

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation / Bundesamt für Strassen

Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication / Office fédéral des routes

Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni / Ufficio federale delle strade

Formulation et optimisation des formules d'enrobés

Mischrezeptur und Optimierung der bituminösen Mischgute

Mix design and optimisation of bituminous materials' mix formula

UNTERHALT 2000

Projet 3: Durabilité des enrobés

Partie 2: Formulation

**Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Laboratoire des voies de circulation (LAVOC)**

A. Junod, ing. dipl. EPF
Prof A.-G. Dumont

Mandat de recherche ASTRA 2000/421-2

Décembre 2004

PREAMBULE

Le projet Unterhalt 2000 s'inscrit dans les mesures préconisées par un groupe de travail de l'OFROU visant à améliorer la situation des travaux d'entretien sur les routes à fort trafic. Il vient en appui et coordination avec les projets COST 343 et 345 qui ont élaboré en Europe un état des connaissances sur ce thème.

Pour la première fois en Suisse les trois laboratoires "fédéraux" spécialisés dans la technique des revêtements routiers (EPFL-LAVOC, ETHZ-IGT et EMPA-113) se sont groupés pour mener un projet de grande ampleur et ceci en association avec les spécialistes privés des sociétés Viagroup SA et IMP-Bautest.

Le projet global est décomposé en 5 projets ou paquets de recherche liés entre eux (FP1, FP2, FP3, FP4 et FP7) dont quatre (FP1 à FP4) sont réalisés sous la coordination du Prof. A.-G. Dumont.

Les résultats ont abouti à une meilleure compréhension des phénomènes de dégradation des chaussées et à des propositions d'amélioration pour optimiser la durée de vie des revêtements bitumineux.

VORWORT

Das Forschungsprojekt Unterhalt 2000 stellt die konkrete Umsetzung einer von mehreren Massnahmen die von einer Arbeitsgruppe des Bundesamtes für Strassen ASTRA vorgeschlagen wurden, um die Erhaltungstätigkeit auf hoch belasteten Strassen effizienter zu gestalten. Das Forschungsprojekt wurde in Ergänzung und in Koordination der COST-Projekte 343 und 345, welche den Stand der Kenntnisse in diesem Bereich auf europäischem Niveau aufgearbeitet haben.

Bei diesem Projekt haben sich erstmalig in der Schweiz die drei "eidgenössischen" Labors, die auf dem Fachgebiet der Strassenbautechnik spezialisiert sind, mit Fachleuten aus der Privatwirtschaft der Firmen Viagroup SA und IMP-Bautest zusammengruppiert, um ein Grossprojekt durchführen zu können.

Das Gesamtprojekt umfasst 5 miteinander verbundene Einzelprojekte oder Forschungspakete (FP1, FP2, FP3, FP4 und FP7) deren vier (FP1 bis FP4) unter der Gesamtkoordination von Prof. A.-G. Dumont realisiert worden sind.

Die Ergebnisse haben zu einem verbesserten Verständnis der Schadensbildungsmechanismen von Fahrbahnen geführt und zu Verbesserungsvorschlägen, um eine optimale Dauerhaftigkeit der bituminösen Beläge zu erreichen.

COMMISSION D'ACCOMPAGNEMENT

Président: Dr. J.P. Junker, ing. dipl. EPF/SIA

D. Baer, ing. dipl. ETS

J.J. Maeder, ing. dipl. EPF

M. Fontana, ing. dipl. EPF

A. Nellen, ing. dipl. EPF

J. Frei, ing. dipl. ETS

Prof. Dr. K. Schellenberg

B. Graf, ing. dipl. EPF

M. Seeberger, ing. dipl. EPF

RESUME

La composition des enrobés influence de façon déterminante la durabilité et les performances des revêtements. A ce jour l'optimisation des formules pour mélanges bitumineux se fait encore par une approche trop empirique sur la base d'essais traditionnels qui souvent n'offrent qu'une faible corrélation avec les performances réelles des matériaux.

L'élaboration d'une méthodologie de formulation couplée avec des essais de performance permettant d'obtenir des enrobés performants et durables constitue le but essentiel de ce projet de recherche.

Cette méthode de formulation se base sur une approche volumique et sur des modèles analytiques capables de prévoir les performances des enrobés dans certains cas. En effet, il est possible de réaliser une étude de formulation, son optimisation et l'évaluation de ses performances à long terme en combinant un calcul de prévision et quelques essais complémentaires.

D'autre part le choix judicieux d'essais de performances dont l'utilisation est diffusée en Suisse permet d'obtenir des informations importantes sur la performance et la durabilité des enrobés formulés. Le choix de ces essais doit encore être validé par une étude sur des planches en vraie grandeur qui est actuellement en cours.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Mischgutzusammensetzung wirkt sich in starkem Mass auf die Beständigkeit und die Eigenschaften der Beläge aus. Noch immer wird die Zusammensetzung der bituminösen Mischgute mit Hilfe eines empirischen Ansatzes optimiert, welcher auf herkömmlichen Laborversuchen beruht und häufig nur wenig mit der wirklichen Eignung der Baustoffe zu tun hat.

Das Hauptziel der vorliegenden Forschungsarbeit ist die Entwicklung eines neuen Ansatzes für die Mischgutzusammensetzung, welcher sich an Leistungstests orientiert und bituminöse Baustoffe mit verbesserter Leistungsfähigkeit und Stabilität liefern soll.

Die neue Optimierungsmethode basiert auf einem volumetrischen Ansatz, sowie auf analytischen Modellen, welche die Eignung von bituminösen Schichten unter gewissen Umständen voraussagen können. Tatsächlich ist es möglich, die Eignungsprüfung, deren Optimierung, sowie die Auswertung der Langzeit-Leistungsfähigkeit mit Hilfe der Kombination einer berechneten Prognose und einigen zusätzlichen Laborversuchen durchzuführen.

Die sorgfältige Auswahl der in der Schweiz verbreitetsten eignungsorientierten Prüfungen erlaubt es zudem, wichtige Informationen über die Eignung und die Dauerhaftigkeit verschiedener Mischgute zu erhalten. Zur Zeit ist eine Studie im Gang, welche die Auswahl dieser Versuche anhand einiger Versuchsplatten bestätigen soll.

SUMMARY

The mixing formula of a bituminous layer has a strong influence on its durability and performances. Today, the mixing formula is still obtained using an empirical approach based on traditional tests methods that often offers only a low correlation with the real performances of the materials.

The main goal of this research project is the development of a new approach for the mixing formula based on performance tests providing bituminous materials with better performance and durability characteristics.

The new mixing formula is based on a volumetric approach and analytical models capable of predicting the bituminous layers' performance in certain circumstances. It is indeed possible to carry out a mixing formula study, its optimisation and the evaluation of the material's long-term performance using a prediction model and some complementary laboratory tests.

The careful choice of the laboratory tests, which provide important information about performance and durability of the different materials, has to be done with respect to their availability in most Swiss test laboratories and has yet to be validated by an ongoing large-scale test.

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Problématique	1
1.2 Objectifs	1
1.3 Programme.....	2
1.3.1 Déroulement.....	2
CHAPITRE 2 LES SOLLICITATIONS DES CHAUSSEES	3
2.1 Introduction	3
2.2 Sollicitations mécaniques.....	3
2.3 Sollicitations thermiques	4
CHAPITRE 3 INVENTAIRE DES ESSAIS	5
3.1 Introduction	5
3.2 Performances recherchées.....	5
3.3 Critères de sélection	6
3.4 Essais de caractérisation du module et de la fatigue.....	7
3.4.1 Recensement des essais.....	7
3.4.2 Références sur l'approche performancielle in situ	13
3.4.3 Analyse multicritère des essais de module et de fatigue.....	14
3.4.4 Conclusions.....	15
3.5 Essais de caractérisation des déformations permanentes.....	15
3.5.1 Recensement des essais.....	15
3.5.2 Références sur l'approche performancielle in situ	19
3.5.3 Analyse multicritère des essais de caractérisation des déformations permanentes	19
3.5.4 Conclusions.....	19
3.6 Essais de caractérisation du comportement aux basses températures.....	20
3.6.1 Recensement des essais.....	20
3.6.2 Références sur l'approche performancielle in situ	21
3.6.3 Conclusions.....	22
CHAPITRE 4 SYNTHESE DES ESSAIS.....	23
4.1 Essais retenus sur enrobés	23
4.2 Essais proposés sur les composants	24
4.2.1 Essais sur les Bitumes.....	24
4.2.2 Essais sur les Granulats.....	25

CHAPITRE 5 FORMULATION	26
5.1 Etat des connaissances	26
5.1.1 Méthode Hveem.....	26
5.1.2 Marshall mix design.....	27
5.1.3 Superpave mix design.....	28
5.1.4 Principe de la méthode française	28
5.1.5 Formulation C.R.R.....	30
5.2 Démarche de la formulation	31
5.2.1 Définition des besoins en performance	34
5.2.2 Sélection des composants	34
5.2.3 Formulation volumique	34
5.2.4 Optimisation	35
5.2.5 Performance	35
5.2.6 Niveaux de formulation	36
5.3 Validation de la méthode	36
5.3.1 Définition des besoins en performance	36
5.3.2 Sélection des composants	37
5.3.3 Choix de la courbe granulométrique	37
5.3.4 Estimation de la teneur en liant.....	42
5.3.5 Optimisation	42
5.3.6 Vérification de la formulation	44
5.3.7 Prévisions de performance.....	45
5.3.8 Analyse de sensibilité	54
CHAPITRE 6 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	59
CHAPITRE 7 BIBLIOGRAPHIE	60
CHAPITRE 8 ANNEXES	63
8.1 Formulation analytique C.R.R.	63
8.2 Logiciel de calcul: PRADO	66
8.3 Bases theoriques du calcul du module complexe des melanges bitumineux.	67
8.4 Methode de prediction de l'ornierage	69
8.5 L'orniereur LPC	70
8.6 Essai de retrait thermique empeche TSRST	73
8.7 Essai de compression diametrale	76
8.8 Essai de fatigue	77
8.9 Résultats de l'étude de formulation	79

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 PROBLEMATIQUE

Le besoin d'améliorer ou d'optimiser la durabilité des chaussées routières, tant lors de la conception des chaussées neuves que lors de la maintenance des chaussées routières, est un souci majeur des gestionnaires de réseaux routiers. Dans cette optique, l'évaluation des performances des enrobés bitumineux, à long terme, au travers d'essais de laboratoire pertinents s'avère indispensable.

Les nouvelles configurations de charges des poids lourds ont modifié de manière significative les sollicitations des revêtements routiers, entraînant l'apparition de dégradations prématurées sur des chaussées qui se comportaient normalement jusqu'alors, et dont les matériaux répondaient aux spécifications en vigueur. En particulier, les chaussées endurent le remplacement progressif des roues jumelées des poids lourds par des pneumatiques super-larges (de 300 à 500 mm de largeur), ainsi que des pressions de gonflage généralement plus élevées. Ces constatations ont mis en évidence le fait que certains essais actuellement utilisés ne sont pas ou plus adaptés pour évaluer la performance des enrobés et méritent d'être remplacés. En Suisse, les valeurs indicatives en vigueur¹, basées sur des performances empiriques données par l'essai Marshall, ne sont nullement prédictives de l'évolution de comportement des enrobés en place. Les composants et les enrobés doivent donc être caractérisés par des essais de laboratoire qui permettront d'évaluer les performances à long terme des enrobés bitumineux en vue d'optimiser leur durée de vie.

La formulation des mélanges est, à ce titre, déterminante pour l'obtention d'enrobés bitumineux performants.

