont le DJMA est inférieur à 500 véhicules/jour.

6.2 Liant hydrocarboné

À ce jour, les liants hydrocarbonés sont les plus utilisés pour la stabilisation des matériaux provenant du retraitement en place d'une chaussée. Les sections qui suivent donnent une description des types de liants hydrocarbonés utilisés, soit les émulsions et le bitume moussé ainsi que des particularités reliées au transport et à l'entreposage de ces produits. La dernière sous-section est consacrée à la méthode de formulation en laboratoire.

6.2.1 Définition et types d'émulsion

Les émulsions de bitume sont décrites comme étant un système hétérogène contenant une phase continue (eau pour une émulsion directe) dans laquelle il y a une deuxième phase dispersée sous forme de gouttelettes (bitume pur ou fluxé). Le bitume est maintenu en suspension dans l'eau par l'action d'au moins un agent émulsifiant (cationique ou anionique). Une fois en contact avec les gra-

nulats, les gouttelettes de bitume coagulent, et l'eau commence à s'évaporer. Par la suite, les solvants se volatilisent, ce qui se traduit par un durcissement du liant. Lévesque et al. (1988) apporte des précisions sur la composition de divers types d'émulsion ainsi que sur leur fabrication. On classe les émulsions selon la charge électrique du bitume (cationique, anionique) et sa vitesse de rupture. Ainsi selon le type de travaux et la nature des matériaux, le choix du type d'émulsion est déterminant.

L'émulsion choisie doit être compatible avec le granulat afin d'éviter toute répulsion entre le liant et le matériau. On détermine généralement le type d'émulsion lors de la formulation en laboratoire à l'aide d'un test d'enrobage. Il a été observé que certaines émulsions cationiques ont une meilleure adhésion aux granulats de nature siliceuse et que l'utilisation d'émulsion anionique est souhaitable lorsque les granulats sont de nature calcaire (CaCO_3).

L'émulsion choisie doit avoir une vitesse de rupture qui permet à la fois de limiter le temps de cure du matériau tout en conservant la maniabilité de celui-ci pendant les périodes de mise en place et de densification du matériau. Ces conditions sont généralement obtenues lorsque l'on utilise des émulsions à prise moyenne (m) et lente (s). Les émulsions les plus couramment utilisées sont de types CSS-1, SS-1 et CMS-2. Les spécifications concernant ces émulsions sont décrites au C.C.D.G..

6.2.1.1 Entreposage des émulsions

L'étape de stabilisation s'effectue à une vitesse qui peut varier selon l'appareillage utilisé, l'envergure du chantier, les temps d'arrêt reliés à des conditions climatiques défavorables, etc. Il est donc important, compte tenu des propriétés des émulsions utilisées, de s'assurer que les méthodes d'entreposage ne modifient pas la qualité du produit.

Tous les types d'émulsion doivent être protégés du gel, qui provoque la rupture irréversible de l'émulsion. Les températures d'entreposage varient entre 10 °C et 85 °C selon le type d'émulsion. Pour les émulsions à rupture lente SS-1 et CSS-1, la température d'entreposage suggérée est comprise entre 10 °C et 60 °C; elle se situe entre 50 °C et 85 °C pour les émulsions à rupture moyenne (CMS-2).

Une durée de stockage prolongée peut se traduire par différents phénomènes tels que la formation d'une peau à la surface ou la décantation du produit. Le «dégourdissement» du produit peut donc s'avérer nécessaire (Duong, 1992).

6.2.2 Bitume moussé

Le bitume moussé est un bitume de pénétration 150-200 chauffé à une température d'environ 175 °C dans lequel on injecte sous pression 1 % à 2 % d'eau et d'air. Contrairement aux émulsions et aux «cut-back», le bitume moussé ne contient pas de solvant ou il n'en contient qu'en très faible quantité. L'utilisation d'additifs anti désenrobage et d'une faible quantité d'agents émulsifiants est parfois nécessaire. Ce procédé entraîne une augmentation de volume, ce qui se traduit par une viscosité plus faible du liant, une dispersion plus facile dans la masse granulaire et un meilleur enrobage.

En pratique, on caractérise le bitume moussé par son rapport d'expansion et sa demi-vie. Le rapport d'expansion se définit comme étant le rapport entre le volume du bitume moussé et le bitume avant moussage. La demi-vie est le temps nécessaire pour qu'un volume donné de bitume moussé diminue de moitié. Ces caractéristiques sont contrôlées par la quantité d'eau dans le bitume moussé, la température lors du moussage et la température du bitume. Le contrôle de ces paramètres en chantier est déterminant pour assurer un bon enrobage. Le rapport d'expansion est généralement compris entre 10 et 15 et la demi-vie entre 30 et 60 secondes.

La mousse est fabriquée juste avant qu'elle soit incorporée au matériau granulaire. Le bitume est pompé à même la citerne jusqu'à des gicleurs situés dans la chambre de malaxage. Les gicleurs sont spécialement conçus pour admettre le bitume, l'eau et l'air selon des quantités contrôlées.

Le bitume moussé contient une faible quantité d'eau (par rapport aux émulsions), ce qui contribue à écourter la cure du matériau. Des travaux de recherche ont permis de préciser que la capacité de support d'une chaussée traitée au bitume moussé évolue rapidement au cours du premier mois suivant les travaux.

6.2.3 Autres liants et liants composites

Il existe d'autres types de liants provenant, dans certains cas, de résidus de différents procédés industriels. Par exemple, les cendres volantes issues de la combustion du charbon sont couramment utilisées en Europe pour la stabilisation de granulats de fondation et d'assises de chaussées. Il en est de même pour les pouzzolanes et les laitiers de hauts fourneaux. On utilise souvent une combinaison de liants comme les pouzzolanes - chaux ou ciment (voir norme française NFP 98-117). À l'exception du ciment et de la chaux, ces liants ne sont pas disponibles au Québec.

Ces liants sont dits «hydrauliques», puisqu'ils réagissent avec l'eau (hydratation) pour former une matrice plus rigide, assurant ainsi la cohésion entre les particules. La cure de matériaux traités avec des liants hydrauliques est associée inévitablement à un retrait du matériau provoquant la formation de fissures. Dans le contexte québécois, ce phénomène conjugué aux effets du gel/dégel, de l'infiltration d'eau et de la saumure (sels déglacants) engendrent une dégradation rapide du matériau à proximité des fissures et, par conséquent, un mauvais comportement de la chaussée. D'ailleurs, les quelques projets de stabilisation au ciment réalisés au Québec ont donné de très mauvais résultats. Cela explique la faible popularité de la stabilisation de fondation avec des liants hydrauliques, ce qui semble le cas dans la plupart des pays nordiques où l'on utilise de plus en plus des liants composites permettant de bénéficier du liant hydrocarboné (souplesse) et du liant hydraulique (résistance élevée). Les matériaux ainsi stabilisés ont un module de déformation plus élevé et des propriétés mécaniques moins influencées par les variations de température. L'utilisation de liants composites est en développement, et les quelques projets réalisés au Québec sont expérimentaux.

La présence de liant hydraulique en faible quantité pourrait s'avérer bénéfique pour diminuer le temps de cure du matériau ou pour en augmenter les propriétés mécaniques à court terme. En effet, une certaine quantité d'eau contenue dans le matériau sert à hydrater le ciment ou la chaux. Les projets de recherche et les suivis en cours permettront de mieux cibler les domaines d'utilisation de ces liants (trafic, matériaux) et de préciser leur impact sur le comportement de la chaussée.

6.3 Méthode de formulation

La méthode de formulation décrite dans ce chapitre a été développée au ministère des Transports dans le cadre d'un projet de recherche (Loisel *et al.*, 1995). Cette procédure doit être utilisée pour déterminer les caractéristiques des matériaux (pourcentage d'ajout de liant, densité, etc.) lorsque la stabilisation à l'aide d'un liant hydrocarboné est prévue.

Cette procédure est présentée à l'**annexe A**.

Chapitre 7

Déroulement des travaux de retraitement

7.1 Réunion de chantier

Lors de la première réunion de chantier, les points suivants doivent être discutés en présence de l'entrepreneur, des surveillants et des responsables de l'assurance qualité.

- Organisation d'une visite du site des travaux.

Visite conjointe des lieux permettant d'éclaircir certains points et de limiter la désorganisation pendant le déroulement des travaux.

- Discussions et commentaires sur les études préliminaires.

Évaluation des données de l'étude et des impacts potentiels sur le déroulement des travaux.

- Dates de début et de fin des travaux.

- Horaire de travail du maître d'oeuvre.

- Méthode de travail :

Le maître d'oeuvre doit présenter la séquence des opérations et fournir un calendrier des travaux.

- Planage :
 - équipements utilisés, secteurs à planer, épaisseurs;
 - réutilisation et transport des résidus.

- Décohésionnement :

- équipement utilisé, profondeur, largeur;
- équipements utilisés pour la mise en forme et le compactage.

- Apport granulaire :

- détermination (conjointe) du type et de la quantité selon la méthode décrite à la section 5.3.3;
- sources;
- méthode d'épandage et de malaxage.

- Stabilisation :
 - fournisseur du liant;

- formulation : laboratoire, délais requis.

- Signalisation :

- préciser la planche de signalisation (*Guide de la signalisation routière*) en regard des spécifications de l'article 5.2 du devis D-1199
- si des travaux sont prévus la nuit, vérifier la nécessité d'une signalisation particulière.

7.2 Attention particulière à porter lors des travaux

Tel qu'il est décrit à la section 3.1, les travaux de retraitement en place comprennent différentes étapes distinctes effectuées de façon séquentielle.

- Ces étapes sont :
- le planage;
 - le décohesionnement de la chaussée;
 - la mise en forme et le compactage;
 - la correction de la granulométrie;
 - la stabilisation;
 - la mise en forme et le compactage final.

Selon l'option choisie et les caractéristiques du site, certains de ces travaux ne sont pas requis.

Pour chacune de ces étapes, le *guide de contrôle* (Annexe B) prévoit différents points de contrôle selon des cadences spécifiques. Cependant, l'état actuel des connaissances permet de préciser que certains aspects doivent faire l'objet d'une surveillance plus étroite voire de précautions particulières lors des travaux. Ces aspects peuvent avoir des impacts directs sur la qualité des travaux et sur le comportement ultérieur de la chaussée. Les sections suivantes traitent donc, pour chacune des étapes, de ces différents points en précisant les éléments que le maître d'oeuvre et le surveillant doivent considérer.

Nettoyage des accotements

- Comme le prescrit le devis D-1199, l'enlèvement de la terre végétale sur les accotements est requis avant le début des travaux de décohesionnement. Dans le cas contraire, il y a risque de contamination des matériaux décohesionnés lors des opérations de nivelage.

Planage

- Cette étape consiste à enlever la surépaisseur du revêtement avant le décohesionnement de la chaussée. Les journaux de chantier doivent contenir les chaînages des secteurs planés afin de vérifier si ce sont les mêmes que ceux préétablis lors de l'étude préliminaire. Une vérification périodique de l'épaisseur planée à une cadence minimale de **1 point de mesure / 100 m/bande** est requise. On obtient l'épaisseur planée en mesurant l'épaisseur de l'enrobé adjacent à la surface planée. Rappelons que l'étape du planage a une conséquence directe sur la proportion de granulats bitumineux qui se retrouve dans le matériau décohesionné (50 % g.b. max.).
- Si la réutilisation des résidus de planage est prévue (sur le site ou ailleurs), des articles devront être ajoutés au devis et au bordereau. Si l'article au bordereau «planage, nettoyage de la surface, transport et mise en réserve du revêtement bitumineux récupéré» est choisi, spécifier au devis l'endroit où les résidus de planage devront être transportés et mis en réserve.
- Comme il est mentionné dans le devis type (D-1199), le balayage de la surface planée avant le décohesionnement de la chaussée peut s'avérer nécessaire afin d'enlever les résidus fins et les poussières pouvant contribuer à augmenter le contenu en particules fines dans le matériau décohesionné. Ces résidus provenant du balayage doivent être enlevés et transportés. Ce point doit être précisé lors de la réunion de chantier.

Décohesionnement

Le guide de contrôle prévoit plusieurs points afin de vérifier la profondeur de décohesionnement, la grosseur maximale des particules et le ratio en g.b. Certaines pratiques ont été développées afin de respecter les exigences du devis.

- La granulométrie du matériau décohesionné varie en fonction de l'équipement utilisé et de sa vitesse d'avancement. Il est recommandé en début de travaux de décohesionner la chaussée selon différentes vitesses d'avancement (secteur d'environ 50 m) afin de choisir la méthode de travail permettant d'obtenir un matériau dont le diamètre maximal est inférieur à 40 mm. Cette approche permet de relier les propriétés du matériau décohesionné à la vitesse d'avancement, laquelle doit être vérifiée tout au long du projet.
- Le ratio maximal de g.b. est fixé à 50 %. Au chantier, le mélange doit être homogène et de couleur brune ou noire. Lors de la première passe, il est recommandé d'inscrire l'épaisseur du revêtement sur la surface à une fréquence minimale de 50 m. Le contrôleur peut ainsi s'assurer que la profondeur de décohesionnement fixée lors de l'étude préliminaire est maintenue ou modifiée. Les grosses particules peuvent être enlevées manuellement et déposées sur la bande adjacente; elles seront fragmentées lors du passage de l'équipement de décohesionnement.
- Lors de l'échantillonnage de matériaux décohesionnés et de la détermination de la profondeur de décohesionnement, le fond du trou d'échantillonnage doit être composé de granulats vierges et non de l'ancien revêtement.
- Afin de limiter l'infiltration d'eau dans le matériau décohesionné, il est recommandé de densifier le matériau le plus tôt possible, notamment avant des précipitations.

Correction de la granulométrie

- À partir des résultats des essais de granulométrie du matériau décohesionné, la quantité et le type de granulats d'apport doivent être estimés par le MTQ, puis par le maître d'oeuvre, selon la méthode décrite au chapitre 5.
- La méthode d'épandage des granulats doit permettre d'obtenir une épaisseur constante (± 15 mm). L'utilisation d'un épandeur à gravier pour traitement de surface semble adapté pour ce type de travaux.