1.2 OBJECTIFS

Afin de satisfaire aux critères de durabilité des revêtements routiers, il conviendra de sélectionner une gamme d'essais qui permettront d'évaluer de façon satisfaisante la performance des mélanges bitumineux constituant le revêtement des chaussées. L'objectif de la partie 2 du PR3 est d'évaluer et de sélectionner des essais existants, en Suisse et de par le monde, qui ont un caractère dit "de performance" ; c'est-à-dire qui permettront de prédire le comportement du matériau sur le long terme. Dans un premier temps, la sélection est faite sur la base d'études menées tant en Suisse qu'à l'étranger. L'évaluation du caractère prédictif des essais retenus est faite en comparant les résultats obtenus au comportement mesuré sur des planches d'essais soumises à des essais de charge accélérés au Rundlauf. De ces résultats, des recommandations sont tirées quant à l'emploi des essais dans les études de formulation. A noter que le but de ce projet de recherche n'est pas de développer un nouvel essai de performance qui demanderait une phase de mise au point et de

¹ SN 640 431b: Revêtements en béton bitumineux - conception, exigences, exécution, octobre 1997

validation extrêmement longue et coûteuse mais de se diriger vers des essais existants en Suisse ou à l'étranger, ayant déjà une longue période d'application et dont le matériel d'essai nécessaire est facilement disponible et si possible relativement bon marché.

1.3 PROGRAMME

1.3.1 DEROULEMENT

- Inventaire des essais et collecte des documents relatifs à l'aspect prédictif
- Evaluation et sélection des essais selon des critères définis
- Développement d'une méthodologie de formulation
- Réalisation des essais retenus sur les enrobés qui seront mis en œuvre dans les planches d'essais
- Evaluation des résultats d'essais en fonction du comportement des planches d'essais testées au Rundlauf
- Recommandations finales

Le suivi du comportement à long terme des structures soumises à des sollicitations accélérées au Rundlauf à Dübendorf et au trafic autoroutier sur les planches d'essais à Pratteln permettra de vérifier la qualité de prédiction des essais, de sélectionner les essais en adéquation avec le comportement des enrobés à long terme et définir les procédures de formulation pour optimiser leur performance.

CHAPITRE 2 LES SOLLICITATIONS DES CHAUSSEES

2.1 INTRODUCTION

Les chaussées routières sont en permanence soumises à des sollicitations mécaniques et thermiques combinées avec des phénomènes chimiques qui vont participer, plus ou moins rapidement selon leurs niveaux de sollicitation, à la dégradation du revêtement [39]. Ces éléments, responsables des dégradations, ont pour origine:

- les sollicitations du trafic : principalement les effets dynamiques dus aux passages répétés des poids lourds, les effets statiques lors du ralentissement du trafic et les frottements de surface pneu-chaussée,
- les sollicitations climatiques: entraînant des variations de température au sein des enrobés bitumineux. Ces variations sont soit de courte durée (journalières) ou soit de longue durée (saisonniers),
- les phénomènes chimiques: dus à l'oxydation naturelle des liants hydrocarbonés, à l'action des sels de déverglaçage provenant des entretiens hivernaux, et aux dégradations de surface de la chaussée par le rayonnement solaire.

Ces actions diverses, agissant simultanément sur le revêtement bitumineux conduisent aux dégradations couramment observées [37] [42], notamment:

- les fissurations de surface sous la forme de fissures isolées ou, dans les cas les plus graves, sous la forme de faïençage généralisé,
- les déformations permanentes (ou orniérage) suite à l'accumulation de déformations irréversibles,
- les dégradations de surface sous la forme de polissage des granulats, les désenrobages et perte de gravillons, les pelades et les nids de poule.

2.2 SOLLICITATIONS MECANIQUES

En première approximation, chaque couche de chaussée est assimilée à une poutre qui subit des flexions sous l'effet du trafic. Le calcul des efforts et déformations qui apparaissent nécessite, en premier lieu, la connaissance du module complexe et éventuellement du coefficient de Poisson. Soulignons qu'en raison des propriétés particulières apportées par le bitume (viscoélastique), les enrobés bitumineux ont un comportement (donc un module) fortement dépendant de la température et de la vitesse de chargement.

Les tractions répétées à la base des couches sous l'effet du passage des véhicules créent des « micro » dégradations qui s'accumulent et peuvent entraîner la ruine du matériau. Ce phénomène est la fatigue qui s'observe pour de nombreux matériaux. Les chaussées sont, en général, dimensionnées pour que la ruine ne se produise pas avant 10^6 cycles ou pour le nombre de cycles de chargement équivalents créés par le trafic sur une période comprise entre 15 et 20 ans. Les effets du trafic ont été

abondamment étudiés de par le monde et les publications y relatives sont abondantes.

Les compressions répétées sous le passage des véhicules peuvent induire des déformations permanentes qui, si elles sont trop importantes, se traduisent par un orniérage à la surface de la chaussée.

2.3 SOLLICITATIONS THERMIQUES

Mis à part l'accélération du vieillissement du matériau et les pertes de portance des chaussées en période de dégel dues à la présence de sols gélifs dans les couches d'infrastructure, les variations de la température ont deux effets mécaniques principaux :

- variation du module de l'enrobé bitumineux (facteur jusqu'à 100x),
- création de contraintes et déformations au sein du matériau en raison des dilatations-contractions thermiques lors des changements de température (couplage thermomécanique).

CHAPITRE 3 INVENTAIRE DES ESSAIS

3.1 INTRODUCTION

Introduisons une terminologie des essais selon Bonnot [9] qui propose de scinder les essais mécaniques en trois catégories. Cette distinction est plus liée à l'interprétation de l'essai qu'à sa nature, ainsi :

- La première catégorie est celle "des essais empiriques" dans lesquels le mode de sollicitation est très différent de celui existant in situ, et qui ne permettent pas de déterminer une propriété intrinsèque du matériau. Seule l'expérience du praticien et des comparaisons pour de nombreux cas permettent de tirer une conclusion toute relative sur le comportement en place de l'enrobé bitumineux.
- La deuxième catégorie est celle "des essais de simulation" dans lesquels on soumet le matériau à des sollicitations les plus proches possibles, bien qu'à l'échelle réduite, de celles qui existent dans l'ouvrage considéré, pour une propriété d'usage donnée. La simulation de la propriété d'usage de l'ouvrage (orniérage, fissuration à basse température...) par un modèle expérimental ne permet pas une simulation précise des sollicitations, notamment du fait des conditions aux limites et des phénomènes des lois d'échelle (passage du modèle à l'ouvrage).
- La troisième catégorie est dénommée "essais de détermination" dans lesquels on soumet le matériau à des sollicitations simples, parfaitement définies, qui permettent d'isoler les propriétés intrinsèques des matériaux, c'est-à-dire indépendantes des conditions d'essais. Ainsi les résultats de ces essais permettent de passer, grâce à une modélisation de la structure de l'ouvrage et l'utilisation des lois de comportement de l'enrobé, à la propriété d'usage désirée.

Une autre terminologie est proposée par Di Benedetto selon l'état de contrainte et de déformation [16]. Il considère deux grandes catégories : les essais non homogènes et les essais homogènes :

- les essais non homogènes, correspondent à des essais de structure dont l'interprétation est empirique et dont les caractéristiques de l'ouvrage sont déterminées par l'utilisation de loi de similitude (modèle réduit),
- les essais homogènes donnent, sans hypothèse complémentaire, accès à la loi de comportement du matériau, l'état de contrainte et de déformation est le même en chaque point de l'éprouvette testée.

3.2 PERFORMANCES RECHERCHEES

Il est raisonnablement admis, par les professionnels de la route et en particulier par le "European Standards Working Group CEN" [22], que les propriétés recherchées afin de caractériser les performances des chaussées à long terme sont :

- Le module
- La résistance à la fatigue mécanique

- La résistance aux déformations permanentes
- La résistance aux sollicitations thermiques
- La résistance aux fissurations de retrait hydraulique

D'autres performances non mécaniques doivent être considérées afin de caractériser les performances des chaussées, ce sont :

- L'adhérence
- La résistance à l'arrachement
- Le vieillissement
- La susceptibilité hydraulique

A l'exception de la susceptibilité hydraulique, ces dernières propriétés non mécaniques ne sont pas traitées dans le cadre de cette recherche, de même que la résistance aux fissurations de retrait hydraulique qui ne concerne que les chaussées rigides ou semi-rigides.

3.3 CRITERES DE SELECTION

Le but principal de la sélection des essais de performance est de proposer aux praticiens et aux ingénieurs de la route en Suisse, une gamme d'essais qui permettront d'évaluer de manière adéquate la performance des enrobés constituant le revêtement des nouvelles chaussées routières. A cet effet, les essais retenus doivent satisfaire à des critères de sélection qui sont en adéquation avec les attentes des gestionnaires routiers. Ces critères sont notamment :

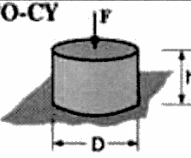
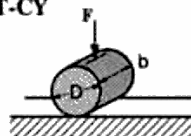
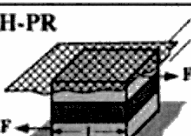
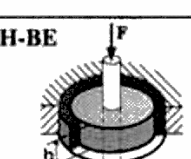
- [1] Le caractère prévisionnel des essais au regard d'une durabilité optimum des chaussées
- [2] La pertinence des essais aux regards des modes de sollicitation
- [3] La fiabilité des essais du point de vue de la reproductibilité
- [4] La réalisation des essais selon des procédures normalisées et en particulier selon les nouvelles normes européennes CEN
- [5] L'interprétation des résultats de l'essai, c'est-à-dire les caractéristiques mesurées fournissent-elles une propriété intrinsèque de l'enrobé ayant un caractère de performance ou une propriété empirique dont l'interprétation dépend fortement de l'expérience des praticiens
- [6] La diffusion dans les laboratoires des centres de recherche nationaux et privés en Suisse, notamment sur le plan de l'accessibilité de l'équipement (disponibilité, coûts) et de l'exploitation des résultats.

Le point 5 propose de sélectionner les essais selon les caractéristiques mesurées par les essais. A titre d'exemple, l'essai Marshall fournit des valeurs limites dont l'interprétation est empirique et ne permet que d'effectuer une comparaison entre différents produits. Les valeurs limites Marshall standardisées ont été fixées selon l'expérience des praticiens.

3.4 ESSAIS DE CARACTERISATION DU MODULE ET DE LA FATIGUE

3.4.1 RECENSEMENT DES ESSAIS

Dans le cadre d'un projet inter-laboratoire lancé à partir de 1990 par le comité RILEM 101 BAT, des essais dynamiques, caractérisant le module et la fatigue d'un enrobé dense, ont été comparés et analysés. Deux propriétés ont été examinées, ce sont le module complexe et la loi de fatigue. Partl et Francken ont présenté, au symposium RILEM à Lyon de 1997 [25], les recommandations en matière d'essais de module. Di Benedetto, De la Roche et Francken [18] ont présentés, au même symposium, les recommandations sur les essais de fatigue. Le tableau suivant, issu du programme RILEM, énumère les essais qui ont été réalisés par les 15 laboratoires participants:

Essais homogènes	Test	Type of loading	Shape of specimen
	 CO-CY	Tension Compression	Cylindric
	 IT-CY	Indirect tensile Diametric Compression	Cylindric
	 SH-PR	Shear on square Sandwich	Prismatic
	 SH-BE	Shear-bending Load applied by an axial rod	Anular with central rod

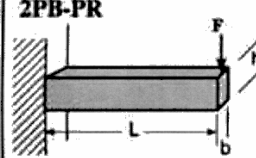
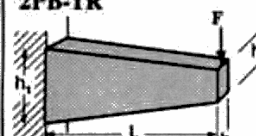
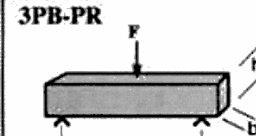
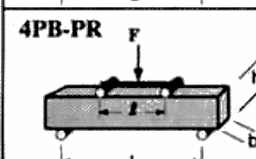
Essais non homogènes	Test	Type of loading	Shape of specimen
	 2PB-PR	2 Point bending	Prismatic beam
	 2PB-TR	2 Point bending	Trapezoidal beam
	 3PB-PR	3 Point bending	Prismatic beam
	 4PB-PR	4 Point bending	Prismatic beam

Figure 1: Essais de module et de fatigue recensés [25]

Parmi les essais recensés à la Figure 1, tous les essais de flexion sont des essais non homogènes selon la définition donnée au point 3.1, les autres essais étant des essais homogènes. Ces essais permettent de mesurer le module complexe des enrobés et la fatigue sous sollicitations cycliques pour la plupart d'entre eux.