Stabilisation

- Il est recommandé d'effectuer les corrections de profil avant l'étape de stabilisation. Les corrections du profil après stabilisation se traduisent par une variation de l'épaisseur de matériau stabilisé d'où un comportement différentiel possible de la chaussée.
- L'ajout du liant (émulsion de bitume) entraîne une augmentation du contenu en eau dans le matériau. Ce point est déterminant pour la durée de la période de cure et doit être considéré avant l'ajout du liant. En général, la teneur en eau du matériau doit être telle qu'après l'ajout du liant, la teneur en eau est égale ou légèrement inférieure à la teneur en eau optimale. En pratique, la stabilisation peut commencer lorsque la teneur en eau se situe entre 2,5 % et 3,5 %. Les résultats de l'étude de formulation permettent de préciser le teneur en eau nécessaire à un enrobage adéquat; ce point doit être considéré avant le début de la stabilisation.
- La manipulation de liant hydrocarboné pour des travaux de stabilisation à froid n'est pas recommandée lorsque la température est inférieure à 10 °C. À faible température, l'enrobage des granulats est moins efficace et le temps de cure est prolongé. Les relevés statistiques des températures indiquent que, dans la vallée du Saint-Laurent, les risques de température inférieure à 10 °C sont plus élevés après le 15 septembre. La réalisation de travaux de stabilisation en automne s'avère donc hasardeuse et plus risquée quant au comportement de la chaussée retraitée.
- La quantité de liant ajouté a des conséquences directes sur le comportement du matériau à court et à long terme; le taux de pose doit être le plus uniforme possible, tout en respectant la formulation. Aux fins de contrôle, il est courant de noter pour chaque citerne la quantité de liant utilisé et de calculer la surface à stabiliser. Un suivi serré selon cette approche permet de limiter les irrégularités en ce qui a trait à la quantité de bitume total (voir *Guide de contrôle*, annexe B).

- Comme il est mentionné au devis D-1199, le compactage doit commencer dès que possible après l'ajout du liant. Ce point semble avoir des conséquences sur l'énergie requise pour atteindre le compactage désiré. En effet, par temps chaud et venteux, la rupture de l'émulsion se produit plus rapidement, ce qui rend le compactage du matériau plus difficile. Les sections stabilisées doivent donc être densifiées selon les exigences du devis dans la même journée de travail.
- Les joints (transversaux) de départ et d'arrêt sont souvent caractérisés par une dose excessive de liant. Ces secteurs montrent parfois des signes d'instabilité. Dans un tel cas, l'aération du matériau permet d'entreprendre la cure du liant. Dans le cas où cette approche semble inefficace, l'enlèvement des matériaux et le remplacement de ceux-ci doivent être envisagés. L'utilisation d'un matériau semblable au matériau adjacent (50 % g.b.), stabilisé en place ou à un autre endroit, est souhaitable.
- Lors de la stabilisation d'une bande adjacente à une déjà stabilisée, une attention particulière doit être apportée pour éviter le recouvrement de liant. Il est conseillé d'effectuer un malaxage des matériaux à proximité des joints. On utilise, dans certains cas, un appareil moins puissant et moins large. Cette technique est également applicable pour les joints transversaux et autour des utilités publiques.

Mise en forme et compactage final

Selon le devis, le compactage doit permettre d'atteindre une densité égale ou supérieure à 94 % de la densité brute obtenue en laboratoire, selon la norme NQ 2300-040 «Mélange bitumineux - Détermination de la densité brute des mélanges bitumineux densifiés».

- La réalisation d'une planche d'essai permet d'établir la séquence de compactage la plus efficace ainsi que la sélection des équipements compacteurs. L'évolution de la compacité en fonction du nombre de passage des engins compacteurs est évaluée à l'aide d'un nucléodensimètre; la procédure à suivre est décrite à la section 3.8 du *Guide de contrôle technique Sols et Granulats*. Dans le cas où il n'y a pas de stabilisation, la procédure à suivre pour la réalisation de la planche d'essai est mentionné au devis.
- Lors de la réalisation de la planche d'essai, il est important de vérifier si la séquence de compactage choisie ne favorise pas la remontée du liant en surface (pompage). Un tel cas est souvent associé à un taux d'épandage ou une teneur en eau trop élevés ainsi qu'une énergie de compactage excessive.

Contrôle de la poussière

- Bien que les surfaces stabilisées ne représentent pas un problème particulier, l'épandage d'eau est généralement une pratique courante pour limiter le soulèvement de poussière lors de travaux. Dans le cas où la surface a été stabilisée, l'ajout d'une trop grande quantité d'eau peut se traduire par un prolongement de la période de cure et contribuer ainsi à l'arrachement de particules. L'ajout d'eau sur ces surfaces doit donc être réduit au minimum.

Chapitre 8

Contrôle de la qualité

Lors de travaux de retraitement en place, une procédure de contrôle adaptée à ce type de travaux doit être utilisée. Divers essais et vérifications sont prévus à chacune des étapes en chantier. La procédure de contrôle est présentée à l'**annexe B**.

Bibliographie

Asphalt Cold Mix Recycling, The Asphalt Institute Manual Series no 21 (MS-21), March 1983.

Bergeron, G. et Martineau, B. (1995), Réutilisation des résidus de béton bitumineux, Étude du comportement mécanique et hydraulique de matériaux granulaires contenant des granulats bitumineux (g.b.), 30^e Congrès annuel de l'Association québécoise des transports et des routes, Hull, Québec.

Bradbury, A. et al. (1991), Evaluation of a cold in-place Recycling project in Ontario, Conférence annuelle de l'Association canadienne des transports, Winnipeg (Manitoba).

Emery, J. (1991), Asphalt Concrete recycling in Canada, Congrès annuel du Canadian Technical Asphalt Association (C.T.A.A.).

Floyd, O.D. 1941, Use of calcium chloride in subgrade soils for frost prevention, Purdue University.

Gagner, R., Amiri, A. et De Montigny, P. (1987), Étude du comportement structural du granulat bitumineux concassé (GBC), Rapport interne, Service des chaussées, MTQ, Québec.

Gill, M. et Jenkins, R. Full-Depth Reclamation Stabilization techniques with calcium chloride, RTAC Conference, St-John, N.F.

GPR '94, (1994), Proceeding of the Fifth International conference on ground penetrating radar, Volume 1 of 3, June 12-16, Kitchener, Ontario, Canada.

LaFon, Jean-François, (1993), Retraitement à froid des chaussées à l'émulsion de bitume, Méthodologie d'étude, suivi de réalisation et de comportement. Bull, Liaison LCPC (France), no 183, janvier février 1993.

Lévesque, J. (1988), Les émulsions de bitume «généralités applications», SFERB (France).

Loisel, A., Lupien, C. et Martineau, B. (1995), Développement d'une méthode de formulation pour les mélanges décohesionnés et stabilisés à l'émulsion, 30^e Congrès annuel de l'Association québécoise des transports et des routes, Hull, Québec.

Lupien, C. (1987), Caractérisation des propriétés des agrégats fabriqués à l'aide de béton bitumineux concassé et évaluation de quelques utilisations, Département Génie civil, Université de Sherbrooke (Québec).

Proteau, M. (1994), Groupe DJL., Projet d'un devis type : Retraitement en place des chaussées avec liants hydrocarbonés, document non publié.

Senior, S.A. (1992), New development in specification for base materials in Ontario, Compte rendu de la 45^e conférence canadienne de géotechnique, Toronto, paper no 99.

- Savard, Y. (1994), Réutilisation et recyclage de matériaux dans les chaussées, Compte rendu : congrès de la fédération routière internationale, 2-7 juillet, Calgary (Alberta), Canada.
- Terrel, R.L. et Epps, J.O., (1979), Soil Stabilization in pavement structures a user's manual, Vol. 1, 2, U.S. Department of Transportation.

Annexe A

Procédure de formulation



Gouvernement du Québec
Ministère des Transports
Direction Laboratoire des chaussées

MÉTHODE DE FORMULATION À FROID DES MATÉRIAUX RECYCLÉS STABILISÉS À L'ÉMULSION

PROCÉDURE DE LABORATOIRE

JUIN 1996



TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	75
1. OBJET	75
2. DOMAINE D'APPLICATION	75
3. RÉFÉRENCES	75
4. VOCABULAIRE	76
5. PRINCIPE	76
6. APPAREILLAGE	76
6.1 Appareil de malaxage	76
6.2 Compacteur mécanique	77
6.3 Socle de compactage	77
6.4 Moule à éprouvette	77
6.5 Dame de compactage	77
6.6 Fixation pour le moule à éprouvette	77
6.7 Démouleur	77
6.8 Appareil Marshall	77
6.9 Étuve	78
6.10 Bain d'eau	78
6.11 Dessiccateur à vide	78
6.12 Pompe à vide ou trompe à eau	78
6.13 Bain à température constante	78
6.14 Balances	78
6.15 Thermomètres	78
6.16 Appareillage devers	78
7. ÉCHANTILLONS	79
7.1 Essais sur l'émulsion et les granulats recyclés	79
7.2 Reconstitution granulométrique du combiné	80
7.3 Détermination du pourcentage d'eau prémix	80
7.4 Évaluation du pourcentage d'eau optimal à la compaction	82
7.5 Variation de la teneur en bitume	84
8. MODE OPÉRATOIRE	85
8.1 Détermination de la densité brute sèche	85
8.2 Détermination de la stabilité modifiée et de la déformation sur trois éprouvettes utilisées en 8.1	86
8.3 Détermination de la stabilité modifiée et de la déformation après saturation et immersion sous vide	86
8.4 Détermination des densités et des vides	87
8.5 Détermination des densités et des vides sur les éprouvettes utilisées en 8.1, 8.2 et 8.3	87
9. EXPRESSION DES RÉSULTATS	87
9.1 Détermination de la stabilité corrigée	87
10. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	88
10.1 Tendances et relations concernant les données d'essai	88
10.2 Détermination de la teneur en bitume optimale	88
Exemple 1	90
Exemple 2	91
TABLEAU 1	92
TABLEAU 2	93
TABLEAU 3	94
FIGURE 1	95
FIGURE 2	96

INTRODUCTION

La présente procédure est basée sur l'étude des méthodes de formulation Marshall modifiée et illinoise.

1. OBJET

Cette procédure prescrit une méthode de formulation pour les matériaux recyclés stabilisés avec un liant hydrocarboné. Cette méthode de formulation permet de déterminer une quantité optimale de bitume total afin de stabiliser économiquement des matériaux recyclés pour :

- obtenir la force ou la stabilité requise afin de résister à des applications répétées de charges (compression et flexion) sans déformation permanente excessive ou fissuration causée par la fatigue;
- rendre le mélange suffisamment insensible aux effets de l'humidité.

2. DOMAINE D'APPLICATION

La méthode de formulation s'applique aux mélanges à froid émulsion-granulats recyclés. La méthode et les critères d'essais recommandés s'appliquent à des mélanges granulaires composés de granulats recyclés (50 % de granulats minéraux et 50 % de particules enrobées de bitume) et d'un liant hydrocarboné, soit une émulsion ou du bitume moussé. Le matériau a une granulométrie continue dont la grosseur maximale est de 25 mm.

NOTE 1- Le liant utilisé lors de l'élaboration de cette procédure est une émulsion de bitume de type CSS-1.

3. RÉFÉRENCES

Les documents énumérés ci-après, auxquels le texte renvoie, apportent un complément à la présente méthode.

ASTM D244-89	Standard Methods of Testing - EMULSIFIED ASPHALTS.
ASTM D2042-81	Standard Test Method for SOLUBILITY OF ASPHALT MATERIALS IN TRICHLOROETHYLENE.
NQ 2300-020/1987	Mélanges bitumineux - Préparation d'éprouvettes pour la méthode «Marshall».
NQ 2300-040/1987	Mélanges bitumineux - Détermination de la densité brute et de la masse volumique des mélanges bitumineux compactés.
NQ 2300-060/1987	Mélanges bitumineux - Méthode «Marshall» de détermination de la résistance à la déformation d'éprouvettes.
NQ 2300-100/1987	Mélanges bitumineux - Détermination de la teneur en bitume.
NQ 2300-270/1986	Bitumes - Détermination de la pénétration.
NQ 2300-350/1987	Mélanges bitumineux - Analyse granulométrique des granulats.
BNQ 2560-040/1982	Granulats - Analyse granulométrique par tamisage.
BNQ 2560-065/1983	Granulats - Détermination de la densité et de l'absorptivité du granulat fin.
BNQ 2560-067/1983	Granulats - Détermination de la densité et de l'absorptivité du gros granulat.
BNQ 2560-200/1983	Granulats - Détermination par séchage de la teneur en eau.
D-1199/1992	Devis de retraitement en place des chaussées.
Loisel, A.	(1995) Étude et développement des méthodes de formulation en laboratoire des matériaux recyclés décohesionnés-stabilisés, Sherbrooke, 235 pages.

4. VOCABULAIRE

- 4.1 *Bitume ajouté* : quantité de bitume ajouté au combiné lors de la stabilisation.
- 4.2 *Bitume initial* : quantité de bitume présent dans le matériau décohesionné avant la stabilisation.
- 4.3 *Bitume total* : quantité de bitume présent dans le matériau stabilisé ou pourcentage de bitume initial et ajouté.
- 4.4 *Combiné* : mélange selon des proportions déterminées de granulats vierges et de fraisat.
- 4.5 *Densité brute* : rapport de la masse de l'éprouvette à 25° C sur la masse d'eau déplacée par le volume brut ou total de l'éprouvette à la même température.
- 4.6 *Éprouvette* : échantillon de mélange compacté de forme cylindrique, Synonyme : brique.
- 4.7 *Fraisat* : béton bitumineux décohesionné.
- 4.8 *Granulats recyclés* : matériau composé à 50 % de granulats minéraux et à 50 % de particules enrobées de bitume.
- 4.9 *Grosseur maximale* : dimension de l'ouverture de maille du plus petit tamis standard où passent 100 % des particules.
- 4.10 *% d'eau prémix* : quantité d'eau nécessaire au mélange, avant l'ajout de l'émulsion, afin d'obtenir un enrobage adéquat et un bon comportement. L'enrobage est estimé visuellement comme un pourcentage de la surface totale.

5. PRINCIPE

- 5.1 Les différentes caractéristiques du mélange sont déterminées comme suit : pourcentage de bitume dans l'émulsion, densité du combiné, pour ensuite pouvoir réaliser une reconstitution granulométrique du combiné.
- 5.2 Le pourcentage d'eau prémix est estimé visuellement.
- 5.3 Le pourcentage d'eau optimal à la compaction est évalué à partir de quatre pourcentages d'eau et de deux pourcentages d'émulsion différents.
- 5.4 La teneur en bitume optimale est déterminée principalement à l'aide du graphique de la stabilité, avant et après saturation, en fonction du pourcentage de bitume total et, du graphique de la perte de stabilité, en fonction du pourcentage de bitume total.

6. APPAREILLAGE

6.1 Appareil de malaxage

Le malaxeur mécanique doit produire la quantité exigée d'un mélange homogène et bien enrobé dans les délais fixés. Il doit produire une capacité d'au moins 2 500 grammes. Dans le cas de malaxage manuel, il doit être exécuté minutieusement de façon à disperser de manière uniforme l'eau et l'émulsion dans les granulats.

6.2 Compacteur mécanique

Le compacteur mécanique doit être un système mécanique permettant de lever et de laisser tomber un poids curseur, tout en provoquant une rotation de la base de 1/3 de tour à chaque coup. L'appareil doit être boulonné solidement au socle de compactage de telle façon que la plaque métallique de sa base soit horizontale et centrée sur son socle de compactage. L'épaisseur de la plaque métallique doit être de $25 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$. Le compacteur doit être muni d'un dispositif de contrôle du nombre de coup et d'un support permettant de maintenir en place la hausse, le cylindre de moulage et la semelle.

6.3 Socle de compactage

Le socle de compactage doit être composé d'une pièce en bois franc de $50 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ d'épaisseur boulonnée près de la plaque métallique à un bloc de béton dont ses dimensions doivent être $300 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm} \times 750 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ de hauteur. La pièce de bois doit être lamellée, collée et compressée, et doit recouvrir entièrement la face supérieure du bloc de béton. Ce bloc repose sur six coussins d'isolation contre les vibrations dont les dimensions sont d'environ $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 22 \text{ mm}$ d'épaisseur. Ils sont généralement fabriqués de sandwich caoutchouc-liège-caoutchouc. L'ensemble de ce montage doit être placé à l'horizontale.

6.4 Moule à éprouvette

Les cylindres de moulage, les semelles et les hausses doivent bien s'emboîter et les dimensions «H», «I», «J» et «K» de la figure 1 de la norme NQ 2300-020/1987 doivent être respectées. Toutes les autres mesures sont données à titre indicatif seulement.

6.5 Dame de compactage

La dame de compactage est constituée d'un pied dont les dimensions et les caractéristiques sont conformes à la figure 2 de la norme NQ 2300-020/1987. Elle a une masse de $4536 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$ et une hauteur de chute libre de $457 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$. L'utilisation d'au moins deux dames est recommandée.

6.6 Fixation pour le moule à éprouvette

La fixation pour le moule à éprouvette est composée d'un mécanisme à ressort conçu pour tenir le cylindre en place dans le socle de compactage.

6.7 Démouleur

Le démouleur d'éprouvette est constitué d'un système mécanique qui pousse un disque en acier d'un diamètre d'au moins 100 mm et d'une épaisseur minimale de 13 mm . L'utilisateur doit s'assurer de la stabilité du disque lors du démoulage.

6.8 Appareil Marshall

L'appareil Marshall effectue des essais en compression. Sa conception permet d'appliquer des charges à l'aide de mâchoires semi-circulaires. Il est muni d'un vérin pour produire la vitesse d'avancement constante de $50,8 \text{ mm}$ (2 po) par minute, de mâchoires de type Marshall pour l'application de la charge sur les éprouvettes, d'un anneau dynamométrique calibré pour mesurer les charges appliquées et d'un indicateur pour mesurer la déformation à la charge maximale. Voir la section 5 de la norme NQ 2300-060/1987. Une machine d'essai universelle équipée avec des indicateurs de charge et de déformation appropriés peut être utilisée à la place de l'équipement Marshall.

6.9 Étuve

L'étuve doit être munie de commandes thermostatiques afin de maintenir la température requise. Une courbe de calibration doit être établie annuellement si l'étuve est utilisée à différentes températures.

6.9.1 Étuve pouvant maintenir une température de $100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

6.9.2 Étuve avec circulation d'air pouvant maintenir une température de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

6.10 Bain d'eau

Le bain d'eau destiné à l'immersion de l'éprouvette suspendue au plateau de la balance doit être muni d'un orifice de trop-plein pour le maintien de l'eau à un niveau constant. L'eau stable doit être maintenue propre en tout temps.

6.11 Dessiccateur à vide

Le dessiccateur est un récipient en verre incluant une plaque perforée sur laquelle reposent les éprouvettes et un couvercle muni de deux ouvertures.

6.12 Pompe à vide ou trompe à eau

La pompe à vide doit pouvoir atteindre et maintenir une pression résiduelle égale ou inférieure à 100 mm de Hg, à l'intérieur du dessiccateur.

6.13 Bain à température constante

Le bain doit avoir au moins 140 mm de profondeur et doit être muni d'une commande thermostatique et d'un système d'agitation d'eau pour maintenir la température de l'eau à $22,2\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Le réservoir doit avoir un double fond perforé ou une étagère servant de support à éprouvettes afin qu'elles soient à plus de 20 mm au-dessus du fond du bain.

6.14 Balances

6.14.1 Balance ayant une capacité et une sensibilité telles que la densité brute puisse être calculée avec une précision de quatre chiffres significatifs, i.e. trois décimales. Pour satisfaire à cette exigence, la balance doit avoir une précision de $\pm 0,1\text{ g}$.

6.14.2 Balance ayant une capacité minimale de 5 000 g et une sensibilité de 0,5 g.

6.14.3 Balance ayant une capacité minimale de 10 000 g et une sensibilité de 1,0 g, pour les granulats et les mélanges exposés à l'air.

6.15 Thermomètres

6.15.1 Thermomètre en verre gradué à $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour les températures entre $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou dans la plage d'utilisation.

6.15.2 Thermomètre avec tige métallique, gradué à au moins $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour des températures variant de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

6.16 Appareillage divers

6.16.1 Récipients métalliques d'approximativement : 200 mm x 355 mm x 50 mm.

- 6.16.2 Grandes cuillères en métal pour malaxer et pour déposer le mélange dans les moules à éprouvette.
- 6.16.3 Spatules, grandes et petites.
- 6.16.4 Récipient hermétique.
- 6.16.5 Ventilateur électrique.
- 6.16.6 Cylindre gradué de 100 ml.
- 6.16.7 Pelle à main pour déposer les granulats selon les quantités requises.
- 6.16.8 Gants pour manipuler les objets chauds.
- 6.16.9 Gants en caoutchouc pour sortir les spécimens du bain.
- 6.16.10 Craie (industrielle) pour marquer les éprouvettes.
- 6.16.11 Serviette en ratine de coton pour essuyer les échantillons.
- 6.16.12 Disques de papier ciré coupés à la dimension du cylindre de moulage, n'adhérant pas à l'éprouvette et n'ayant subi aucun traitement supplémentaire.

7. ÉCHANTILLONS

7.1 Essais sur l'émulsion et les granulats recyclés

- 7.1.1 Vérifier que l'émulsion respecte les normes ASTM D244-89, NQ 2300-270 et ASTM D2042-81.
- 7.1.2 Déterminer la teneur en bitume dans l'émulsion selon la norme ASTM D 244-89 paragraphe 8.
- 7.1.3 Déterminer la densité brute des granulats de chaque composante (granulat fin et gros granulat) selon les normes BNQ 2560-065 et BNQ 2560-067.
- 7.1.4 Déterminer la densité brute du combiné selon l'équation 1.

$$D_{bg} = \frac{100}{\left(\frac{P_{GG}}{D_{bgGG}} \right) + \left(\frac{P_{GF}}{D_{bgGF}} \right)} \quad (\text{équation 1})$$

- où D_{bg} = Densité brute du combiné,
 P_{GG} = Proportion du gros granulat,
 D_{bgGG} = Densité brute du gros granulat,
 P_{GF} = Proportion du granulat fin,
 D_{bgGF} = Densité brute du granulat fin.

- 7.1.5 Déterminer la granulométrie du mélange selon la norme NQ 2300-350 et vérifier que la courbe granulométrique respecte le fuseau du devis de retraitement en place des chaussées, D-1199, section 5.7.

NOTE 2- D'autres caractéristiques comme la masse volumique, l'absorption, etc. sont intéressantes à connaître, mais non indispensables à la procédure de formulation.

7.2 Reconstitution granulométrique du combiné

7.2.1 Éliminer le retenu 25 mm et plus du mélange. Aucune correction n'est apportée après le retrait de la partie grossière du combiné. La granulométrie d'essai (0 - 25 mm) est connue.

7.2.2 Une extraction de bitume est nécessaire pour déterminer le pourcentage de bitume initial du mélange. L'extraction est réalisée selon la norme NQ 2300-100.

NOTE 3- La reconstitution granulométrique doit être faite individuellement pour chaque éprouvette dans le but d'éliminer les risques de ségrégation et de courbes granulométriques discontinues.

NOTE 4- Tous les pourcentages sont calculés à partir de la masse sèche du combiné (0-25 mm).

7.3 Détermination du pourcentage d'eau prémix (% d'enrobage)

NOTE 5- La capacité d'une émulsion à recouvrir les particules dépend habituellement de la teneur en eau des granulats avant malaxage.

Ceci est particulièrement important pour les granulats ayant un pourcentage élevé de particules passant le tamis 80 μm , où une humidité insuffisante du granulat lors du malaxage peut provoquer une agglomération entre le bitume et les fines, causant ainsi un enrobement déficient.

7.3.1 Collecte d'échantillons représentatifs des granulats recyclés utilisés pour le projet.

7.3.2 Conditionner les granulats recyclés en les séchant à l'air jusqu'à ce qu'ils puissent être aisément fractionnés sur les tamis suivants : 25,0 mm, 20,0 mm, 14,0 mm, 10,0 mm et 5,0 mm. Sécher la partie passant le tamis 5 mm jusqu'à ce qu'elle puisse s'écouler librement.

NOTE 6- Toute méthode de séchage est acceptable à condition que les granulats ne soient pas chauffés à plus de 50 °C ou que les particules ne subissent aucune dégradation. Les granulats doivent être remués fréquemment pour empêcher l'agglomération en croûtes ou en mottes.

7.3.3 Déterminer la teneur en eau d'un échantillon du combiné de granulats séchés à l'air, selon la norme BNQ 2560-200. Noter la valeur.

7.3.4 Préparer huit portions représentatives du granulat séché à l'air en vue d'effectuer les formulations d'essai. La masse de chaque portion doit être d'environ 1 100 grammes, après séchage à l'étuve. Ces portions représentatives doivent être reconstituées en combinant des fractions exactes du matériau retenu aux tamis 20,0 mm, 14,0 mm, 10,0 mm et 5,0 mm ainsi que du matériau passant le tamis 5,0 mm. Ce mélange doit être en accord avec la granulométrie de l'échantillon complet.

7.3.5 Calculer pour les huit échantillons les masses d'eau et d'émulsion à ajouter, selon les équations 2 à 5. (Voir exemple 1).

Il est suggéré d'utiliser quatre pourcentages d'eau et deux pourcentages d'émulsion. Les huit valeurs suggérées peuvent être changées selon l'expérience de l'utilisateur :

- % de bitume : 2 % de la masse sèche du combiné;
 2,3 % de la masse sèche du combiné.

- % d'eau prémix : 3 % de la masse sèche du combiné;
- 4 % de la masse sèche du combiné;
- 5 % de la masse sèche du combiné;
- 6 % de la masse sèche du combiné.

Si l'utilisateur observe une similitude entre les deux pourcentages d'émulsion, il peut utiliser des valeurs plus éloignées ou rapprochées. La même chose est applicable pour le pourcentage d'eau ajouté.

*Masse sèche = Masse du mélange * (1 - teneur en eau initiale)) (éq. 2)*

*Masse bitume ajouté = (Masse sèche) * (% de bitume ajouté) (éq. 3)*

Masse d'émulsion à ajouter = $\frac{\text{Masse de bitume}}{\% \text{ de bitume dans l'émulsion}}$ (équation 4)

Masse d'eau à ajouter = Masse sèche (% d'eau prémix-% d'eau initial) (éq. 5)

NOTE 7- Travailler avec un mélange sec (teneur en eau initiale = 0 %) apporte beaucoup d'avantages et simplifie beaucoup la manipulation des pourcentages d'eau. Ces avantages se retrouveront aussi dans les autres étapes. Cette approche est suggérée, mais n'est pas impérative. Il faut cependant faire très attention d'utiliser le bon pourcentage d'eau si le mélange a une teneur en eau initiale non nulle.

7.3.6 Placer un échantillon dans le bol du malaxeur mécanique. Ajouter le pourcentage d'eau par masse sèche de granulat calculé à l'équation 5. Un mince filet d'eau est ajouté aux granulats et le malaxage se fait de façon à disperser l'eau parfaitement. 60 secondes de malaxage sont suffisantes.

7.3.7 Ajouter la quantité d'émulsion de bitume calculée à l'équation 4. L'émulsion est ajoutée en un mince filet pour minimiser la tendance du bitume à former des mottes avec les fines. 60 secondes de malaxage sont habituellement suffisantes.

Le temps de malaxage est diminué à 30 secondes, si une ségrégation est notée entre la partie fines-bitume et les granulats grossiers.

Si le malaxage est manuel, il doit être fait minutieusement afin de disperser complètement le bitume dans le mélange.

Pour les émulsions «Medium setting» (HFMS, CMS et autres émulsions à base de solvants), l'essai initial peut être effectué sans aucun ajout d'eau (% d'eau = 0 %).

7.3.8 Utiliser un ventilateur électrique pour une durée d'environ 6 à 10 heures afin d'obtenir le séchage à l'air des mélanges. Toute autre méthode de séchage est acceptable à condition que les granulats ne soient pas chauffés à plus de 50 °C ou que les particules ne subissent aucune dégradation.

7.3.9 Répéter les étapes 7.3.6, 7.3.7 et 7.3.8 pour les sept autres échantillons.

7.3.10 Évaluer l'enrobage, c'est à dire l'apparence de la surface des mélanges, après séchage, en estimant visuellement la surface totale du granulat qui est recouverte de bitume. Pour chaque teneur en bitume, noter la valeur d'enrobage pour chaque teneur en eau.