Le tableau suivant propose une synthèse des essais de module et de fatigue recensés de part le monde :

Essai	Centre de recherche / Pays
2 Points Bending Test	LAVOC-EPFL - CH
	Centre de Recherche Routière - BE
	Danish Asphalt Industries, Road Research Laboratory - DK
	Bundessanstalt für Strassenwesen - D
	Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées - F
3 Points Bending Test	Scientific Institute for Transport of Hungary
4 Points Bending Test	Ministerie van Verkeer en Waterstaat - NL
	KOAC Twello – Keurin, onderzoek en advies in de civiele techniek – NL
	Delft University of Technology – NL
Shear Bending Test (uniquement module)	EMPA - CH
	Technische Universität München - D
Tension Compression Test	Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat - ENTPE
	Statens Väg – och Trafik – Intitutet - SE
Indirect Tensile Test	Statens Väg – och Trafik – Intitutet - SE
	Federal Highway Administration – FHWA – US
	University of California Berkeley – Institute for Transportation Studies - US
	Transport Research Laboratory - UK

Tableau 1: Essais de module et de fatigue réalisés dans les différents laboratoires

Chacun des principaux essais fait l'objet par la RILEM d'un descriptif repris dans l'annexe.

Essai	Caractéristiques de l'essai	Paramètres mesurés																				
2 Points Bending Test	<ul style="list-style-type: none"> - Epreuve de forme trapézoïdale - Déplacement sinusoïdal imposé d'amplitude constante en tête de l'éprouvette - Enregistrement de la force résultante en tête de l'éprouvette - Détermination du module et de la loi de fatigue de l'enrobé - Essai normalisé par la nouvelle norme européenne CEN 12697-24 (en cours de validation) [23] - Dimension de l'éprouvette : <table border="1" data-bbox="528 842 1155 999"> <thead> <tr> <th>Dimension</th> <th>D ≤ 14mm</th> <th>14 ≤ D ≤ 22mm</th> <th>D > 22mm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>h₁</td> <td>56±1mm</td> <td>70±1mm</td> <td>75±1mm</td> </tr> <tr> <td>h₂</td> <td>25±1mm</td> <td>25±1mm</td> <td>30±1mm</td> </tr> <tr> <td>b</td> <td>25±1mm</td> <td>25±1mm</td> <td>30±1mm</td> </tr> <tr> <td>L</td> <td>250±1mm</td> <td>250±1mm</td> <td>250±1mm</td> </tr> </tbody> </table> <p>D : diamètre des granulats</p> <ul style="list-style-type: none"> - Equipement commercialisé - Grande connaissance de l'essai au niveau européen, en particulier en Suisse, France (30 ans d'expérience) et Belgique - Essai utilisé dans la méthode de dimensionnement des enrobés en France (normalisé), prise en compte de ϵ_6 dans le calcul de la structure 	Dimension	D ≤ 14mm	14 ≤ D ≤ 22mm	D > 22mm	h ₁	56±1mm	70±1mm	75±1mm	h ₂	25±1mm	25±1mm	30±1mm	b	25±1mm	25±1mm	30±1mm	L	250±1mm	250±1mm	250±1mm	<p>Module :</p> <ul style="list-style-type: none"> - module complexe E^* - angle de déphasage ϕ <p>Loi de fatigue mécanique :</p> <ul style="list-style-type: none"> - déformation à 10⁶ cycles ϵ_6 - pente de la loi de fatigue p
	Dimension	D ≤ 14mm	14 ≤ D ≤ 22mm	D > 22mm																		
h ₁	56±1mm	70±1mm	75±1mm																			
h ₂	25±1mm	25±1mm	30±1mm																			
b	25±1mm	25±1mm	30±1mm																			
L	250±1mm	250±1mm	250±1mm																			
<p>Eprouvette de forme prismatique (méthode allemande) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Force sinusoïdale imposée d'amplitude constante en tête de l'éprouvette - Enregistrement du déplacement résultant en tête de l'éprouvette - Détermination du module et de la loi de fatigue de l'enrobé - Essai normalisé par la nouvelle norme européenne CEN 12697-24 - Dimension de l'éprouvette : <table border="1" data-bbox="616 1850 1067 1946"> <thead> <tr> <th>Dimension</th> <th>D ≤ 22mm</th> <th>D > 22mm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>b,h</td> <td>40±1mm</td> <td>80±1mm</td> </tr> <tr> <td>L</td> <td>160±1mm</td> <td>320±1mm</td> </tr> </tbody> </table> <p>D : diamètre des granulats</p>	Dimension	D ≤ 22mm	D > 22mm	b,h	40±1mm	80±1mm	L	160±1mm	320±1mm	<p>Module :</p> <ul style="list-style-type: none"> - module complexe E^* - angle de déphasage ϕ <p>Loi de fatigue mécanique :</p> <ul style="list-style-type: none"> - contrainte à 10⁶ cycles σ_6 - pente de la loi de fatigue p 												
Dimension	D ≤ 22mm	D > 22mm																				
b,h	40±1mm	80±1mm																				
L	160±1mm	320±1mm																				

<p>3 Points Bending Test</p>	<p>Eprouvette de forme prismatique :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Déplacement vertical sinusoïdal imposé d'amplitude constante au centre de l'éprouvette en appui à ses extrémités - Enregistrement du déplacement horizontal résultant au centre de l'éprouvette - Détermination du module et de la loi de fatigue de l'enrobé - Essai normalisé par la nouvelle norme européenne CEN 12697-24 - Dimension de l'éprouvette : <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>b,h</td> <td>50±3mm</td> </tr> <tr> <td>L</td> <td>300±10mm</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> - Aucune expérience connue en Suisse 	b,h	50±3mm	L	300±10mm	<p>Module :</p> <ul style="list-style-type: none"> - module complexe E^* - angle de déphasage ϕ - énergie dissipée sur un cycle <p>Lois de fatigue :</p> <ul style="list-style-type: none"> - loi de fatigue mécanique - déformation à 10^6 cycles ϵ_6 - loi de fatigue énergétique
b,h	50±3mm					
L	300±10mm					
<p>4 Points Bending Test</p>	<p>Eprouvette de forme prismatique :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sollicitation (force ou déplacement) sinusoïdale imposée d'amplitude constante en 2 points sur l'éprouvette en appui à ses extrémités - Enregistrement de la déflexion résultante ou de la force résultante - Détermination du module et de la loi de fatigue de l'enrobé - Essai normalisé par la nouvelle norme européenne CEN 12697-24 - Dimension de l'éprouvette : <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>b,h</td> <td>$\geq 3 \cdot D$</td> </tr> <tr> <td>L</td> <td>$\geq 8 \cdot b$ ou $8 \cdot h$</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> - Aucune expérience connue en Suisse 	b,h	$\geq 3 \cdot D$	L	$\geq 8 \cdot b$ ou $8 \cdot h$	<p>Module :</p> <ul style="list-style-type: none"> - module complexe E^* - angle de déphasage ϕ - énergie dissipée sur un cycle <p>Loi de fatigue mécanique :</p> <ul style="list-style-type: none"> - contrainte ou déformation à 10^6 cycles selon le mode de sollicitation - pente de la loi de fatigue p
b,h	$\geq 3 \cdot D$					
L	$\geq 8 \cdot b$ ou $8 \cdot h$					

<p>Co-Axial Shear Test (CAST)</p>	<p>Eprouvette de la forme d'un anneau cylindrique :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Force sinusoïdale au centre de l'éprouvette imposée d'amplitude constante - Enregistrement de la déflexion à la surface de l'éprouvette - Détermination du module de cisaillement - Essai non normalisé en Suisse et en Europe, - Dimension de l'éprouvette : <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="padding: 2px;">h</td> <td style="padding: 2px;">= 30 à 100mm</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">D intérieur</td> <td style="padding: 2px;">= 20 à 33mm</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">D extérieur</td> <td style="padding: 2px;">= 70 à 80mm</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> - Essai équivalent: Superpave Shear Tester, essai standardisé dans les recommandations du Superpave - Essai développé en Suisse par l'EMPA sur la base des travaux de Junker [29] 	h	= 30 à 100mm	D intérieur	= 20 à 33mm	D extérieur	= 70 à 80mm	<p>Module :</p> <ul style="list-style-type: none"> - module complexe E^*
h	= 30 à 100mm							
D intérieur	= 20 à 33mm							
D extérieur	= 70 à 80mm							
<p>Tension Compression Test</p>	<p>Eprouvette de forme cylindrique :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Force de traction-compression sinusoïdale imposée d'amplitude constante - Enregistrement du déplacement axial dans 2 plans perpendiculaires à l'axe du déplacement - Détermination du module et de la loi de fatigue de l'enrobé - Essai non normalisé - Dimension de l'éprouvette : <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="padding: 2px;">h</td> <td style="padding: 2px;">= 120mm</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">D</td> <td style="padding: 2px;">= 80mm</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> - Essai prometteur notamment vis-à-vis de la fatigue - Essai développé dans le cadre d'un travail de thèse en France à l'ENTPE [44] 	h	= 120mm	D	= 80mm	<p>Module :</p> <ul style="list-style-type: none"> - module complexe E^* - angle de déphasage ϕ <p>Loi de fatigue mécanique :</p> <ul style="list-style-type: none"> - pente de la loi de fatigue p <p>(prise en compte des phénomènes d'échauffement de l'éprouvette)</p>		
h	= 120mm							
D	= 80mm							
<p>Indirect Tensile Test</p>	<p>Eprouvette de forme cylindrique :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Force imposée d'amplitude constante au centre de l'éprouvette - Enregistrement du déplacement résultant perpendiculairement à la direction d'application de la sollicitation 	<p>Module :</p> <ul style="list-style-type: none"> - module complexe E^* - angle de déphasage ϕ 						

	<ul style="list-style-type: none"> - Détermination du module et de la loi de fatigue de l'enrobé - Essai normalisé par la nouvelle norme européenne CEN 12697-24 - Dimension de l'éprouvette : <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>Dimension</td> <td>$D \leq 25\text{mm}$</td> <td>$25 < D \leq 38\text{mm}$</td> </tr> <tr> <td>b</td> <td>Min 40 mm</td> <td>Min 60 mm</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>$100 \pm 3\text{mm}$</td> <td>$150 \pm 3\text{mm}$</td> </tr> </table> <p style="margin-left: 40px;">D : diamètre des granulats</p> <ul style="list-style-type: none"> - Aucune expérience connue en Suisse, Essai couramment utilisé en Grande-Bretagne - Equipement commercialisé 	Dimension	$D \leq 25\text{mm}$	$25 < D \leq 38\text{mm}$	b	Min 40 mm	Min 60 mm	D	$100 \pm 3\text{mm}$	$150 \pm 3\text{mm}$	<p>Loi de fatigue mécanique :</p> <ul style="list-style-type: none"> - nombre de cycles avant la rupture de l'éprouvette
Dimension	$D \leq 25\text{mm}$	$25 < D \leq 38\text{mm}$									
b	Min 40 mm	Min 60 mm									
D	$100 \pm 3\text{mm}$	$150 \pm 3\text{mm}$									

Tableau 2: Descriptif des essais de module et de fatigue [17] [25] [41] [45] [29] [44] [54]

Le tableau suivant résume les caractéristiques des essais de détermination du module complexe des enrobés:

Essai	Forme de l'éprouvette	Forme de la sollicitation	Mode de sollicitation	Fréquence de référence		Propriétés mesurées	
				10Hz	Autre	Module E'	angle de déphasage ϕ
2 Points Bending Test	Trapézoïdale Prismatique	Sinusoïdale	continu	✓	✓	✓	✓
3 Points Bending Test	Prismatique	Sinusoïdale Haversine	continu	✓	✓	✓	✓
4 Points Bending Test	Prismatique	Sinusoïdale	continu	✓	✓*	✓	✓
Co-Axial Shear Test	cylindrique	Sinusoïdale	continu	✓	✓**	✓	
Tension Compression Test	cylindrique	Sinusoïdale	continu	✓		✓	✓
Indirect Tensile Test	cylindrique	Carré Haversine	pulsation	✓		✓	✓

* 1 Hz

** de 0.1 à 16 Hz

Tableau 3: Caractéristiques des essais de détermination du module complexe des enrobés

Le tableau suivant résume les caractéristiques des essais de détermination de la fatigue des enrobés:

Essai	Forme de l'éprouvette	Forme de la sollicitation	Mode de sollicitation	Conditions d'essai de référence					
				10Hz	25Hz	Autre	0°C	10°C	20°C
2 Points Bending Test	Trapézoïdale Prismatique	Sinusoïdale	force déplacement		✓			✓	
3 Points Bending Test	Prismatique	Sinusoïdale Haversine	force déplacement	✓			✓	✓	
4 Points Bending Test	Prismatique	Sinusoïdale	déplacement	✓		✓*	✓	✓	✓
Tension Compression Test	cylindrique	Sinusoïdale	force déplacement	✓				✓	
Indirect Tensile Test	cylindrique	Carré Haversine	Force	✓			✓	✓	✓**

* 30 Hz

** 21°C

Tableau 4: Caractéristiques des essais de détermination de la fatigue des enrobés

Parmi les conclusions du symposium RILEM retenons que :

Pour la mesure du module complexe :

- L'ensemble des essais fournissent le module de l'enrobé avec exactitude, cette caractéristique mesurée en laboratoire est une propriété intrinsèque du matériau
- Les essais en flexion présentent une meilleure reproductibilité que les autres essais, cette constatation est indépendante de la forme et de la dimension des éprouvettes testées.

Pour la mesure de la loi de fatigue :

- L'interprétation des résultats dépend des dispositifs et des conditions d'essais. En ce qui concerne les essais par flexion, ceux-ci sont tributaires d'un certain empirisme dans l'interprétation des résultats dû à la non homogénéité de l'essai.
- L'interprétation de l'essai de fatigue, soumis à des charges cycliques et continues, ne permet pas de mettre en évidence le caractère intrinsèque du comportement à la fatigue des enrobés bitumineux dû principalement aux modes de sollicitations de l'essai. En effet, les essais de fatigue en laboratoire ne prennent pas en compte les temps de repos et le temps d'application réel de la charge des véhicules (trafic lent ou rapide).

3.4.2 REFERENCES SUR L'APPROCHE PERFORMANCIELLE IN SITU

En 1989, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) a étudié la pertinence de l'essai de flexion en deux points sur des éprouvettes trapézoïdales vis-à-vis du comportement in situ de planches d'essais [15]. Le but de l'étude était de vérifier le classement de matériaux testés par l'essai de fatigue par rapport à celui obtenu sur une chaussée expérimentale, en enrobé dense, testée au manège de fatigue du LCPC à Nantes. Les essais ont été réalisés à force imposée et à déformation imposée en continu et avec des temps de repos. Les conclusions apportées par cette recherche sont que les essais de fatigue à déplacement imposé n'ont pas permis d'expliquer le comportement à la fatigue mécanique observé sur le manège LCPC.

Par contre les essais de fatigue à force imposée donnent des résultats qui sont plus en adéquation avec le comportement observé.

3.4.3 ANALYSE MULTICRITERE DES ESSAIS DE MODULE ET DE FATIGUE

Les critères de sélection énumérés au point 3.3 sont :

- [1] Le caractère prévisionnel des essais au regard d'une durabilité optimum des chaussées
- [2] La pertinence des essais aux regards des modes de sollicitation
- [3] La fiabilité des essais du point de vue de la reproductibilité
- [4] La réalisation des essais selon des procédures normalisées et en particulier selon les nouvelles normes européennes CEN
- [5] L'interprétation des résultats de l'essai, c'est-à-dire les caractéristiques mesurées fournissent-elles une propriété intrinsèque de l'enrobé ayant un caractère de performance
- [6] La diffusion dans les laboratoires des centres de recherche nationaux et privés en Suisse, notamment sur le plan de l'accessibilité de l'équipement (disponibilité, coûts) et de l'exploitation des résultats.

Sur la base des ces critères et sur la base des informations récoltées sur les essais de module et de fatigue, établissons un tableau comparatif multicritère qui permettra de se diriger sur le choix de l'essai le plus approprié dans le cadre des objectifs du projet Unterhalt 2000. Introduisons des appréciations qualitatives selon le barème suivant :

- ++ pertinent
- + satisfaisant
- peu satisfaisant
- sans intérêt
- 0 pas de référence

Essai	Critères de sélection					
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
2 Points Bending Test	+	+	++	++	+	++
3 Points Bending Test	0	+	++	++	+	-
4 Points Bending Test	0	+	++	++	+	-
Co-Axial Shear Test*	0	++	+	--	+	++
Tension Compression Test	0	++	+	--	++	-
Indirect Tensile Test	0	++	+	++	+	-

* uniquement la détermination du module

Tableau 5: Comparatif multicritère des essais de module et de fatigue

3.4.4 CONCLUSIONS

Par élimination, le choix de l'essai de module et de fatigue se dirige sur l'essai de flexion en 2 points sur des éprouvettes trapézoïdales, de plus notons que cet essai est :

- couramment appliqué en Suisse au LAVOC depuis 20 ans et bénéficie d'un background, au niveau européen, conséquent.
- commercialisé par le LCPC en France et a fait l'objet de nombreuses applications tant au niveau de la recherche fondamentale que des applications dans le dimensionnement des chaussées par les entreprises privées
- utilisé dans le cadre de la méthode de dimensionnement des chaussées en France [43] et en Belgique qui permet de déterminer des durées de vies de l'enrobé en se basant sur les résultats obtenus par l'essai. Cette approche permet d'utiliser les résultats d'essai en laboratoire pour estimer la durée de vie d'une chaussée.

3.5 ESSAIS DE CARACTERISATION DES DEFORMATIONS PERMANENTES

3.5.1 RECENSEMENT DES ESSAIS

Le tableau suivant propose une synthèse des essais de caractérisation des déformations permanentes recensés de part le monde :

Essai	Centre de recherche / Pays
Ornièreur LPC	LAVOC, EMPA, VIAGROUP, ERTEC CH, LCPC F
Essai de fluage dynamique	IMP Bautest, EMPA CH
Wheel-Tracking Test (WTT)	British Standards Institution, UK
Repeated Load Axial Test (RLAT)	University of Nottingham, UK Infrastructure Division, Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, UK
Vacuum Repeated Load Axial Test (VRLAT)	University of Nottingham, UK Infrastructure Division, Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, UK
Dynamic Triaxial Compression Creep Test	Delft University of Technology, NL

Tableau 6: Recensement des essais de caractérisation des déformations permanentes

Essai	Caractéristiques de l'essai	Paramètres mesurés
Orniéreur LPC	<ul style="list-style-type: none"> - Epreuve de forme prismatique - Passage répété d'une roue à une température d'essai constante - Les caractéristiques principales de l'orniéreur sont les suivantes: <ul style="list-style-type: none"> Dimensions des plaques: L * B * H = 500 * 180 * max. 140 mm charge exercée par le vérin : max. 5 kN pression du pneu : 0,100 à 0,700 MPa fréquence : 7200 passages/heure essai réalisé simultanément sur 2 plaques - Essai normalisé dans les normes françaises (NF P 98-253-1) et recommandé dans la norme suisse SN 640 431b - Essai utilisé avec succès depuis plus de 20 ans notamment en France, en Belgique et en Suisse (LAVOC) - Bonne répétabilité et reproductibilité de l'essai - Equipement commercialisé 	L'essai fournit la profondeur d'ornière ou déformation en pourcentage de la hauteur initiale de l'éprouvette PI%
Essai de fluage dynamique	<ul style="list-style-type: none"> - Epreuve de forme cylindrique issu de l'essai Marshall, PCG SHRP, carottes prélevées in situ - Déplacement axial imposé d'amplitude constante en tête de l'éprouvette (haversine) - Les caractéristiques principales de l'essai sont les suivantes: <ul style="list-style-type: none"> Température d'essai 50°C 10'000 cycles - Essai normalisé dans les normes allemandes (TPA-StB /FGSV), essai particulièrement adapté pour les formules riches en mastic (SMA, Gussasphalt) - Equipement commercialisé - Grande expérience de l'essai en Suisse notamment chez C. Angst de IMP Bautest SA , essai en cours de discussion au niveau de la normalisation suisse 	Mesure de la pente de la déformation en phase linéaire dans un graphe déformation/cycles

<p>Wheel-Tracking Test (WTT)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Epreuve de forme prismatique - Passage répété d'une roue à une température d'essai constante - Les caractéristiques principales de l'orniéreur sont les suivantes: <ul style="list-style-type: none"> Dimensions des plaques: L * B * H = charge exercée par le vérin : pression du pneu : fréquence : - Essai normalisé dans les normes anglaises BS 598 : part 110 1996 - Equipement commercialisé 	<p>L'essai fournit la profondeur d'ornière ou déformation en pourcentage de la hauteur initiale de l'éprouvette</p>
----------------------------------	---	---

<p>Repeated Load Axial Test (RLAT)</p> <p>et</p> <p>Vacuum Repeated Load Axial Test (VRLAT)</p>	<p>- Eprouvette de forme cylindrique réalisée en laboratoire ou prélevées in situ</p> <p>- Déplacement axial imposé d'amplitude constante en tête de l'éprouvette</p> <p>- Les caractéristiques principales de l'essai sont les suivantes:</p> <p style="padding-left: 40px;">Le signal est de forme carrée avec un temps de 1 seconde d'application et 1 seconde de repos Amplitude du signal de 100kPa Température d'essai 40°C, 45°C 1'800 cycles Eprouvette soumise à une pression de confinement de 50kPa (VRLAT)</p> <p>- RLAT :essai normalisé dans les normes anglaises (BSI DD226)</p> <p>- VRLAT : essai en cours d'évaluation par le groupe de travail de normalisation anglaise</p> <p>- L'essai permet de différencier le comportement aux déformations permanentes des enrobés constitués de bitumes différents mais est peu susceptible face à la teneur en vide des éprouvettes, un confinement de l'éprouvette est plus approprié (VRLAT)</p> <p>- Le RLAT corrèle pas avec des essais de Wheel-Tracking Test, contrairement au VRLAT qui donne de meilleurs résultats</p> <p>- Equipements commercialisés</p> <p>- Aucune expérience connue en Suisse, essais couramment utilisés en Grande-Bretagne</p>	<p>Mesure de la déformation relative de l'éprouvette</p>
---	--	--

Tableau 7: Descriptif des essais de caractérisation des déformations permanentes [1][11][38][34]

Sur la base des essais recensés et des publications traitant de la problématique des déformations permanentes des enrobés bitumineux, citons les points suivants :

- De nombreux auteurs ont étudiés la caractérisation des déformations permanentes par des essais de fluage dynamique confiné et non confiné. En particulier, des investigations réalisées en 1990 par Valkering et en 1995 par Molenaar ont mis en évidence, d'une part, l'intérêt accru d'un essai de fluage dynamique par rapport à un essai de fluage statique en particulier pour des enrobés constitués de liants modifiés aux polymères [47], et d'autre part, qu'un confinement radial de l'éprouvette lors d'un essai de fluage dynamique était nécessaire afin de permettre une comparaison pertinente entre différents types d'enrobés bitumineux de granulométries différentes [34]. Toutefois, Molenaar précise qu'un tel essai triaxial de fluage dynamique ne permettait pas d'obtenir une caractéristique intrinsèque de l'enrobé ; la réponse de l'essai est dépendante des dimensions de l'éprouvette et de la forme de la sollicitation.

- Il apparaît que les essais à disposition ne permettent pas d'obtenir une caractéristique intrinsèque du comportement de l'enrobé face aux déformations permanentes, les résultats obtenus dépendent du type d'appareillage et de la procédure de l'essai.

3.5.2 REFERENCES SUR L'APPROCHE PERFORMANCIELLE IN SITU

Une étude prospective a été menée dans l'état du Colorado par le département des transports de l'état du Colorado et le centre de recherche routière Turner Fairbanks avec l'orniéreur LCPC [4]. Il s'agissait pour l'essentiel de vérifier les capacités de prédiction du matériel en procédant à des essais sur des enrobés dont le comportement sur le terrain était connu. Des échantillons de chaussée ont été identifiés et soumis à l'orniéreur LPC. L'originalité de l'étude a consisté à tester les enrobés à différentes températures. Les résultats ont montré qu'il y avait corrélation entre les résultats de l'essai et l'ornière mesurée en place lorsque l'on prenait en compte le volume du trafic et la température du site.