- 7.3.11 Tracer sur un même graphique les courbes du pourcentage d'enrobage en fonction du pourcentage d'eau prémix pour les deux pourcentages d'émulsion.

Le pourcentage d'eau prémix retenu est celui qui permet d'obtenir un enrobage minimum de 80 % avec le moins d'eau possible. (Voir figure 1). Éliminer tous les pourcentages d'eau qui donnent au mélange une apparence sursaturée ou de «soupe».

- NOTE 8- Un enrobage de 100 %, bien que cela soit courant pour les mélanges préparés à chaud, est souhaitable, mais pas obligatoire. Suffisamment de bitume pour produire un enrobage de 100 % peut résulter en une teneur en bitume trop élevée.

Le pourcentage d'eau prémix déterminé à 7.3.11 est celui qui sera utilisé pour tous les essais à venir.

- NOTE 9- Certains mélanges de granulats et d'émulsion de bitume ne sont pas affectés de façon significative par une variation de la teneur en eau au malaxage. Dans ce cas, le malaxage peut être permis à la teneur en eau optimale, ou à une teneur en eau plus haute telle que déterminée pour le compactage.

7.4 Évaluation du pourcentage d'eau optimal à la compaction

- 7.4.1 Quatre pourcentages différents de la teneur en eau suffisent pour définir la courbe de densité/teneur en eau lors de la compaction.

Les pourcentages d'eau recommandés pour ces essais sont : 2,5, 4,0, 5,0 et 6,0 % d'eau à la compaction (% total d'eau lors de la compaction).

Calculer la masse du granulat sec, la masse d'émulsion de bitume, la masse d'eau prémix et la masse d'eau à perdre par évaporation avant la compaction selon les équations 2, 6, 7, 8, 9 et 10. (Voir exemple 2).

- NOTE 10- Utiliser aux équations 6, 7, 9 et 10, les valeurs de pourcentage d'eau prémix (paramètre «e») et de % de bitume ajouté (paramètre «b») déterminées en 7.3.11.

Masse de granulat sec + équation 2

$$\text{Masse d'émulsion} = \frac{(a * b)}{c} \quad (\text{équation 6})$$

$$\text{Masse d'eau prémix} + (a * (e - f)) \quad (\text{équation 7})$$

$$\% \text{ d'eau dans l'émulsion} = 100 - c \quad (\text{équation 8})$$

$$\text{Masse d'eau à perdre par évaporation avant la compaction} = a * \left\{ \left[e + \frac{(b * d)}{c} \right] - g \right\} \quad (\text{équation 9})$$

où a = masse de granulat sec,

b = % de bitume ajouté,

c = % de bitume dans l'émulsion,

d = % d'eau dans l'émulsion = 100 - c,

e = % d'eau prémix (comprend implicitement f),

f = teneur en eau initiale,

g = % d'eau à la compaction.

- NOTE 11- Si la masse d'eau à perdre est négative, la masse d'eau prémix à ajouter au mélange devient :

$$\text{Masse d'eau prémix} = a \left[g - \frac{(b * d)}{c} - f \right] \text{ (équation 10)}$$

et la masse d'eau à perdre par évaporation avant la compaction devient nulle. Attention, il ne faut pas adopter cette formule dans tous les cas afin d'éliminer le temps d'évaporation du mélange avant compaction. Cela aurait pour effet de diminuer le pourcentage d'eau prémix et donc d'altérer le bon enrobage des granulats. Elle s'applique seulement si la masse d'eau à perdre est négative.

- 7.4.2 La quantité de mélange recommandée par éprouvette est de 1 100 grammes, mais peut varier d'une granulométrie à l'autre. En général, elle se situe entre 1 000 grammes et 1 200 grammes.

NOTE 12- Généralement, il est souhaitable de préparer un spécimen unique afin de calibrer la quantité de mélange requis. Si la hauteur de l'éprouvette démoulée se trouve à l'extérieur des limites de $63,5 \pm 6$ mm, la quantité de mélange par éprouvette est ajustée comme suit :

- 7.4.3 Nettoyer minutieusement l'assemblage de moulage et la face de la dame de compactage.

- 7.4.4 Combiner chaque portion granulométrique différente de façon à obtenir une masse totale de granulats de 1 100 grammes pour chaque fournée.

Un total de 12 reconstitutions granulométriques est nécessaire, trois éprouvettes par teneur en eau.

- 7.4.5 Placer les récipients dans un endroit bien ventilé et prendre la température du granulat. La température doit être ajustée à $22,2 \pm 1,7$ °C avant le malaxage. La teneur en eau initiale du mélange doit être déterminée selon la norme BNQ 2560-200. Une teneur en eau initiale nulle est conseillée.

- 7.4.6 Placer le granulat dans le malaxeur mécanique. La température de l'eau doit être de $22,2 \pm 1,7$ °C. Ajouter lentement la masse d'eau prémix calculée à l'équation 7 ou 10 et malaxer pendant $1 \pm 0,5$ minute ou jusqu'à obtenir une dispersion à fond de l'eau dans les granulats.

- 7.4.7 Ajouter la masse d'émulsion, calculée à l'équation 6, aux granulats humidifiés en un mince filet pendant le malaxage. Une minute de malaxage mécanique suffit. Un malaxage trop prolongé tend à désenrober le bitume des granulats et doit être évité.

- 7.4.8 Récupérer tout le mélange du malaxeur et le déposer dans le récipient à aération. Distribuer le mélange dans le récipient de façon à obtenir une épaisseur ne dépassant pas 25 mm. Prendre en note la masse totale du récipient avec le mélange.

Aérer le mélange afin qu'il perde par évaporation la masse d'eau calculée à l'équation 9 pour atteindre la teneur en eau désirée au compactage. La perte requise est soustraite de la masse totale du récipient avec le mélange et cette valeur est notée.

Un ventilateur peut être utilisé pour aérer le mélange. Remuer et peser le mélange toutes les $10 \pm 0,5$ minutes jusqu'à ce que la perte en eau calculée soit atteinte.

- 7.4.9 Assembler la semelle, le cylindre de moulage et la hausse des moules Marshall standard. Déposer un disque de papier ciré au fond du moule avant d'y mettre le mélange. Une fois le mélange déposé, enfoncer la spatule dans le mélange, 15 fois autour du moule et 10 fois au centre. Placer un deuxième disque de papier ciré sur le dessus du mélange. Répéter cette procédure pour les 11 autres assemblages.

- 7.4.10 Placer l'assemblage dans le compacteur mécanique et appliquer 50 coups de marteau. Prendre le cylindre de moulage, le tourner en sens inverse et assembler à nouveau. Appliquer le même nombre de coups à la face de l'éprouvette inversée. Répéter cette procédure pour chaque assemblage.
- 7.4.11 Enlever les hausses, les semelles et les papiers cirés de chacune des éprouvettes.
- 7.4.12 Coucher les moules de façon à permettre une ventilation égale des deux côtés de l'éprouvette. Laisser curer les éprouvettes dans les moules, à la température de la pièce, pour une période de 24 heures.
- 7.4.10 Placer l'assemblage dans le compacteur mécanique et appliquer 50 coups de marteau. Prendre le cylindre de moulage, le tourner en sens inverse et assembler à nouveau. Appliquer le même nombre de coups à la face de l'éprouvette inversée. Répéter cette procédure pour chaque assemblage.
- 7.4.11 Enlever les hausses, les semelles et les papiers cirés de chacune des éprouvettes.
- 7.4.12 Coucher les moules de façon à permettre une ventilation égale des deux côtés de l'éprouvette. Laisser reposer les éprouvettes dans les moules, à la température de la pièce, pour une période de 24 heures.
- 7.4.13 Démouler chaque briquette.
- 7.4.14 Déterminer la densité brute des éprouvettes par immersion dans l'eau, selon la norme NQ 2300-040 et l'équation 12. Inscrire vos résultats au tableau 1.
- 7.4.15 Déposer les éprouvettes dans des récipients préalablement pesés (case (J) du tableau 1).
Défaire les éprouvettes en morceaux et les mettre dans une étuve à 93 ± 6 °C. Retirer les éprouvettes de l'étuve après 24 heures, pesées, et noter les masses dans la case (I) du tableau 1.
A partir des données obtenues ci-haut, la teneur en eau, lors de l'essai, est déterminée selon l'équation 13.1.
- 7.4.16 Déterminer la densité brute sèche des éprouvettes, selon l'équation 14.
- 7.4.17 Préparer un graphique de la densité brute sèche calculée par rapport à la teneur en eau à la compaction. Tracer la courbe uniforme qui s'adapte le mieux à toutes les valeurs (3 valeurs de densité brute sèche par teneur en eau à la compaction). La teneur en eau qui donne la plus grande densité brute sèche représente le pourcentage d'eau optimal à la compaction.
Si une meilleure caractérisation des résultats est requise, des fournées avec d'autres teneurs en eau au malaxage peuvent être préparées.
- NOTE 13- La teneur en eau optimale est à utiliser lors des essais subséquents, peu importe la teneur en bitume total.

7.5 Variation de la teneur en bitume

- 7.5.1 La teneur optimale de bitume total est déterminée à partir de valeurs variables de bitume total, en utilisant la valeur optimale de teneur en eau déjà établie pour le malaxage et le compactage. Des mélanges d'essai sont préparés pour quatre pourcentages de bitume total différents : 3,5, 4,5, 5,5 et 6,5 %. Six éprouvettes sont nécessaires par pourcentage de bitume total, soit un total de 24 briquettes.

- 7.5.2 Déterminer la masse de granulat sec, la masse d'émulsion, la masse d'eau prémix et la masse d'eau à perdre par évaporation avant la compaction selon les équations 2, 6, 7, 8, 9 et 10.

NOTE 14- Utiliser aux équations 7, 9 et 10, le % d'eau prémix (paramètre «e») déterminé à 7.3.11 et le % d'eau optimal à la compaction (paramètre «g») déterminé à 7.4.17.

- 7.5.3 Nettoyer minutieusement l'assemblage de moulage et la face de la dame de compactage.

- 7.5.4 Combiner chaque portion granulométrique différente de façon à obtenir une masse totale de granulats de 1 100 grammes pour chaque fournée.

Un total de 24 reconstitutions granulométriques est nécessaire.

- 7.5.5 Placer les récipients dans un endroit bien ventilé et prendre la température du granulat. La température doit être ajustée à $22,2 \pm 1,7$ °C avant le malaxage. La teneur en eau initiale du mélange doit être déterminée selon la norme BNQ 2560-200. Une teneur en eau initiale nulle est conseillée.

- 7.5.6 Ajouter de l'eau pour le malaxage tel qu'il est indiqué au point 7.4.6.

Utiliser la teneur optimale d'eau au compactage (déterminé à 7.4.17) pour toutes les teneurs en bitume. Plus la teneur en bitume total augmente, plus la quantité d'eau provenant de l'émulsion sera importante.

- 7.5.7 Ajouter de l'émulsion tel qu'il est indiqué au point 7.4.7.

- 7.5.8 Aérer pour diminuer la teneur en eau des mélanges tel qu'il est indiqué au point 7.4.8.

- 7.5.9 Compacter les éprouvettes tel qu'il est indiqué aux points 7.4.9, 7.4.10 et 7.4.11.

- 7.5.10 Coucher les moules de façon à permettre une ventilation égale des deux côtés de l'éprouvette. Laisser curer dans le moule pendant 24 heures à la température de la pièce.

Démouler et laisser pendant 24 heures dans l'étuve à 38 °C.

- 7.5.11 Déterminer la hauteur de chaque éprouvette (moyenne de trois lectures) et la noter au tableau 2.

8. MODE OPÉRATOIRE

NOTE 15- Pour compléter l'étude de formulation, les analyses et essais suivants sont faits à partir des éprouvettes après compactage.

- Densité brute sèche.
- Stabilité Marshall modifiée et déformation d'éprouvettes sèches, à $22,2 \pm 1,1$ °C.
- Stabilité après trempage et déformation après immersion et saturation sous vide.
- Densité maximale et pourcentage de vides.
- Absorption en eau.

8.1 Détermination de la densité brute sèche

- 8.1.1 Déterminer la densité brute pour trois des six éprouvettes par pourcentage de bitume total, selon la norme NQ 2300-040 et l'équation 12. Porter les résultats au tableau 2.

$$G \text{ (densité brute)} = \frac{D}{(F - E)} \quad (\text{équation 12})$$

- où D = Masse dans l'air,
E = Masse dans l'eau,
F = Masse à saturation.

$$G_d \text{ (densité brute sèche)} = G \left[\frac{(100 + A)}{(100 + A + K)} \right] \quad (\text{équation 14})$$

- où A = % de bitume total d'essai,
K = Contenu en eau,
G = Densité brute.

8.2 Détermination de la stabilité modifiée et la déformation sur les trois éprouvettes utilisées en 8.1.

- 8.2.1 Nettoyer parfaitement les montants et les surfaces intérieures de la mâchoire avant d'effectuer l'essai. Lubrifier les montants pour que la mâchoire supérieure glisse librement. La température des mâchoires doit être maintenue entre 21,1 et 23,3 °C; utiliser un bain d'eau si nécessaire. Vérifier que l'indicateur de charge est bien ajusté à zéro.
- 8.2.2 Bien positionner l'une des trois éprouvettes sur la mâchoire inférieure et centrer l'assemblage dans la presse.
- 8.2.3 Appliquer la charge sur l'éprouvette à une vitesse constante du vérin de 50,8 mm/min jusqu'à ce que la charge maximale soit atteinte et qu'elle commence à décroître. Noter la charge maximale et la déformation subies à ce moment, au tableau 2. La charge totale en Newtons requise pour atteindre la rupture à $22,2 \pm 1,1$ °C est notée comme étant la stabilité Marshall modifiée et la valeur de déformation est lue en multiple de 0,25 mm.
- 8.2.4 Déposer les éprouvettes fracturées dans des récipients préalablement pesés (case J du tableau 2). S'assurer que toute l'éprouvette fracturée se trouve dans le récipient.
- Les éprouvettes sont alors défaites en morceaux et sont mises dans une étuve à 93 ± 6 °C. Elles sont retirées de l'étuve après 24 heures, pesées, et les masses sont notées dans la case (I) du tableau 2.
- À partir des données obtenues ci-haut, la teneur en eau, lors de l'essai, est déterminée selon l'équation 13.1.

$K \text{ (contenu en eau) \%} =$

$$\text{– briquettes sèches} = \left[\frac{[D - (I - J)]}{(I - J)} \right] (100 + A) \quad (\text{équation 13.1})$$

$$\text{– briquettes saturées} = \left[\frac{[H - (I - J)]}{(I - J)} \right] (100 + A) \quad (\text{équation 13.2})$$

8.3 Détermination de la stabilité modifiée et de la déformation après saturation et immersion sous vide

- 8.3.1 Déterminer la densité brute sèche sur les trois éprouvettes utilisées en 8.1 pour chaque pourcentage de bitume total, selon l'équation 14.

8.4 Détermination des densités et des vides

- 8.4.1 Chaque éprouvette est déposée séparément dans le dessiccateur et recouverte d'eau. Le dessiccateur doit être enlevé de l'appareil à vide avant de remplir avec de l'eau.
- 8.4.2 Faire le vide du dessiccateur à 100 mm de Hg, et le maintenir une heure.
- 8.4.3 Relâcher le vide graduellement et laisser l'éprouvette tremper dans l'eau une heure.
- 8.4.4 Déterminer la masse des éprouvettes curées et saturées. Noter la valeur dans la case H du tableau 2.
- 8.4.5 Déterminer la stabilité Marshall modifiée, la déformation et la teneur en eau sur ces trois éprouvettes, selon la procédure 8.2. Utiliser l'équation 13.2 au paragraphe 8.2.4, pour déterminer la teneur en eau (K).

8.5 Détermination des densités et des vides sur les éprouvettes utilisées en 8.1, 8.2 et 8.3

- 8.5.1 Déterminer la densité maximale selon la norme NQ 2300-045 sur les éprouvettes testées et séchées à l'étuve et noter les résultats au tableau 2. À partir de la densité maximale déterminer le pourcentage de vides selon l'équation 15 et reporter les résultats au tableau 2.

$$\text{Pourcentage de vides} = \left[1 - \frac{\text{densité brute}}{\text{densité maximale}} \right] * 100 \quad (\text{équation 15})$$

- 8.5.2 Toute valeur de pourcentage de vides qui se situe à plus de 50 % de la moyenne des trois éprouvettes ne doit pas être utilisée.

9. EXPRESSION DES RÉSULTATS

9.1 Détermination de la stabilité corrigée

Les valeurs de stabilité mesurées sur les éprouvettes qui ne rencontrent pas les dimensions standard, soit 63,5 mm d'épaisseur, doivent être transformées en une valeur équivalente aux dimensions de 63,5 mm d'épaisseur à l'aide d'un facteur de conversion.

$$\text{Valeur équivalente} = 1261,2 * [(\text{hauteur moyenne de la brique})^{-1.72}] \quad (\text{équation 16})$$

$$\text{Stabilité corrigée (L)} = \text{Stabilité lue} * \text{valeur équivalente} \quad (\text{équation 17})$$

- 9.2 Faire la moyenne des déformations et des stabilités corrigées de tous les spécimens ayant une même teneur en bitume. Les valeurs qui sont manifestement erronées ne doivent pas être incluses dans la moyenne.
- 9.3 Préparer des graphiques séparés, tels qu'ils sont montrés à la figure 2, pour différents facteurs en reliant les points à l'aide de la courbe uniforme qui s'adapte le mieux à toutes les valeurs.
 - 9.3.1 Stabilité corrigée à base sèche et après trempage en fonction de la teneur en bitume total.
 - 9.3.2 Pourcentage de perte de stabilité en fonction de la teneur en bitume total.

$$\text{Eau absorbée (\%)} = \frac{(K_4 + K_5 + K_6)}{3} - \frac{(K_1 + K_2 + K_3)}{3}$$

9.3.5 Pourcentages de vides totaux maximaux en fonction de la teneur en bitume total.

$$\text{Vides totaux maximaux (\%)} = 100 \left[1 - \frac{(\text{densité brute sèche})}{\text{densité maximale}} \right] \text{ (équation 20)}$$

10. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

10.1 Tendances et relations concernant les données d'essai

NOTE 16- Il a été remarqué que les courbes dessinées précédemment varient beaucoup selon les divers types de granulats et les diverses granulométries. Les tendances générales sont les suivantes :

- 10.1.1 De façon générale, la stabilité après trempage atteint son maximum à une valeur particulière de teneur en bitume total alors que la stabilité à base sèche montre habituellement une courbe continuellement décroissante avec l'augmentation de la teneur en bitume total. Certains mélanges peuvent montrer un accroissement continu de la stabilité après trempage sur toute l'étendue des teneurs en bitume évaluées. Cet accroissement indique que l'augmentation de la teneur en bitume a un effet bénéfique sur la stabilité après trempage.
- 10.1.2 La perte de stabilité, en pourcentage, décroît généralement lorsque la teneur en bitume total augmente.
- 10.1.3 La densité brute sèche atteint généralement son maximum à une valeur particulière de teneur en bitume total.
- 10.1.4 Le pourcentage d'humidité absorbée pendant l'essai de trempage décroît lorsque la teneur en bitume total augmente.
- 10.1.5 La valeur des vides totaux maximaux décroît lorsque la teneur en bitume total augmente.

10.2 Détermination de la teneur en bitume optimale

NOTE 17- Le mélange doit offrir une stabilité adéquate lors des essais effectués après saturation de façon à assurer une résistance au trafic en saison humide.

Le pourcentage de perte en stabilité entre les essais effectués à sec et après saturation ne doit pas être excessif. Une perte de stabilité élevée indique que le mélange est très sensible à l'humidité, ce qui pourrait résulter en une désagrégation en saison humide.

La valeur des vides dans le mélange doit se situer à l'intérieur des limites acceptables afin d'empêcher les déformations permanentes excessives et l'absorption d'humidité trop grande (pour des valeurs de vides trop élevées), ou du ressuage du bitume ajouté du mélange (pour des valeurs de vides basses).

L'absorption d'humidité du mélange ne doit pas être excessive afin de minimiser le risque de déshydratation ou l'affaiblissement du lien entre le bitume et les granulats.

- 10.2.1 La valeur optimale de teneur en bitume total pour les mélanges stabilisés se détermine à partir des données tel qu'elles sont présentées graphiquement. Le choix de la teneur en bitume optimale se fait principalement à l'aide du graphique de la stabilité avant et après saturation en fonction du pourcentage de bitume total et du graphique de la perte de stabilité en fonction du pourcentage de bitume total. Quatre cas sont possibles :

- 10.2.1.1 La courbe de stabilité à sec n'a pas de sommet. La courbe de stabilité après saturation a un sommet.

Le pourcentage de bitume total optimal se situe au sommet de cette courbe, à condition que les critères du tableau 3 soient respectés.

- 10.2.1.2 La courbe de stabilité à sec a un sommet. La courbe de stabilité après saturation a un sommet.

Le pourcentage de bitume total optimal se situe au sommet de la courbe de la stabilité après saturation, à condition que les critères du tableau 3 soient respectés.

- 10.2.1.3 La courbe de stabilité à sec a un sommet. La courbe de stabilité après saturation n'a pas de sommet.

Le pourcentage de bitume total optimal est celui qui offre un compromis entre, et ce en ordre d'importance, une perte de stabilité minimum, une stabilité après saturation maximum et une stabilité à sec maximum. Les critères du tableau 3 doivent être respectés.

- 10.2.1.4 La courbe de stabilité à sec n'a pas de sommet. La courbe de stabilité après saturation n'a pas de sommet.

Le pourcentage de bitume total optimum est celui qui offre un compromis entre, et ce en ordre d'importance, une perte de stabilité minimum, une densité brute sèche maximum, une stabilité avant et après saturation maximum. Les critères du tableau 3 doivent être respectés.

NOTE 18- Pour les cas les plus difficiles à évaluer, l'ensemble des paramètres doit entrer en ligne de compte. Il faut que le pourcentage de bitume total choisi optimise le plus possible l'ensemble des résultats. L'influence des paramètres est, en ordre d'importance, la perte de stabilité, la stabilité après trempage, la stabilité à sec, la densité brute sèche, le pourcentage de vides totaux maximaux et le pourcentage d'eau absorbée.

Dans tous ces cas, une variation mineure de la teneur optimale déterminée peut être envisagée, à condition qu'un gain majeur des autres caractéristiques en découle. S'il y a un ou plusieurs critères qui ne respectent pas le tableau 3, le mélange doit être considéré comme inadéquat.

Exemple 1**CALCULS DE LA MASSE D'EAU ET D'ÉMULSION À AJOUTER**

Données :

% de bitume ajouté	= 2 %
% d'eau prémix	= 3 %
% de bitume dans l'émulsion	= 65 %
% de teneur en eau initiale	= 0.5 %
masse du mélange	= 1200 g

$$\begin{aligned} \text{Masse sèche} &= \text{Masse du mélange} (1 - (\text{teneur en eau initiale})) \quad (\text{éq. 2}) \\ &= (1200) * (1 - 0.005) \\ &= 1194 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Masse de bitume ajouté} &= (\text{Masse sèche}) * (\% \text{ de bitume ajouté}) \quad (\text{éq. 3}) \\ &= (1194) * (0.02) \\ &= 23.9 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Masse d'émulsion à ajouter} &= \frac{\text{Masse de bitume}}{\% \text{ de bitume dans l'émulsion}} \quad (\text{équation 4}) \\ &= 23.9 / 0.65 \\ &= 36.8 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Masse d'eau à ajouter} &= \text{Masse sèche} (\% \text{ d'eau prémix} - \% \text{ d'eau initial}) \quad (\text{éq. 5}) \\ &= 1194 (0.03 - 0.005) \\ &= 29.9 \text{ g} \end{aligned}$$

Exemple 2**CALCULS DE LA MASSE DU GRANULAT SEC, LA MASSE D'ÉMULSION DE BITUME, LA MASSE D'EAU PRÉMIX ET LA MASSE D'EAU À PERDRE PAR ÉVAPORATION AVANT LA COMPACTION**

Données :

masse du combiné	= 1200 g
% d'eau prémix	= 4,0 %
% de bitume ajouté	= 2,0 %
% d'eau à la compaction	= 4,5 %
% de bitume dans l'émulsion	= 65,0 %
teneur en eau initiale	= 0,5 %

$$\text{Masse du granulât sec} = (1200) \times (1 - 0.005) = 1194 \text{ g}$$

$$\text{Masse d'émulsion} = \frac{(1194 \times 0.02)}{0.65} = 36.7 \text{ g}$$

$$\text{Masse d'eau prémix} = (1194 \times (0.04 - 0.005)) = 41.8 \text{ g}$$

$$\% \text{ d'eau dans l'émulsion} = 100 - 0.65 = 35 \%$$

$$\text{Masse d'eau à perdre par évaporation avant la compaction} = 1194 \left\{ \left[0.04 + \frac{(0.02 \times 0.35)}{0.65} \right] - 0.045 \right\} = 6.9 \text{ g}$$

Tableau 1

Détermination du pourcentage d'eau optimal à la compaction

BITUME		GRANULATS	
Type et grade :		Provenance :	
% de bitume dans l'émulsion :		Type :	
Densité du bitume (B) :		Densité brute (C) :	
% de bitume total d'essai (A) : (Initial + ajouté)		% bitume initial :	
MALAXAGE ET COMPACTAGE			
% d'eau à la compaction :			
% de bitume ajouté :		Date de compactage :	
ÉPROUVETTES			
NUMÉROS			
DENSITÉ BRUTE			
Masse dans l'air (D) :			
Masse dans l'eau (E) :			
Masse à saturation (F) :			
Densité brute (G) :			
CONTENU EN EAU			
Masse (séchée à l'étuve) (I) :			
Masse de la tare (J) :			
Contenu en eau (K) :			
Densité brute sèche :			

Tableau 2
Type de formulation

BITUME		GRANULATS	
Type et grade :		Provenance :	
% de bitume dans l'émulsion :		Type :	
Densité du bitume (B) :		Densité brute (C) :	
% de bitume total d'essai (A) : (initial + ajouté)		% de bitume initial :	
MALAXAGE ET COMPACTAGE		DATE DES ESSAIS	
% d'eau à la compaction :		Fin de la cure dans le moule :	
Date de compactage :		Fin de la cure dans le four :	
% de bitume ajouté :		Fin de trempage :	
ÉPROUVETTES	SÈCHES		SATURÉES
NUMÉROS		Moy.	Moy.
DENSITÉ BRUTE			
Masse dans l'air (D) :			
Masse dans l'eau (E) :			
Masse à saturation (F) :			
Densité brute (G) :			
STABILITÉ			
Hauteur de l'éprouvette (mm) :			
Stabilité lue (kN) :			
Stabilité corrigée (kN) : (L)			
Déformation (mm) :			
CONTENU EN EAU			
Masse brique après cure (H) :			
Masse (séchée à l'étuve) (I) :			
Masse de la tare (J) :			
Contenu en eau (K) :			
Densité brute sèche :			
Densité maximale :			
% vides :			
Eau absorbée :			
Vides totaux maximaux :			

Tableau 3
Critères d'acceptation des mélanges

Caractéristiques	Minimum	Maximum
Perte de stabilité	—	40 %
Stabilité à sec	8 000 N	—

Note : Il est recommandé que le mélange ait un pourcentage de vides totaux maximal de 15 % et un pourcentage d'enrobage supérieur à 80 %.