En Suisse, un mandat de recherche en cours de réalisation a pour objectif de permettre la prédiction en laboratoire de l'évolution de l'ornière d'un enrobé bitumineux en place compte tenu des sollicitations générées par le trafic et des conditions climatiques qui sont propres à la Suisse. Ce mandat est actuellement en cours au LAVOC [32].

3.5.3 ANALYSE MULTICRITERE DES ESSAIS DE CARACTERISATION DES DEFORMATIONS PERMANENTES

Essai	Critères de sélection					
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
Orniéreur LPC	+	+	++	++	-	++
Essai de fluage dynamique	0	-	0	++	-	++
Wheel-Tracking Test (WTI)	0	+	0	++	-	--
Repeated Load Axial Test (RLAT)	0	-	0	++	-	--
Vacuum Repeated Load Axial Test (VRLAT)	0	+	0	--	+	--

Tableau 8: Comparatif multicritère des essais de caractérisation des déformations permanentes

3.5.4 CONCLUSIONS

Le choix d'un essai de mesure des déformations permanentes se dirigent vers l'essai d'orniérage LPC, notamment par l'analyse des points suivants :

- il est couramment appliqué en Suisse au LAVOC depuis 20 ans et bénéficie d'un background conséquent, de plus L'EMPA, ERTEC, IMP-Bautest ainsi que VIAGROUP SA sont de même équipés de l'orniéreur LPC,
- En France, il est commercialisé par le LCPC et a fait l'objet de nombreuses applications tant au niveau de la recherche fondamentale que des applications dans le dimensionnement des chaussées par les entreprises privées,
- L'essai fournit un indicateur fiable sur la performance des chaussées vis-à-vis des déformations permanentes. Cet indicateur est utilisé depuis de nombreuses années dans l'évaluation des performances sur les déformations permanentes en France.

3.6 ESSAIS DE CARACTERISATION DU COMPORTEMENT AUX BASSES TEMPERATURES

Les chapitres suivants sont repris du travail de thèse réalisé au LAVOC par Pucci [39].

3.6.1 RECENSEMENT DES ESSAIS

Dans le cadre du programme américain SHRP, Vinson [48] a recensé les essais de caractérisation du comportement à basse température des enrobés bitumineux. Le Tableau 9 présente cette synthèse :

Type d'essai	Caractéristiques mesurées	Référence
Traction directe	Contrainte et déformation - contrainte de rupture, module de rigidité	[1] [7] [31] [48]
Compression diamétrale (traction indirecte)	Contrainte et déformation - contrainte de rupture, module de rigidité	[48] [55]
Essai de fluage et de relaxation	Contrainte et déformation - module de rigidité	
Essai de flexion répétée en 3 points	Contrainte et déformation - contrainte de rupture, module de rigidité	
Essai de retrait thermique empêché (TSRST)	Contrainte induite thermiquement, contrainte et température de rupture	[1][3][30][35][48] à [52] et [55]
Détermination des coefficients de dilatation et contraction thermique	Coefficients de dilatation/contraction	[27][36][48]
Essai de détection acoustique	Détection acoustique des microfissurations	[52]

Tableau 9: Synthèse des essais de caractérisation du comportement des enrobés bitumineux à basse température

Notons que ces essais sont réalisés à des températures inférieures à 0°C

3.6.1.1 *bilan international*

Europe

Sous l'égide du projet européen de recherche COST 333 dont le thème principal est : "Développement d'une nouvelle méthode de dimensionnement des enrobés bitumineux", une sous-commission WG4 a été mise sur pied dans le but de recenser les facteurs intervenant dans les méthodes de dimensionnement vis-à-vis des conditions climatiques [46]. Dix-huit pays, dont la Suisse, ont pris part à ce programme de recherche. Un large éventail de climats européens y est représenté, notamment les climats des pays méditerranéens, pays scandinaves et pays d'Europe centrale. Au travers ce recensement, il apparaît que la problématique de la fissuration par sollicitation thermique à basse température n'est traitée uniquement que par la Suède et la Finlande. En Suède, la "Division of Highway Engineering" de l'Université "Royal Institute of Technology" de Stockholm participe activement aux recherches sur le comportement des enrobés bitumineux à basse température par le biais d'un essai de retrait thermique empêché sur enrobé.

En Allemagne, à la fin des années septante, la fréquence élevée de la fissuration de surface des routes a motivé le développement d'un essai de laboratoire simulant le comportement à basse température des enrobés. Le professeur Arand, de l'université technique de Braunschweig, est le précurseur des études menées dans ce sens [2][3]. Il a axé ces travaux sur un essai permettant d'effectuer du retrait thermique empêché, de la traction directe et des essais de relaxation sur des enrobés.

Etats-Unis

Initié aux débuts des années nonante, le programme américain SHRP (Strategic Highway Research Program) avait comme objectif, au niveau des chaussées routières, de relier des caractéristiques rhéologiques des enrobés bitumineux au comportement observé in situ. Ce programme a abouti aux spécifications SUPERPAVE applicables aux bitumes et aux enrobés bitumineux. Ces spécifications ont pour objectif de limiter les risques de déformation permanente des chaussées, les risques de fissuration par sollicitations mécaniques répétées et les risques de fissuration par sollicitations thermiques à basse température [28]. Pour ces dernières, les recommandations se basent uniquement sur des caractéristiques rhéologiques du bitume ; celles-ci sont liées aux caractéristiques mesurées à l'aide du Bending Beam Rheometer (BBR) et si nécessaire, par un essai de traction directe sur bitume. L'essai de retrait thermique empêché, issu du programme SHRP, sur enrobés a été utilisé comme outils de validation du BBR; l'essai, qui se nomme TSRST, est considéré par Vinson et al. [48] comme l'essai accéléré simulant le mieux les conditions de sollicitations thermiques des couches d'enrobés bitumineux en place dans les chaussées routières.

3.6.2 REFERENCES SUR L'APPROCHE PERFORMANCIELLE IN SITU

L'essai TSRST a été validé in situ par l'analyse de cinq sections routières en Alaska, en Pennsylvanie, et en Finlande [49]. Les résultats du TSRST ont été comparés à des indices de fissuration caractérisés par la fréquence des fissures transversales. L'ensemble des sections testées présente des températures en surface de l'ordre de

-20°C à -25°C. Il apparaît que les résultats des essais TSRST, réalisés sur des éprouvettes de laboratoire ainsi que sur des éprouvettes carottées in situ, ont une bonne correspondance avec les indices de fissuration. Toutefois notons que cette validation, basée sur un faible échantillon de population, ne peut fournir une référence satisfaisante au regard de nos conditions climatiques tempérées.

En Suisse, une campagne d'essais TSRST a été menée sur des éprouvettes d'enrobé prélevées in situ sur 16 sections d'essais le long de la N9 dans le canton du Valais [39]. Ces 16 sections, dites "les planches comparatives du Valais", diffèrent uniquement par le choix du bitume de formulation de la couche de roulement. Les planches comparatives présentent une palette de bitumes représentative de la tendance du marché de ces dix dernières années, soit des bitumes classiques, des bitumes modifiés et des bitumes composés d'ajouts pulvérulents. Le type de la superstructure, la conformité des matériaux aux exigences fixées dans les normes y relatives et l'exécution de la chaussée dans les exigences requises, ne permettent pas d'introduire un doute sur une fatigue mécanique prématurée de la couche de roulement. Le suivi des planches comparatives pose de nombreuses questions sur la durée de vie des chaussées routières soumises aux sollicitations thermiques contrastées ; en effet, le Valais possède un climat subissant des variations journalières et saisonnières importantes de température. L'analyse des résultats de laboratoire des matériaux prélevés dans la couche de roulement a distingué une caractéristique de l'essai TSRST qui est en adéquation avec l'état de la fissuration de surface relevé après 10 ans de mise en service.

3.6.3 CONCLUSIONS

L'expérience acquise dans le domaine de la rupture des enrobés bitumineux aux basses températures au travers l'essai de retrait thermique empêché est des plus prometteuses et mérite d'être retenu dans le cadre de ce projet de recherche. Cet essai de simulation sur enrobé est le plus répandu dans les laboratoires routiers de par le monde, et a fait l'objet de validation in situ aux Etats-Unis, dans le nord de l'Europe et particulièrement en Suisse.

Néanmoins cet essai n'est pas encore très répandu dans les laboratoires suisses et vu sa complexité il reste un outil de recherche important. La caractérisation du comportement aux basses températures est surtout important pour les enrobés à module élevé (EME) et les matériaux bitumineux recyclés. Pour ces différentes raisons l'essai de retrait thermique empêché n'a pas été considéré pour établir la méthode de formulation mais est recommandé en tant qu'essai de performance.

CHAPITRE 4 SYNTHÈSE DES ESSAIS

4.1 ESSAIS RETENUS SUR ENROBES

Sur la base de l'inventaire et de l'analyse multicritère déjà mentionnée, une synthèse sur les essais est établie.

Performance souhaitée	Essais sur enrobés			
	LAVOC : Durabilité des enrobés (PR3)		EMPA : Durabilité des composants (PR2)	
	Essais	Détails	Essais	Détails
Module	Flexion 2 points sur éprouvettes trapézoïdales	module 15°C; 10Hz [MPa]	koaxialer Schubtest	différentes temp. et fréq.
Résistance à la fatigue	Flexion 2 points sur éprouvettes trapézoïdales	courbe de fatigue à 10°C, 25 Hertz, 100 à 400 [10 ⁻⁶ m/m]	essai en 4 points, éprouvettes de 50-50-500mm	essai à 10°C, 10 Hertz, 180 [10 ⁻⁶ m/m]
Résistance aux déformations permanentes			druck-Schwell	deux températures
Résistance à l'orniérage	orniéreur LPC (c.f. annexes)	ornière [%] à 10'000 cycles et 60°C	orniéreur LPC	ornière [%] à 10'000 cycles et 60°C
Comportement aux basses températures	essai de retrait thermique empêché (c.f. annexes)	température de rupture [°C], temp. de transition [°C] et contrainte de rupture [Mpa]		
Susceptibilité à l'eau	compression diamétrale d'éprouvettes (PCG, Marshall, carottes) immergée et non immergée	ITSR : Indirect Tensile Strength Ration [-]	compression diamétrale d'éprouvettes (PCG, Marshall, carottes) immergée et non immergée	ITSR : Indirect Tensile Strength Ration [-]
Adhésivité des couches			essai Leutner selon norme SN	force maximale de cisaillement [kN]

4.2 ESSAIS PROPOSES SUR LES COMPOSANTS

La liste des essais proposés pour la caractérisation des composants, dans le but de quantifier leurs propriétés empiriques, semi-empiriques et intrinsèques afin de fournir des indicateurs de performance de ceux-ci, est issu des futures recommandations européennes CEN en la matière. La norme SN EN 12591 présente les conséquences sur les normes suisses qui restent en vigueur ainsi que sur celles qui sont abrogées.