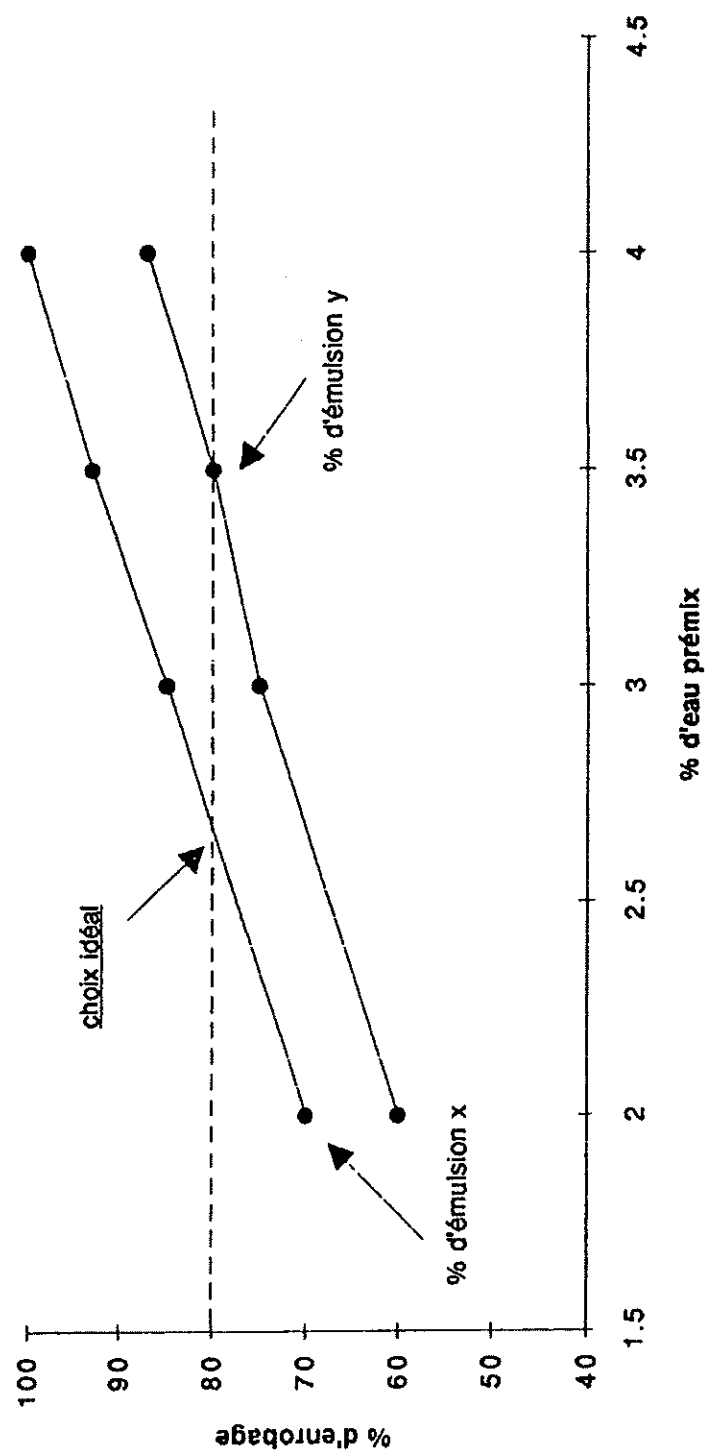


Figure 1 Graphique du choix optimum d'eau prémix

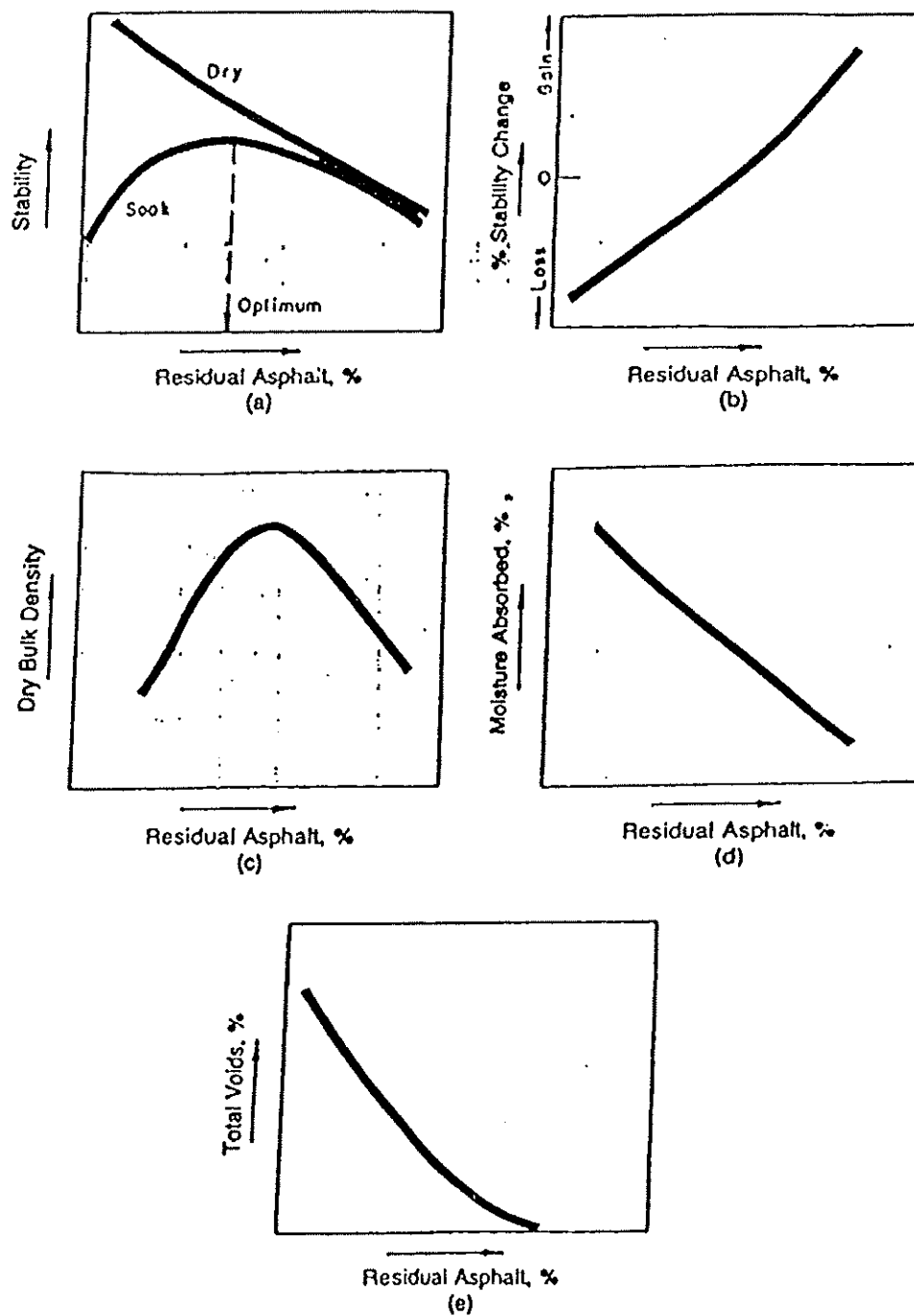


Figure 2 Exemples de courbes types

Annexe B

Guide de contrôle de la qualité

1	TRAVAUX DE DÉCOHÉSIONNEMENT	100
1.1	Points à vérifier	100
1.2	Contrôle des matériaux décohésionnés	100
1.3	Contrôle du reprofilage et du compactage	101
1.4	Contrôle des matériaux d'apport	101
2	TRAVAUX DE STABILISATION AU LIANT BITUMINEUX	102
2.1	Données préalables à la stabilisation	102
2.2	Contrôle de la mise en oeuvre	103
2.3	Contrôle du liant bitumineux	103
2.4	Planche de référence sur mélange stabilisé	103
2.4.1	Contrôle du taux d'application	103
2.4.2	Vérification de l'uniformité transversale	104
2.4.3	Vérification de l'uniformité en profondeur	104
2.4.4	Contrôle du compactage	105
2.5	Contrôle du mélange stabilisé	105
2.6	Contrôle du compactage	106

1 TRAVAUX DE DÉCOHÉSIONNEMENT

1.1 Points à vérifier

a) *Épaisseur de décohesionnement*

Tout au long des travaux de décohesionnement, l'épaisseur du revêtement bitumineux en place ainsi que la profondeur du décohesionnement sont mesurées régulièrement afin de s'assurer du respect des conditions du devis. L'équipement de décohesionnement est ajusté à une profondeur égale à deux fois l'épaisseur du revêtement bitumineux, sans toutefois pénétrer sous la fondation supérieure.

Note : Tout non-respect des épaisseurs est signalé au surveillant.

b) *Grosseur des particules*

L'équipement et le patron de décohesionnement sont vérifiés afin de s'assurer qu'ils permettent de concasser le revêtement en particules inférieures à 40 mm de diamètre et d'obtenir ainsi un mélange homogène.

c) *Échantillonnage pour formulation*

Les matériaux décohesionnés sont échantillonnés conjointement avec l'entrepreneur pour l'établissement des formulations qui sont préparées selon les spécifications du devis. Pour chaque formulation, trois échantillons sont prélevés.

Pour chaque échantillon, les essais suivants sont effectués :

- Teneur en bitume (NQ 2300-100 et NQ 2300-110).
- Analyse granulométrique (NQ 2560-040 et NQ 2560-350). Toutefois, l'échantillon est séché à une température inférieure ou égale à 50 °C et le temps de tamisage mécanique pour la partie retenue au tamis 5 mm est de trois minutes.

1.2 Contrôle des matériaux décohesionnés

a) *Méthode d'échantillonnage*

Les prélèvements s'effectuent sur la route après reprofilage et compactage préliminaire. Les matériaux décohesionnés sont prélevés conjointement selon la norme NQ 2560-010. Note: le tableau 5 de la norme ne s'applique pas, la masse de l'échantillon est de 30 kg.

b) *Localisation*

Les prélèvements se font à des endroits prédéterminés par une méthode aléatoire expliquée à l'annexe 2-II du *Guide de contrôle technique Sols et granulats*.

c) *Cadence et taille de l'échantillon*

Un échantillon de 30 kg constitué de trois prélèvements est prélevé selon la cadence du devis.

d) Essais à effectuer

En chantier :

- Tamisage au tamis de 40 mm afin de vérifier qu'il n'y a pas de particules retenues.
- Teneur en eau avant compactage préliminaire.

En laboratoire :

- Analyse granulométrique (NQ 2560-040 et NQ 2560-350). Toutefois, l'échantillon est séché à une température inférieure ou égale à 50 °C et le temps de tamisage mécanique pour la partie retenue au tamis 5 mm est de trois minutes.

Note : La cadence d'analyse en laboratoire varie selon le degré de fiabilité établi envers les résultats transmis par l'entrepreneur.

1.3 Contrôle du reprofilage et du compactage**a) Reprofilage**

Le reprofilage est effectué de manière à produire une surface uniforme. Il peut être finalisé après correction et malaxage des matériaux d'apport pendant le compactage préliminaire. En outre, toute irrégularité ou dépression jugée excessive par le surveillant doit être corrigée.

b) Compactage

Le cylindrage d'une section décohesionnée doit être terminé la journée même des travaux de décohesionnement, et le pourcentage de compacité prescrit doit être atteint. Le degré de compactage des matériaux préalablement décohesionnés est vérifié à l'aide d'un nucléodensimètre après reprofilage et compactage.

Note : La teneur en eau prémix établie lors de la formulation (voisin 4 % $\pm$ 1 %) et nécessaire à l'obtention d'un enrobage adéquat devrait être ajustée avant le compactage préliminaire.

1.4 Contrôle des matériaux d'apport**a) Caractéristiques du granulat**

Le granulat d'apport est un produit de concassage permettant de corriger les déficiences granulométriques des matériaux décohesionnés.

b) Échantillonnage

Le granulat d'apport est échantillonné selon la méthode décrite à la section 2.2 du *Guide de contrôle technique Sols et granulats*.

c) Essais à effectuer

Une analyse granulométrique est effectuée afin de valider les résultats de l'entrepreneur.

d) Vérification théorique du combiné

S'assurer que le combiné (matériaux décohesionnés et granulats d'apport) proposé par l'entrepreneur respecte le fuseau granulométrique exigé au devis.

e) *Vérification du taux de pose et de l'incorporation du matériau d'apport*

Lors de l'épandage du granulat d'apport, vérifier que le taux d'apport ayant fait l'objet d'une entente entre les deux parties est respecté et que l'incorporation du matériau d'apport donne un mélange parfaitement homogène.

f) *Contrôle du matériau corrigé*

Le surveillant peut exiger un nouvel échantillonnage afin de vérifier l'efficacité de la correction granulométrique. Dans ce cas, il faut recommencer l'étape 1.2.

2 TRAVAUX DE STABILISATION AU LIANT BITUMINEUX

2.1 Données préalables à la stabilisation

a) *Mesure de la masse volumique*

L'étalonnage du nucléodensimètre ainsi que la correction d'humidité sont effectués selon les prescriptions du *Guide d'utilisation des nucléodensimètres*.

La masse volumique sèche et le pourcentage d'humidité sont mesurés *in situ* immédiatement avant les travaux de stabilisation. Ces mesures sont prises à tous les 2500 m², à des endroits prédéterminés par une méthode aléatoire expliquée à l'annexe 2-II du *Guide de contrôle technique Sols et granulats*.

b) *Calcul du taux d'application du liant bitumineux*

Le taux d'application du liant bitumineux est calculé selon la formule suivante :

$$TA = \frac{DD \times E \times P_L}{D_L \times 1000 \times 100}$$

où : TA : Taux d'application du liant (l/m²),
 DD : Masse volumique sèche *in situ* (kg/m³),
 E : Épaisseur à stabiliser (mm),
 P_L : % de liant d'ajout selon la formule de mélange,
 D_L : Densité du liant (1,02).

Note : L'ajustement du taux d'application liant sur le chantier est fait en considération de la masse volumique riche moyenne de la couche à stabiliser.

Lorsqu'une émulsion de bitume est utilisée, l'eau contenue dans le liant doit être considérée, si bien que le taux d'application du liant devient :

$$TA' = 100 \cdot TA/B_r$$

où : TA' : Taux d'application de l'émulsion (l/m²),
 B_r : % de bitume résiduel contenu dans l'émulsion.

Note : Ce taux théorique doit être ajusté sur le chantier si la valeur du pourcentage de bitume résiduel figurant sur le certificat de livraison diffère de plus de 2 % de la valeur prévue.

Le pourcentage d'eau ainsi incorporé au mélange est exprimé par l'équation suivante :

$$P_{\text{eau}} = \frac{100}{DD} \times \frac{(TA' - TA) \times D_{\text{eau}} \times 1000}{E}$$

où : P_{eau} : % d'eau provenant de l'émulsion,

D_{eau} : densité de l'eau (1,00).