4.2.1 ESSAIS SUR LES BITUMES

Essai	Normes SN	Normes CEN	COMPETENCE		Essai réalisé
			LAVOC	EMPA	
Détermination de la solubilité	670 500-1	EN 12592:1999	non	oui	✓
Détermination du point de rupture selon Fraass	670 500-2	EN 12593:1999	oui	oui	✓
Détermination de la résistance au vieillissement sous l'influence de la chaleur et de l'air; Partie 1: procédé RTFOT	670 500-11	EN 12607-1:1999	oui	oui	✓
Détermination de la pénétration	670 500-7	EN 1426:1999	oui	oui	✓
Détermination du point de ramollissement; méthode anneau et bille	670 500-8	EN 1427 :1999	oui	oui	✓
Viscosité dynamique à 60°C	670 500-5	EN 12596:1999	non	oui	✓
Viscosité cinématique à 135°C	670 500-4	En 12595 :1999	non	oui	✓
Ductilité	671 746	non	oui	oui	✓
Shear Rheometer	non	non	non	oui	✓
Bending Beam Rheometer	non	non	non	oui	✓
Direct Tensile test	non	non	oui	non	✓

Essai	Normes SN	Normes CEN	COMPETENCE		Essai réalisé
			LAVOC	EMPA	
Cas particulier pour les bitumes modifiés					
Force-Ductilité	670 548	non	non	En cours de préparation	non
Recouvrance élastique	671 747	non	oui	oui	✓
Stabilité au stockage	671 750	non	oui	oui	non

4.2.2 ESSAIS SUR LES GRANULATS

Essai	Normes SN	Normes CEN	COMPETENCE		Essai réalisé
			LAVOC	EMPA	
description pétrographique simplifiée	670 901-3	EN 932-3	Non	Non	non
Analyse granulométrique par tamisage	670 902-1	EN 933-1	Oui	Oui	✓
Détermination de la forme des granulats – Coefficient d'aplatissement	670 902-3	EN 933-3	Oui	Oui	✓
Détermination de la forme des granulats – Coefficient de forme	670 902-4	EN 933-4	Oui	Oui	✓
Evaluation des caractéristiques de surface - Détermination du pourcentage de surfaces cassées dans les gravillons	670 902-5	EN 933-5	Oui	Oui	✓
Evaluation des fines – Equivalent de sable	670 902-8	EN 933-8	Oui	Oui	✓
Qualification des fines – Essai au bleu de méthylène	670 902-9	EN 933-9	Oui	Oui	✓
Détermination des fines – granularité des fillers (tamisage dans un jet d'air)	Non	EN 933-10	Oui	Oui	✓
Détermination de la résistance à l'usure (micro-Deval)	670 903-1	EN 1097-1	Oui	Non	✓
Méthode pour la détermination de la résistance à la fragmentation (Los Angeles)	670 903-2	EN 1097-2	Oui	Oui	✓
Détermination de la porosité du filler sec compacté	670 903-4	EN 1097-4	Oui	Oui	✓
Détermination de la masse volumique réelle du filler – Méthode au pycnomètre	670 903-7	EN 1097-7	Oui	Oui	✓
Détermination du coefficient de polissage accéléré (CPA)	670 903-8	EN 1097-8	Oui	Oui	non
Détermination de la résistance au gel-dégel	670 904-1	EN 1367-1	Oui	Non	non
Essais sur les fillers utilisés dans les mélanges bitumineux; Partie 1: Essai bille-anneau	670 906-1	EN 13179-1	Oui	Oui	✓

CHAPITRE 5 FORMULATION

5.1 ETAT DES CONNAISSANCES

L'objectif principal de la formulation est de déterminer une composition optimale de granulats, de liants et de vides qui permette d'atteindre les performances visées. Dans la suite on fera une brève description des différentes méthodes de formulation les plus connues.

5.1.1 METHODE HVEEM

Les grands concepts derrière cette méthode ont été énoncés par Francis N. Hveem. Ingénieur de la Californian Department of Transportation (CDT), dans les années 30. Cette méthode a par la suite subie diverses améliorations pour devenir la méthode officielle de la CDT [6].

La procédure de formulation peut se définir en plusieurs étapes :

1. Le choix des matériaux

Ce choix doit être en accord avec le cahier des charges du projet. Les matériaux doivent satisfaire les propriétés physico-chimiques fixées dans celui-ci.

2. Le choix de la courbe granulométrique

La combinaison des différentes tailles d'agrégats doit permettre d'obtenir une courbe granulométrique aussi proche que possible de la courbe de référence fixée dans le cahier des charges.

3. La détermination de la teneur en liant approximative

Cette estimation découle de deux essais propres à cette méthode : le Centrifuge Kerosene Equivalent (CKE) et le Surface Capacity. En fonction de ces tests et de la densité réelle des fines et des pierres on peut, à travers des abaques spécifiques, obtenir une estimation de la teneur en liant optimale.

4. La préparation des échantillons

Les échantillons sont fabriqués selon une procédure et dans des moules normalisés. Le compactage se fait grâce à un compacteur mécanique avec une méthodologie qui est aussi normalisée. On devrait préparer un échantillon à la teneur en liant obtenue précédemment, deux avec des teneurs en liant inférieures (-0.5% et -1.0%) et un avec une teneur en liant supérieure (+0.5%).

5. Test de stabilité et de ressuage

Une fois compactés les échantillons sont soumis à ces deux tests. L'appareillage du test de stabilité est propre à la méthode Hveem ; des valeurs de stabilité minimales sont fixées en fonction du trafic. Le test de ressuage est plutôt qualitatif.

6. Le choix de la teneur en liant optimale

La teneur en liant optimale est la teneur en liant maximale dont l'échantillon satisfait les conditions de stabilité minimale, ne présente pas un ressuage important et la

teneur en liant est au moins égale à 4%. Si cette valeur est celle de la teneur en liant maximale préparée (estimation +0.5%) alors il faut préparer un échantillon supplémentaire avec une teneur en liant supérieure de +0.5% et refaire la procédure.

5.1.2 MARSHALL MIX DESIGN

Les premiers concepts de cette méthode furent développés par Bruce Marshall vers la fin des années 30, puis révisés et améliorés par la U.S. Army. Cette méthode, recommandée par les normes VSS en Suisse, vise à choisir la teneur en liant, pour une certaine densité du mélange, qui satisfait une stabilité minimale et un fluage évoluant dans un intervalle d'acceptation.[6]

La procédure de formulation peut se résumer en six étapes distinctes :

1. Le choix des agrégats

Les agrégats sont choisis selon leurs caractéristiques physiques (dureté, propreté, forme,...). Une fois ce choix effectué on détermine leur granulométrie et leur densité puis on choisit les différents agrégats nécessaires à l'obtention de la courbe granulométrique de référence.

2. Le choix du liant

Cette méthode ne possédant pas une procédure de sélection et d'évaluation normalisée, le choix est laissé à l'ingénieur qui devra réaliser les essais qu'il juge nécessaires.

3. La préparation des échantillons

Les échantillons sont fabriqués dans des moules normalisés. Typiquement on prépare 5 mélanges avec des teneurs en liant différentes, et, pour chaque mélange, trois échantillons. Les échantillons sont ensuite compactés à l'aide d'un marteau aux dimensions normalisées et selon des règles bien précises.

4. Détermination de la stabilité et du fluage

Une fois compactés les échantillons sont soumis à un essai de stabilité et fluage. La stabilité est la force maximale que peut supporter l'échantillon et le fluage est la déformation plastique qui s'ensuit. Ces deux valeurs sont en quelque sorte des mesures permettant de prévoir la performance de l'enrobé.

5. Calcul de la densité et des vides

La densité et les vides (vides du mélange, vides du squelette minéral, vides remplis par le bitume) permettent de caractériser le mélange.

6. Choix de la teneur en liant optimale

Ce choix dépend de la combinaison des résultats de stabilité et fluage, des vides et de la densité. Ainsi 6 graphes représentant l'évolution du pourcentage de vides, de la densité, du fluage, de la stabilité, des vides du squelette minéral (VMA) et des vides remplis par le bitume (VFA) en fonction de la teneur en liant sont tracés. Le choix du pourcentage de vides du mélange permet d'une part d'obtenir la teneur en liant optimale et d'autre part de vérifier si cette teneur en liant satisfait les exigences sur les autres paramètres. Ces deux actions se font graphiquement à l'aide des courbes issues des essais sur les échantillons.

5.1.3 SUPERPAVE MIX DESIGN

Cette méthode de formulation a été développée aux Etats-Unis pour remplacer la méthode Marshall. Elle connaît une grande application dans le domaine. Ainsi en 2000, 62% de la production totale en tonnes de revêtement bitumineux s'est faite par l'utilisation de cette méthode. [53]

Dans le cadre du programme de recherche SHRP (Strategic Highway Research Program) dont les objectifs étaient d'améliorer le choix des matériaux et la formulation d'enrobés bitumineux, une nouvelle méthode de formulation a été mise au point au début des années 90 : la méthode SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement).

La méthode de formulation SUPERPAVE est basée sur le concept de maniabilité lors de la pose ainsi que de la performance de l'enrobé dans le temps. Elle peut se diviser en quatre étapes [5] :

1. Le choix des agrégats

Ce choix suit trois critères différents. La courbe granulométrique qui doit être comprise entre deux limites et doit passer par des points fixes. Les spécifications caractéristiques des agrégats (*consensus properties*) : angularité, forme et équivalent en sable. Les critères spécifiques à la source des agrégats (*source properties*) : dureté, bruit et propreté.

2. Le choix du liant

Ce choix dépend, outre des caractéristiques physiques du liant (pénétration, viscosité, etc.), des conditions climatiques et du type de trafic. Il existe une graduation des liants (*performance grading (PG) system*) qui est fonction de la température maximale et minimale de la chaussée et des conditions de trafic. La détermination de ces trois paramètres associée avec une fiabilité minimale du résultat (*reliability design*) permet de définir le *grade* minimal du liant à utiliser.

3. Choix de la teneur en liant optimale

Des échantillons sont fabriqués avec quatre teneurs en liant différentes (variation de $\pm 0.5\%$) et soumis au compactage dans la *Superpave Gyratory Compactor (PCG)* (presse à cisaillement giratoire). On trace le graphique densité théorique maximal de l'enrobé en fonction du nombre de girations pour les quatre échantillons. Ensuite on détermine graphiquement la teneur en liant qui satisfait le pourcentage de vides voulu et le nombre de girations nécessaires pour l'obtenir. Le nombre de girations est défini par les conditions de trafic.

4. Essais de performances

Cette dernière étape, encore en développement, normalisera les essais à faire pour déterminer les caractéristiques mécaniques des mélanges, à savoir le module dynamique, le *flow time* et le *flow number*. [8]

5.1.4 PRINCIPE DE LA METHODE FRANÇAISE

Cette méthode repose sur deux grands axes. Le premier est la détermination de la quantité minimale de liant en fonction de la granulométrie du mélange. Le deuxième est l'utilisation de la presse à cisaillement giratoire pour estimer le comportement lors du compactage du mélange.

1. Quantité minimale de liant bitumineux.

Dans l'approche qui s'est codifiée en France dans les années cinquante, pour une composition granulométrique donnée, on définit une quantité de liant bitumineux minimale pour assurer une bonne durabilité du mélange par la notion de module de richesse K . Cette grandeur, qui est proportionnelle à une épaisseur conventionnelle du film de liant enrobant les granulats, est donnée par l'expression suivante qui relie K à la teneur en liant TL et à la surface spécifique conventionnelle des granulats Σ :

$$TL = K \alpha \sqrt[5]{\Sigma}$$

avec α , coefficient correcteur relatif à la masse volumique des granulats :

$$\alpha = \frac{2,65}{MVRg}$$

La surface spécifique conventionnelle Σ est calculée à l'aide de l'expression :

$$100 \Sigma = 0,25 G + 2,3 S + 12 s + 135 f$$

avec les proportions massiques :

G , des éléments supérieurs à 6,3 mm

S , des éléments compris entre 6,3 mm et 0,315 mm

s , des éléments compris entre 0,315 mm et 0,08 mm

f , des éléments inférieurs à 0,08 mm

2. Essai à la presse à cisaillement giratoire

Une composition du mélange étant choisie par référence à l'expérience antérieure, son comportement lors du compactage est estimé à l'aide de l'essai à la presse à cisaillement giratoire.

Une quantité prédéterminée du mélange hydrocarboné, portée à la température usuelle de fabrication de l'enrobé en centrale, est placée dans un moule cylindrique de 150 mm ou 160 mm de diamètre. Le compactage est obtenu par l'action concomitante :

- d'une force de compression statique assez faible correspondant à une pression de l'ordre de 0,6 MPa et
- d'une déformation de l'éprouvette à laquelle on impose que son axe longitudinal décrive une surface conique de révolution, de sommet O et d'angle au sommet 2α , pendant que les surfaces d'extrémité de l'éprouvette restent sensiblement horizontales. L'angle α est d'environ 1° . Il est déterminé pour chaque type de machine de façon à obtenir des pourcentages de vides fixés sur des matériaux pris comme référence. La vitesse de rotation a peu d'influence sur le résultat, elle est prise couramment égale à 30 tours/min.

L'interprétation de l'essai du point de vue de l'appréciation du comportement lors du compactage du mélange est faite en considérant les valeurs de pourcentages de vides obtenues en général après 10 girations et après un nombre de girations, N_g [25, 40, 60, 80, 100, 120 ou 200] qui dépend du type d'enrobé étudié.

Après 10 girations, il est en général spécifié une valeur minimale du pourcentage de vide (de l'ordre de 14 % pour des matériaux en couche de base) afin d'éviter

d'avoir un mélange trop maniable qui s'avèrerait difficile à compacter sans déformations excessives et conduirait à un matériau qui se révélerait aussi instable sous le trafic.

Après Ng girations, il est spécifié cette fois une fourchette de valeurs pour le pourcentage de vides (pour des bétons bitumineux courants utilisés en couche de surface, les pourcentages de vides doivent être compris entre 5% et 10%. Pour des enrobés destinés à des couches de base, seule la valeur maximale est spécifiée, elle peut atteindre 11%). La valeur maximale est destinée à assurer la durabilité du mélange, la valeur minimale vise à éviter une compacité excessive qui favoriserait l'instabilité du mélange et le développement de l'orniérage par fluage sous trafic, ainsi qu'à assurer le maintien d'une macro - texture suffisante pour les couches de roulement.

5.1.5 FORMULATION C.R.R.

Le Centre de Recherche Routière belge a également développé une méthode de formulation pour les enrobés bitumineux. Celle-ci se caractérise par le fait qu'elle est analytique ; l'utilisation d'un essai en laboratoire n'est justifiée que comme moyen de vérification des valeurs déterminées par la formulation volumique.

La procédure de formulation est identifiée dans la figure 4 et peut se résumer en trois phases [12][13] :

PHASE 1 : Choix et caractérisation des matériaux.

Comme pour les autres méthodes, le choix des composants du mélange est d'une grande importance pour le résultat et les performances de l'enrobé. Il est important de connaître les caractéristiques physiques des agrégats (granulométrie, dureté, propreté, etc.) et du liant (pénétration, susceptibilité thermique, etc.).

PHASE 2 : La formulation

La composition d'un mélange doit en premier lieu être conçue sur la base d'une méthode analytique prenant en compte les paramètres importants. Cette phase est intégrée dans le logiciel spécifique PRADO.

PHASE 3 : L'essai

L'utilisation d'un essai de laboratoire permet de vérifier les résultats de la formulation analytique et, le cas échéant, de corriger les éventuels écarts en agissant soit sur la composition soit sur les matériaux. Ce n'est que lorsque l'essai est en accord avec les résultats que l'on peut passer à l'étape finale qui sont le passage d'une formulation volumique à une formulation massique, grâce aux masses volumiques des composants, et le calcul des caractéristiques mécaniques de l'enrobé ainsi obtenu.

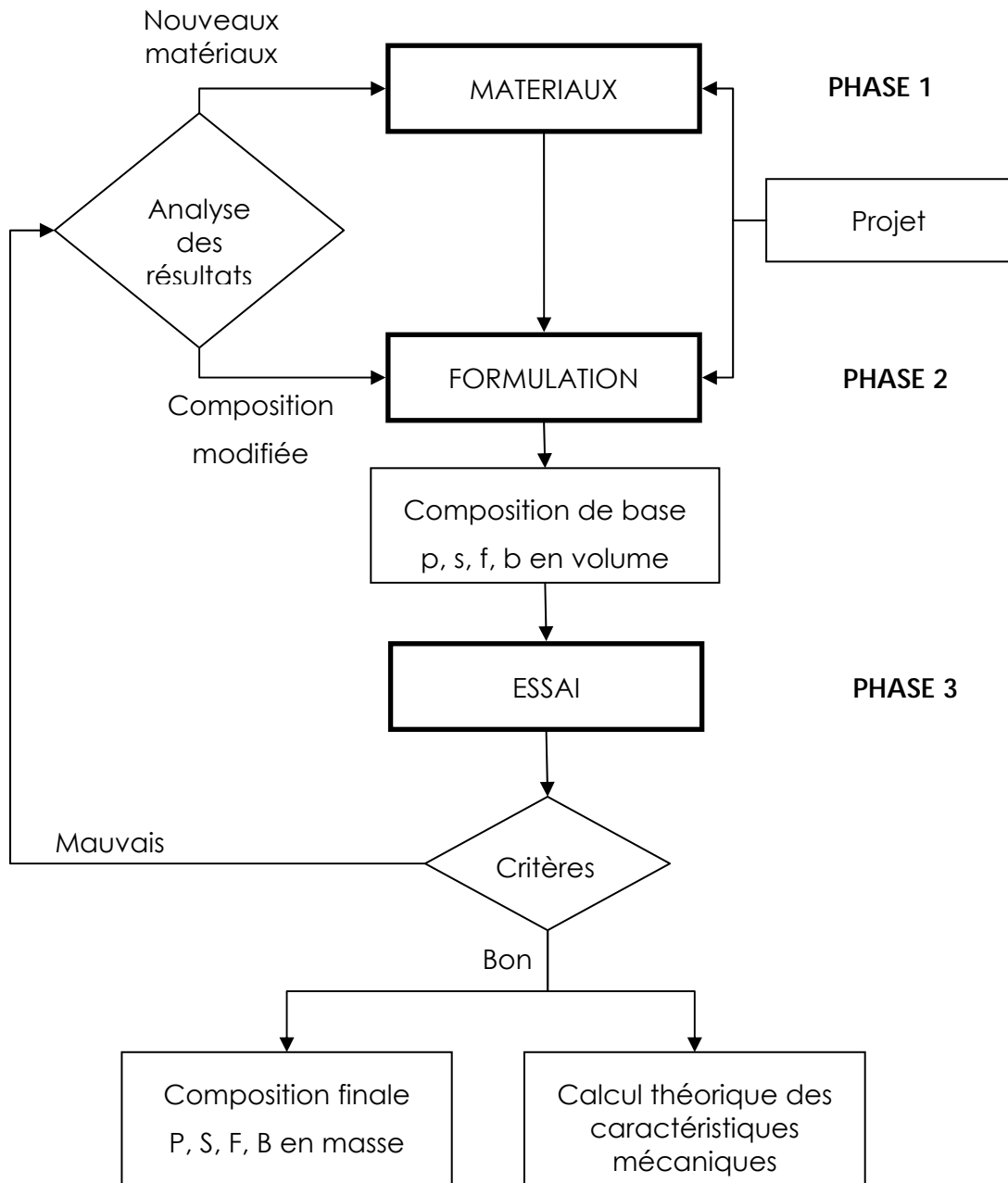


Figure 2: Procédure de formulation

5.2 DEMARCHE DE LA FORMULATION

Bien qu'à ce jour aucune méthode universelle s'affranchissant totalement de l'empirisme n'ait été mise au point, d'énormes progrès ont déjà été réalisés. La démarche de formulation recommandée par la suite, établie par le Prof. Dumont, se base sur la méthode de formulation belge en y associant une étape supplémentaire d'optimisation (et non seulement de vérification) utilisant l'essai Marshall ou mieux encore la Presse à Cisaillement Giratoire (PCG).

Le but de la formulation étant de déterminer une composition optimale de granulats, de liants et de vides qui permette d'atteindre les performances visées, il est primordial de définir les objectifs de performance que l'on souhaite atteindre. La démarche de formulation développée ici comporte cinq phases :

1. Définition du besoin en performance,
2. Sélection des composants,
3. Formulation volumique,
4. Optimisation,
5. Vérification.

Cette démarche est détaillée dans l'organigramme qui suit :

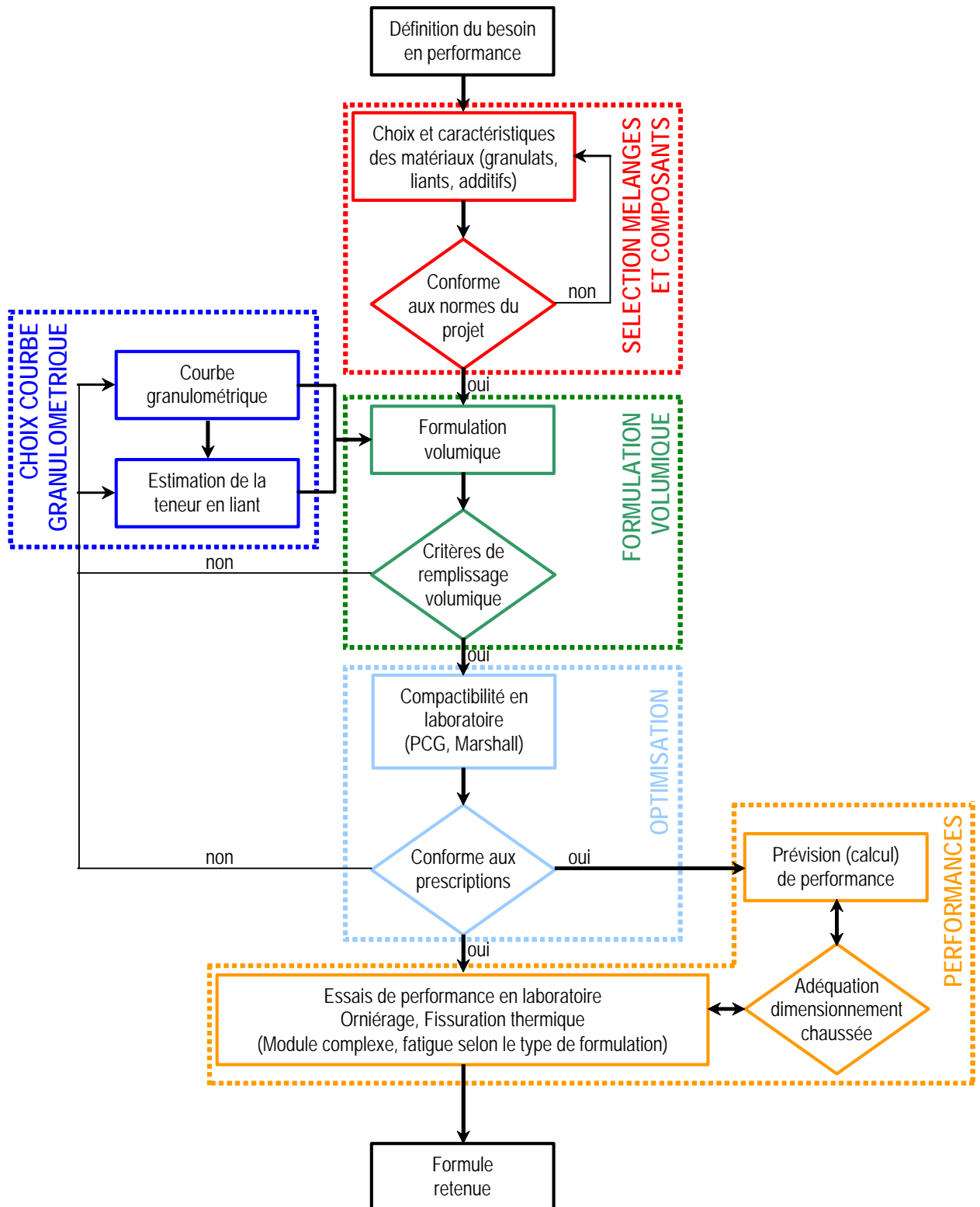


Figure 3 : Démarche proposée pour l'étude de formulation

5.2.1 DEFINITION DES BESOINS EN PERFORMANCE

La définition des besoins en performance consiste à choisir la valeur limite souhaitée vis-à-vis des comportements suivants :

- susceptibilité à l'orniérage,
- valeur(s) du module complexe,
- résistance à la fatigue,
- résistance à basse température,
- susceptibilité à l'eau.

En général ces performances sont traduites en pourcentage de vides minimal ou maximal, teneur en liant, caractéristiques des agrégats, etc.