Le pourcentage d'eau provenant de l'émulsion est ajouté au pourcentage d'eau mesuré *in situ* afin de connaître le pourcentage total d'eau contenu dans le mélange après la stabilisation. Le pourcentage d'eau prémix *in situ* avant stabilisation ne doit pas être inférieur au taux d'humidité permettant un enrobage maximal tel qu'établi par la formule de mélange. Le pourcentage d'eau total après stabilisation doit être légèrement inférieur ou égal à la teneur en eau optimum à la compaction tel qu'établi par la formule de mélange.

2.2 Contrôle de la mise en oeuvre

a) Épaisseur de stabilisation

À raison de trois fois par demi-journée de travail, vérifier que la profondeur stabilisée correspond aux exigences du devis. Une variation de l'épaisseur influencera directement le pourcentage de bitume résiduel contenu dans le mélange.

Note : Tout non-respect des épaisseurs est signalé au surveillant.

Il a été noté qu'une passe additionnelle de l'appareil de stabilisation (sans ajout de liant) sur le joint longitudinal permet d'obtenir une meilleure répartition du liant.

b) Contrôle du taux d'application

Le taux d'application du liant est contrôlé pour chacune des travées stabilisées en utilisant les données fournies par le contrôleur de débit de l'équipement de stabilisation. De plus, le taux d'application est également contrôlé en mesurant la superficie stabilisée avec un chargement complet de liant. La quantité de liant contenue dans la citerne apparaît sur le certificat de livraison émis par le fournisseur de liant bitumineux. Finalement, le taux d'application moyen est calculé pour l'ensemble des travaux. Un exemple du contrôle du taux d'application du liant est reproduit à l'exemple 1.

2.3 Contrôle du liant bitumineux

a) Vérification du certificat de livraison

À l'arrivée de la citerne contenant le liant bitumineux, prendre connaissance du certificat de conformité et noter la quantité. S'assurer que les résultats d'essais figurant sur ce dernier respectent les exigences du C.C.D.G. Lorsque le liant utilisé est une émulsion, la viscosité Saybolt-Furol apparaissant sur le certificat de livraison est vérifiée. Un changement important de cette caractéristique peut signifier des ajustements de la part de l'entrepreneur afin d'assurer une dispersion adéquate et uniforme du liant dans le mélange.

2.4 Planche de référence sur mélange stabilisé

2.4.1 Contrôle du taux d'application

La précision relative du contrôleur de débit est comparée aux quantités réellement posées.

Le taux d'application du liant est contrôlé pour chacune des travées stabilisées dans cette planche de référence, en utilisant les données fournies par le contrôleur de débit de l'équipement de stabilisation qui sont comparées aux quantités réellement posées. Un facteur de correction est alors appliqué au taux de pose visé s'il y a lieu.

2.4.2 Vérification de l'uniformité transversale

a) Méthode d'échantillonnage

Les prélèvements s'effectuent sur la route, après compactage initial et reprofilage. Les matériaux stabilisés sont prélevés sur toute l'épaisseur en s'assurant d'en exclure tout matériau sous-jacent.

b) Localisation

Les échantillons sont prélevés suivant une droite transversale à la chaussée, aux endroits suivants :

- Bordure latérale gauche;
- Centre de chaque travée stabilisée;
- Interface de deux travées stabilisées;
- Bordure latérale droite.

Le nombre total d'échantillons à prélever est donc égal au double du nombre de travées, plus un.

c) Cadence et taille de l'échantillon

L'uniformité transversale est vérifiée dans une section de la planche de référence choisie aléatoirement. Chaque échantillon prélevé est placé dans un sac de plastique bien identifié et sa masse est d'environ 10 kg.

d) Essais à effectuer

Les essais suivants sont effectués sur chaque échantillon :

- % d'humidité
- Stabilité Marshall, état sec à 22 °C (un seul essai)
- Stabilité Marshall après immersion sous vide à 22 °C (un seul essai)

Ces essais sont décrits à l'annexe C.

2.4.3 Vérification de l'uniformité en profondeur

a) Méthode d'échantillonnage

Les prélèvements s'effectuent sur la route, après compactage initial et reprofilage. Les matériaux stabilisés sont prélevés par couches successives de 50 mm d'épaisseur en s'assurant d'en exclure tout matériau sous-jacent.

b) Localisation

Les échantillons sont tous prélevés au même endroit, déterminé de manière aléatoire.

c) *Cadence et taille de l'échantillon*

L'uniformité en profondeur est vérifiée dans une section de la planche de référence du projet choisie aléatoirement. Chaque échantillon prélevé est placé dans un sac de plastique bien identifié et sa masse est de 10 kg.

d) *Essais à effectuer en laboratoire*

Les essais suivants sont effectués sur chaque échantillon :

- % d'humidité
- Stabilité Marshall état sec à 22 °C
- Stabilité Marshall après immersion sous vide à 22 °C (un seul essai)

Ces essais sont décrits à l'annexe C.

2.4.4 Contrôle du compactage

Le pourcentage de compacité prescrit au devis doit être atteint et le patron de compactage peut être établi lors de la réalisation de cette planche de référence.

2.5 Contrôle du mélange stabilisé

a) *Méthode d'échantillonnage*

Les prélèvements s'effectuent sur la route, après compactage initial et reprofilage. Prélever les matériaux stabilisés sur toute l'épaisseur en s'assurant d'en exclure tout matériau sous-jacent. L'échantillon est placé dans un sac de plastique hermétique et bien identifié.

b) *Localisation*

Les prélèvements se font à des endroits prédéterminés par une méthode aléatoire expliquée à l'annexe 2-II du *Guide de contrôle technique Sols et granulats*.

c) *Cadence et taille de l'échantillon*

Les échantillons de contrôle sont regroupés selon la séquence de formation de lot du devis.

Un échantillon de 20 kg minimum est prélevé pour chaque portion de 2500 m² de mélange stabilisé et est constitué de trois prélèvements transversalement dans la travée stabilisée.

d) *Essais à effectuer en laboratoire*

Les essais suivants sont effectués sur tous les échantillons du lot :

- % humidité;
- stabilité Marshall état sec à 22 °C (moyenne de deux essais);
- stabilité Marshall après immersion sous vide à 22 °C (moyenne de deux essais).

De plus, les essais suivants sont également réalisés sur l'échantillon numéro 2 seulement :

- teneur en bitume;
- densité brute du mélange (moyenne de deux essais);
- densité maximale du mélange (moyenne de deux essais);
- essai d'enrobement (moyenne de deux essais).

Ces essais sont décrits à l'annexe C.

2.6 Contrôle du compactage

a) *Méthode de mesure*

L'étalonnage du nucléodensimètre ainsi que la correction d'humidité sont effectués selon les prescriptions du *Guide d'utilisation des nucléodensimètres*.

La masse volumique sèche et le pourcentage d'humidité sont mesurés *in situ* immédiatement après la densification finale.

Le recouvrement de la surface par un enrobé bitumineux est autorisé lorsque le rapport entre la masse volumique sèche et la densité brute obtenue en laboratoire (formule de l'entrepreneur) atteint la valeur spécifiée au devis et lorsque les exigences sur le temps de cure sont rencontrées.

b) *Localisation*

Les mesures se font à des endroits prédéterminés par une méthode aléatoire expliquée à l'annexe 2-II du *Guide de contrôle technique Sols et granulats*.

c) *Cadence*

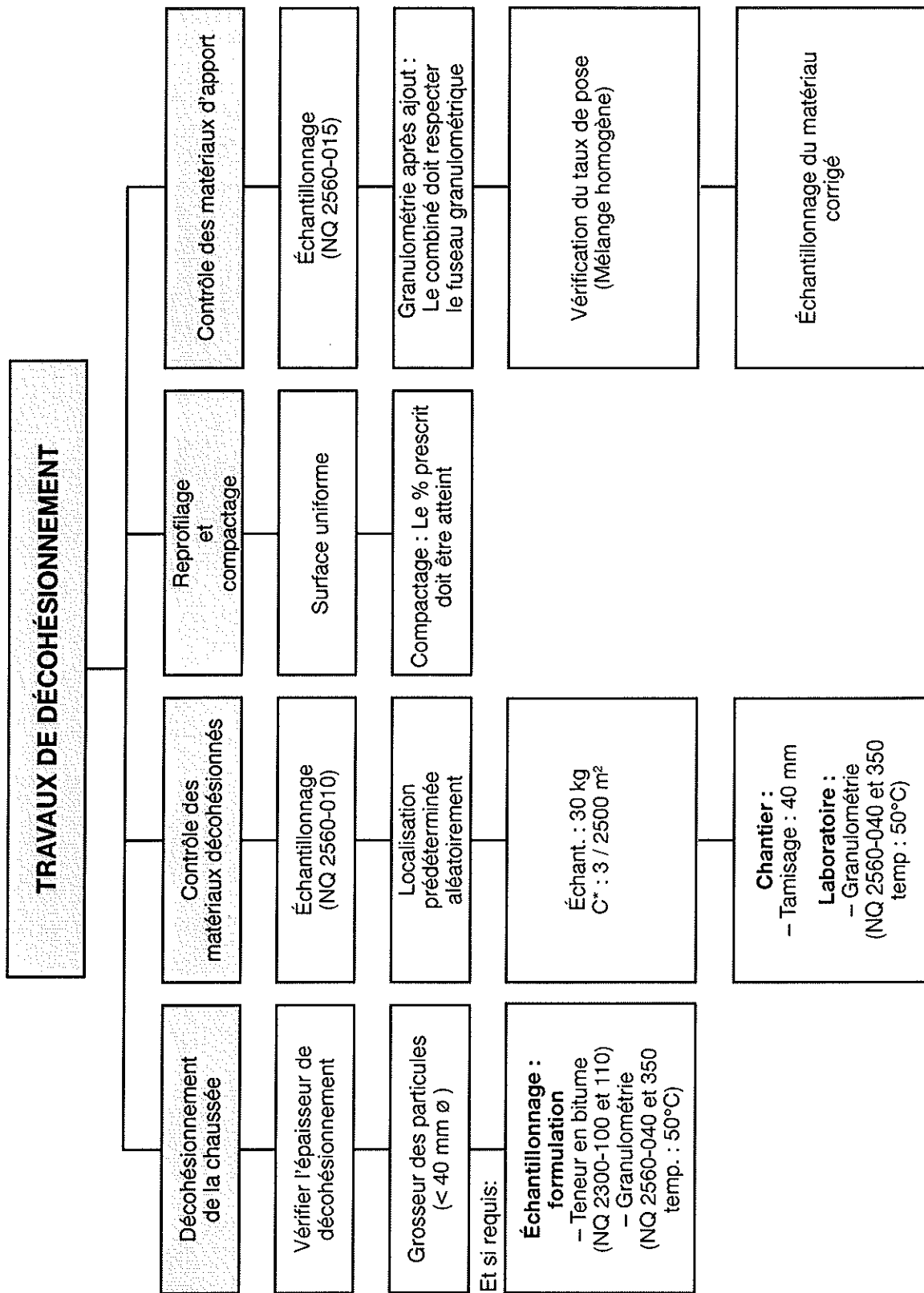
La masse volumique sèche est mesurée à une cadence minimale de 2500 m² de mélange stabilisé.

d) *Épreuve de portance*

Lorsqu'un doute subsiste sur l'état de cure du mélange stabilisé, et avant de procéder à son recouvrement par un enrobé bitumineux, l'entrepreneur doit démontrer par une épreuve de portance que la nouvelle fondation est suffisamment stable. L'essai de portance est réalisé selon le C.C.D.G. avec les conditions d'une fondation supérieure.

Note : La méthode de formulation à froid des matériaux recyclés stabilisés à l'émulsion, annexée à la fin du présent guide, montre les principes directeurs à respecter lors de la formulation des mélanges stabilisés au liant bitumineux.

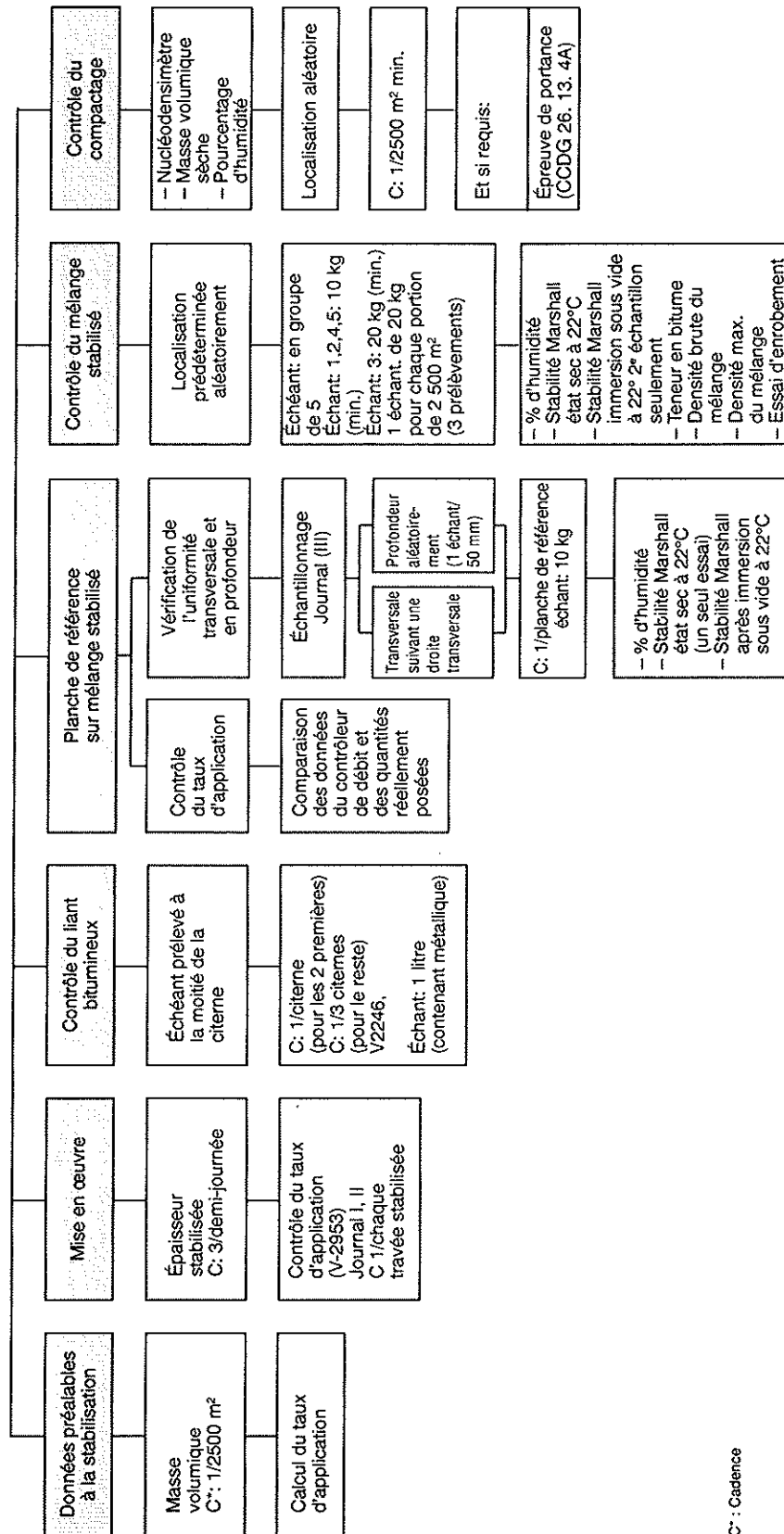
Tableau 1-1
Contrôle; travaux de décohesionnement



C* : Cadence

Tableau 2-1
Contrôle: Travaux de stabilisation

STABILISATION AU LIANT BITUMEUX



C*: Cadence



Gouvernement du Québec
Ministère
des Transports

CALCUL DU TAUX D'APPLICATION DU LIANT BITUMINEUX

Contrat : _____

Page : _____

Formule de mélange

Teneur en bitume optimale après stabilisation	= _____ %
Teneur en bitume du matériau décohesionné	= _____ %
Teneur en bitume à ajouter	= _____ % (PL)
Taux d'humidité permettant un enrobage maximal (% d'eau prémix)	= _____ % (W min.)
Taux d'humidité optimal à la compaction	= _____ % (W max.)

Relevé sur le chantier (*in situ*)

Densité du liant bitumineux	= 1.02	(DL)
Bitume résiduel contenu dans le liant lorsque émulsion	= _____ %	(Br)
Épaisseur à stabiliser	= _____ mm	(E)
Masse volumique sèche (DD) et teneur en eau (W) (3/km) Localisation de : _____ à _____		
Chalnage : _____		
(DD) : _____	_____ moy.	= _____ kg/m ³ (DD)
(W) : _____	_____ moy.	= _____ % (W)

Note : (W) doit être au moins égale à (W min.) lors de la stabilisation.

$$TA = \frac{DD \times E \times PL}{DL \times 1000 \times 100} = \frac{x}{1.02} \times \frac{x}{1000} \times \frac{x}{100} = \text{_____ l/m}^2$$

$$TA' = \frac{TA \times 100}{Br} = \frac{x}{x} = \text{_____ l/m}^2$$

$$p^{eau} = \frac{(TA' - TA) \times 1000 \times 100}{DD \times E} = \frac{x \times 1000 \times 100}{x} = \text{_____ \%}$$

p^{eau} = % d'eau provenant de l'émulsion

Pourcentage d'eau total après stabilisation (WT)

$WT = p^{eau} + W = \text{_____} + \text{_____} = \text{_____ \%}$

Note : (WT) doit être légèrement inférieur ou égal à (W max.) lors du compactage.

Remarques

V-2953 (96-04)

Technicien _____ Date _____



Gouvernement du Québec
Ministère
des Transports

CONTRÔLE QUANTITATIF D'ESSAIS

Contrat : 5036-91-0618 Dossier : 536-91-423 Division : 07

Genre de travaux STABILISATION
CMS-2 STGB.

[illegible]

TOTAL :



Gouvernement du Québec
Ministère
des Transports

JOURNAL (I)

Contrat : 5036-91-0618Division : 07Page : 12

Jour	Date	STABILISATION					
		COMPILATION DES QUANTITÉS ET DES TAUX DE POSC					
		FOURNISSEUR	CITERAIE	QUANTITÉ (L)	TEMP. RÉGÉNÉRATION	SURFACE (m ²)	TAUX POSC (L/m ²)
				Pulse 26478-482 = -1,8%			
Jendredi	09-12	STEB	LB-19447	26970	50°C	4171	6,46
				Pulse 32108-142 = -2,0%			
"	"	"	LB-19449	32750	46°C	4923	6,65
				Pulse 34312-702 = +28,5%			
Vendredi	09-13	"	LB-19453	26710	75°C	5330	5,01
				Pulse 36123-483 = +56,7%			
"	"	"	LB-19454	34220	74°C	4676	7,30
				Pulse 27553+23 = +0,08%			
Mardi	09-17	"	LB-19458	27530	63°C	4060	6,78
				Pulse 36326+256 = +10,7%			
"	"	"	LB-19460	36070	73°C	5470	6,59
				Pulse 26499+329 = +1,3%			
Mercr.	09-18	"	LB-19462	26170	63°C	3890	6,73
				Pulse 38198+678 = +1,9%			
"	"	"	LB-19463	37500	66°C	5630	6,66
		STEB	<u>TOTAL:</u>	247920		38150	6,50


Technicien

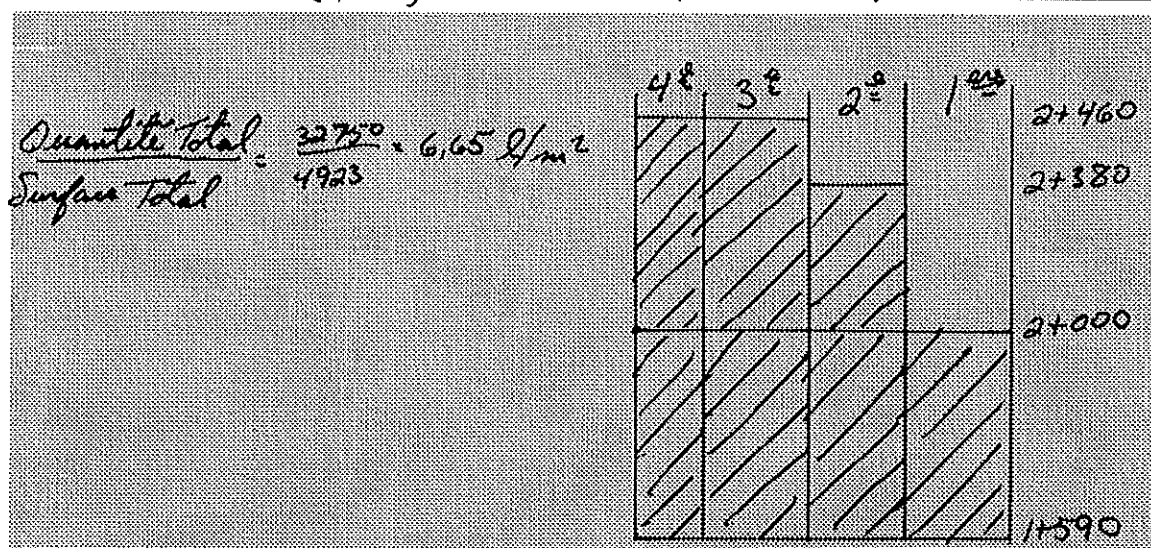


Gouvernement du Québec
Ministère
des Transports

JOURNAL (II)

Contrat : 5036-91-0618Division : 07Page : 2

Jour	Date 1991	<u>STABILISATION</u>			
		<u>CITERNE #2</u>	<u>FACTURE #0501</u>		
Jeuai	09-12	<u>LIB # 19449</u>			
		<u>ROUTE : ALFRED-DESROCHES (06-014)</u>			
		<u>1^{re} TRACÉE</u>	<u>2^{de} TRACÉE</u>	<u>3^{de} TRACÉE</u>	<u>4^{de} TRACÉE</u>
	LARGEUR (m)		2,0	2,0	1,0
	DÉBUT (CH.)		2+380	2+460	2+460
	FIN (CH.)		2+000	2+000	2+000
	SURFACE (m ²)		760	920	460
	QUANTITÉ (l)		4906	5913	2949
	TAUX (l/m ²)		6,46	6,43	6,41
	LARGEUR (m)	2,0	2,0	2,0	1,0
	DÉBUT (CH.)	2+000	2+000	2+000	2+000
	FIN (CH.)	1+590	1+590	1+590	1+590
	SURFACE (m ²)	820	820	820	410
	QUANTITÉ (l)	5224	5239	5246	2631
	TAUX (l/m ²)	6,37	6,39	6,40	6,42



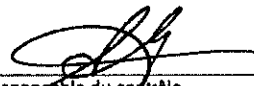
Technicien :



Gouvernement du Québec
Ministère
des Transports

LIANT BITUMINEUX
CERTIFICAT DE
LIVRAISON

LB- 25498

FOURNISSEUR						Réservé lab. M.T.Q.		
Fournisseur S.T.F.B.T				Usine St-HYACINTHE				
Type de liant CMS-2		N° de lot ou n° de cuvée I091		Date de fabrication 91 09 09	Date de vérification 91 09 11	Date d'expiration 91 09 11		
Pénétration à 25 °C	Viscosité cinématique à 135 °C (mm²/s)	Groupe de bitume A	Point de Fraass °C	Point de ramollis- sement (°C) 39,4	Retour d'élasticité en % ☐ 4 °C ☐ 10 °C —	Température °C		
						Entreposage	Min. Max.	
						Malaxage		
						Mise en place		
Compactage								
Viscosité Saybolt Furol ☐ à 25 °C ☒ à 50 °C	% en masse de résidu à 260 °C par distillation	% d'huile en volume	Stabilité au stockage, écart en °C			Autres renseignements		
98,3	67,0	1,0	Approuvé par 			Date 91 09 11		
			Responsable du contrôle					
ENTREPRENEUR								
Entrepreneur DesourdY			Transporteur			N° de véhicule 403-2-11		
N° de contrat 2174		N° de facture 0501		Quantité en masse (kg) 32750		Quantité en volume (l)		
Température du liant à la réception: 46 °C ou _____ °F								
Reçu par 						Date 91-09-11		
Signature du responsable de l'entrepreneur								

V-2246 (94-01)

DIRECTION TERRITORIALE M.T.Q.

BB-48



Gouvernement du Québec
Ministère
des Transports

JOURNAL (III)

Contrat : _____

Division : _____

Page : _____

Jour	Date	PLANCHES DE RÉFÉRENCE SUR MATÉRIAU STABILISÉ						
		LOCALISATION :						
		CONTRÔLE AUX Taux D'APPLICATION DE LIANT						
		TYPE DE LIANT		TAUX VISÉ :		l/m ²		
				ÉPAISSEUR :		mm		
TRAUCÉ	(No.)	1	2	3	4	5	TOTAL	
DÉBUT	(CHAINAGE)							
FIN	(CHAINAGE)							
LONGUEUR	(m)							
LARGEUR	(m)							
SURFACE	(m ²)							
QUANTITÉ PULV. (l)								
QUANTITÉ RÉEL (l)								
DIFFÉRENCE +/- (l)								
FACTEUR DE CORRECTION	(x6)							
DIFF. LQTE RÉEL x 100	(+/-)							
TAUX POSÉ (l/m ²)								
REMARQUES :								

UNIFORMITÉ EN PROFONDEUR

50mm
50mm
50mm

#1
#2
#3

PRÉLÈVEMENT

DIST. BORD
GROUPE

PRCH/ 5/ 6/ 7/ 8/ 9/ 10/ 11/ 12/ 13/ 14/

TRAUCÉ #1 TRAUCÉ #2 TRAUCÉ #3 TRAUCÉ #4 TRAUCÉ #5

STABILITÉ MARSHALL

PRÉLÈVEMENT	A SEC A 22°C	10mm. CAS VIDE A 22°C
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
MOYENNE ÉTENDUE		
25% MOY.		
STAB. RETENUE :		7.

Technicien : _____

Annexe C

Description des essais spéciaux

A) % d'humidité

- Placer environ 1000 g du matériau tel qu'il est reçu dans un bol à extraction ou autre;
- Peser le contenant + matériau humide;
- Sécher à 110 °C jusqu'à une masse constante;
- Laisser refroidir et peser le bol + matériau sec;
- Calculer le pourcentage d'humidité comme suit :

$$\% \text{ humidité} = 100 \frac{(\text{mélange humide} + \text{contenant}) - (\text{mélange sec} + \text{contenant})}{(\text{mélange sec} + \text{contenant}) - \text{contenant}}$$

- Procéder à l'extraction et à la granulométrie.

B) % passant le tamis de 80 µm par lavage

- Peser humide environ 1000 g de matériau tel qu'il est reçu;
- Selon le pourcentage d'humidité établi en A), calculer la masse du matériau sec;
- Laver au tamis de 80 µm;
- Sécher à 110 °C jusqu'à une masse constante;
- Laisser refroidir et peser;
- Calculer le pourcentage passant le tamis de 80 µm.

C) Densité brute, stabilité et déformation

Note : À moins d'indication contraire, chacune des opérations suivantes se fait à la température de la pièce, soit 22°C.

- Prétamiser l'échantillon sur un tamis de 25 mm et rejeter les particules retenues;
- Confectionner deux éprouvettes, en appliquant sur chaque face 50 coups de marteau mécanique;
- Laisser reposer les éprouvettes dans les moules pendant 16 heures;
- Démouler et placer les éprouvettes à l'étuve (50 °C) pendant 24 heures;
- Laisser refroidir à la température de la pièce;
- Déterminer la densité brute sur une éprouvette;
- Procéder à l'essai de stabilité et déformation sur cette éprouvette;
- Déterminer la densité brute sur la seconde éprouvette;
- Placer cette éprouvette dans un dessiccateur en prenant soin de la couvrir d'eau;
- Régler le vide à 100 mm de Hg et le maintenir pendant une heure. Relâcher le vide graduellement et laisser l'éprouvette tremper dans l'eau une heure;
- Procéder à l'essai de stabilité (sous vide) et déformation;
- Calculer la moyenne des deux essais de densité brute.

D) Densité maximale

- Laisser reposer la prise d'essai à la température de la pièce pendant 16 heures;
- Conditionner la prise d'essai à l'étuve (60 °C) pendant 24 heures.

E) *Détermination du pourcentage de stabilité retenue*

- Calculer le pourcentage de stabilité retenue comme suit :

$$\% \text{ stabilité retenue} = 100 \cdot \frac{\text{Stabilité sous vide}}{\text{Stabilité témoin}}$$