5.2.2 SELECTION DES COMPOSANTS

La sélection des composants consiste à choisir les granulats, le liant et les ajouts utilisés pour la fabrication de l'enrobé. Ceci sur la base des considérations

- de trafic (volume, pourcentage de poids lourds, charge par essieu),
- de climatologie (pluviométrie, gel-dégel, température, ensoleillement),
- de position de la couche (roulement, base, fondation liée),
- de fonction de la couche (adhérence, perméabilité, bruit, orniérage, etc.).

Sur la base de ces considérations, les normes suisses SN 640 431b « Revêtement en béton bitumineux ; Conception, exigences, exécution », SN 640 432a « Couches de roulement en Splittmastixasphalt ; Conception, exigences, exécution » et SN 640 433b « Couches en enrobé drainant ; Conception, exigences, exécution » fournissent des recommandations pour le choix du type d'enrobé (AB, HMT, SMA, DRA, ...) ainsi que leurs spécifications relatives.

5.2.3 FORMULATION VOLUMIQUE

La formulation volumique doit commencer par la définition des critères de remplissage volumique. Ensuite, il faut déterminer la composition du mélange par la méthode volumique. Cette détermination se fait par les étapes suivantes :

- Evaluation de la teneur en vides du squelette minéral
- Détermination du volume disponible pour le mastic
- Détermination de la composition du mastic en fonction de la nature du bitume et du filler
- Vérification des critères de remplissage volumique.

L'évaluation de la teneur en vides du squelette minéral a peut se faire avec le logiciel PRADO, développé par le Centre de recherches routières (CRR) [26].

5.2.4 OPTIMALISATION

La compactibilité du mélange et le remplissage qui en résulte sont des indicateurs pertinents des performances in situ de l'enrobé. En plus de la fabrication de l'enrobé à partir de la teneur en liant déterminée par la formulation volumique, on fabriquera l'enrobé avec au moins quatre teneurs en liants différentes. On choisira des teneurs inférieures et supérieures qui devront varier de l'ordre de $\pm 0.15\%$ et $\pm 0.45\%$. À titre d'exemple, soit un résultat de la formulation volumique de 5.32%, les teneurs qui seront retenues sont :

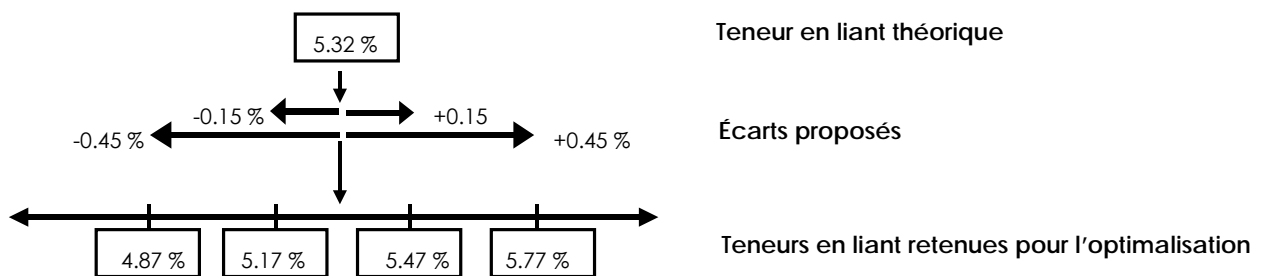


Figure 4 : Exemple de choix des teneurs en liant en vue de l'optimisation par la compactibilité

Des gâchées d'essai en laboratoire sont élaborées à chacune de ces teneurs et compactées soit en suivant la procédure Marshall, ou mieux encore, en soumettant l'enrobé chaud à un compactage à la presse à cisaillement giratoire (PCG).

5.2.5 PERFORMANCE

La performance des enrobés à travers le module complexe et la fatigue peut être réalisée par une approche purement théorique. Pour l'orniérage et le comportement à basse température cette approche théorique découle d'un essai en laboratoire ; on parle alors d'une approche prédictive. La possibilité d'évaluer les performances de manière analytique est une source d'économie tant en moyens économiques qu'en temps. Dans la procédure suivie au Lavoc l'évaluation des performances a été couplée avec des essais de performances en laboratoire pour calibrer et valider ces évaluations.

Il existe plusieurs méthodes prévisionnelles du module (p. ex. la relation de Heukelom et Klomp, Francken, Shell,...) et de la fatigue (p. ex. la relation de L. Francken). Dans le cas précis nous avons opté pour les formules développées par Francken [24] et les avons calibrés avec les essais en laboratoire.

En ce qui concerne l'orniérage il existe une méthode prévisionnelle qui a été développée au Lavoc dans le cadre du mandat de recherche 12/98 «Elaboration d'une méthode prédictive de l'orniérage des revêtements bitumineux» dont le rapport est en cours de relecture et paraîtra en 2005.

À l'heure actuelle, seule les valeurs limites de mesure de l'orniérage sont normalisées et doivent faire l'objet de vérification. Les caractéristiques de module et fatigue ainsi

que la résistance à basse température seront appréciées selon l'expérience de l'ingénieur.

5.2.6 NIVEAUX DE FORMULATION

Cette procédure globale de formulation peut se décomposer en trois niveaux de formulation selon le type de route, le trafic et les considérations climatiques.

Type de formulation	Etapes de formulation
Formulation de base	Formulation volumique + optimisation
Formulation intermédiaire	Formulation volumique + calcul module et fatigue + essai d'orniérage + (essai thermique)
Formulation avancée	Formulation volumique + essai d'orniérage + (essai thermique) + essai module et fatigue

Tableau 10: Niveaux de formulation

5.3 VALIDATION DE LA METHODE

La validation de la méthode a été réalisée en laboratoire avec la fabrication d'échantillons suivant la procédure établie plus haut. Aussi avons-nous réalisés des essais Marshall pour l'optimisation et des essais de module et de fatigue pour la vérification des performances des enrobés. Soulignons néanmoins que outre la procédure d'optimisation on a également voulu procéder à une analyse de sensibilité à la teneur en liant. Ainsi pour les enrobés AB 11S Uri/Valais et HMT 22S des valeurs supplémentaires de teneur en liant ont été rajoutées. Pour l'étude de sensibilité a été retenue une valeur de teneur en liant faisant partie des valeurs d'optimisation et on l'a fait varier de $\pm 0.5\%$. Dans les tableaux ces valeurs sont en bleu et ont été intégrés lors de l'optimisation du résultat.

Par ailleurs précisons que l'étude d'un nouveau matériau tel que l'enrobé à module élevé (EME 2) a été prise en compte une fois le projet démarré. Pour cette raison l'étude de formulation n'a pas été menée dans ce projet. Néanmoins le mandat de recherche 20/96 : « Evaluation des performances de nouveaux matériaux de revêtement : 1^{ère} partie : enrobés à haut module » [39] mené par le Lavoc a servi de base pour la formulation de l'enrobé EME 2 mis en place au rundlauf et pour la validation des performances à l'aide d'un calcul analytique.

5.3.1 DEFINITION DES BESOINS EN PERFORMANCE

Les enrobés utilisés pour la validation sont un AB 11S et un HMT 22S. Les besoins en performance de ces matériaux sont légèrement différents. L'AB 11S est utilisé comme couche de roulement, il doit donc présenter une bonne adhérence et une grande résistance à l'abrasion (choix de granulats concassés), une bonne tenue à l'orniérage et doit être suffisamment imperméable pour évacuer l'eau de pluie. Par ses considérations il a été fixé comme objectif un pourcentage de vides Marshall de

4%. Le compactage Marshall est considéré comme proche de la compacité en place.

Le HMT 22S est utilisé comme couche de base. Il est important d'avoir une bonne résistance à la fatigue ainsi qu'aux déformations permanentes. Par ces considérations la valeur cible du pourcentage de vides Marshall est de 5.5%.

5.3.2 SELECTION DES COMPOSANTS

Les granulats utilisés provenaient de la carrière Gasperini du canton d'Uri. Le liant était un liant 50/70 obtenu par distillation directe.

Ces composants ont un rôle important dans les performances des enrobés et leur choix doit être précédé d'une analyse de leurs caractéristiques.

5.3.3 CHOIX DE LA COURBE GRANULOMETRIQUE

Le choix des courbes granulométriques s'est fait à partir des résultats des analyses des matériaux prélevés fournis par l'EMPA. Ces matériaux ont été prélevés dans le cadre du paquet de recherche PR2 : « Durabilité des composants ». Pour l'enrobé AB 11S, deux courbes ont été retenues. Une courbe standard située au milieu du fuseau, provenant du matériau de Schwyz et une courbe creuse située au bas du fuseau, provenant d'une combinaison des résultats des matériaux provenant d'Uri et du Valais.

- Courbe granulométrique de l'enrobé AB 11S Schwyz :

Tamis [mm]	0.09	0.125	0.25	0.5	1	2	2.8	5.6	8	11.2
Passant cumulé [%]	9.0	12.3	17.3	23.8	32.7	46.6	55.6	71.1	86.0	100.0

Tableau 11 : Valeurs de la courbe granulométrique de l'enrobé AB 11S Schwyz

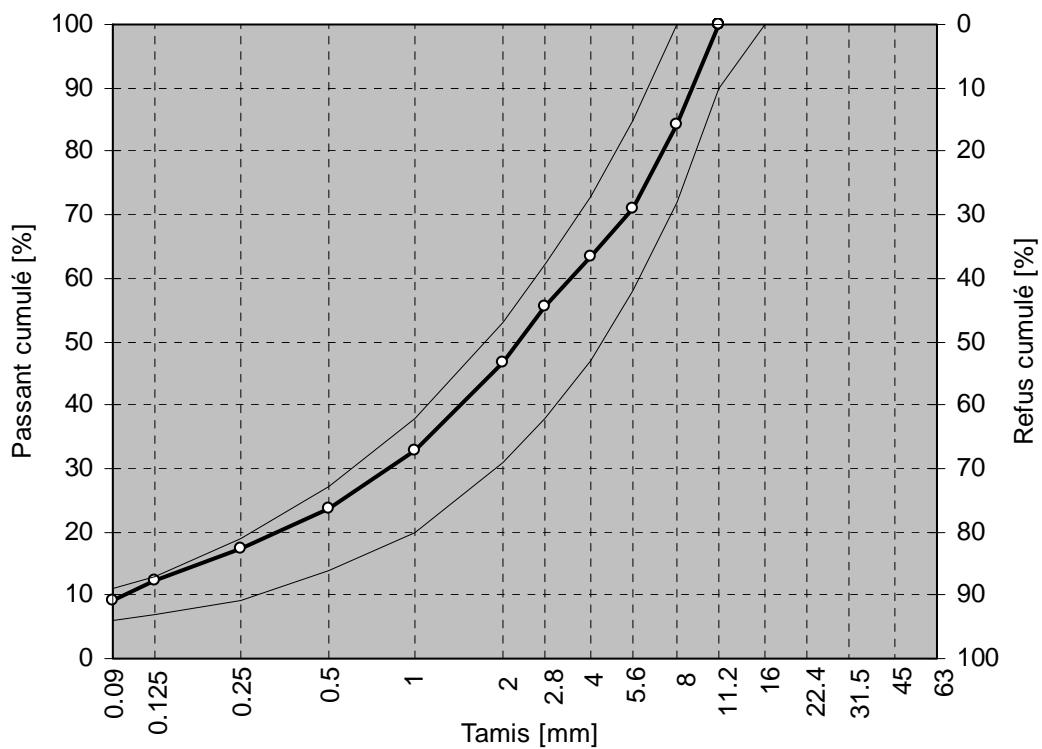


Figure 5 : Courbe granulométrique de l'enrobé AB 11S Schwyz avec le fuseau normalisé AB 11N/S ou HMT 11N/S

- Courbe granulométrique de l'enrobé AB 11S Uri/VS :

Tamis [mm]	0.09	0.125	0.25	0.5	1	2	2.8	4	5.6	8	11.2
Passant cumulé [%]	8.2	8.9	12.5	17.5	24.4	32.6	40.4	50.4	63.2	79.0	100.0

Tableau 12 : Valeurs de la courbe granulométrique de l'enrobé AB 11S Uri/VS

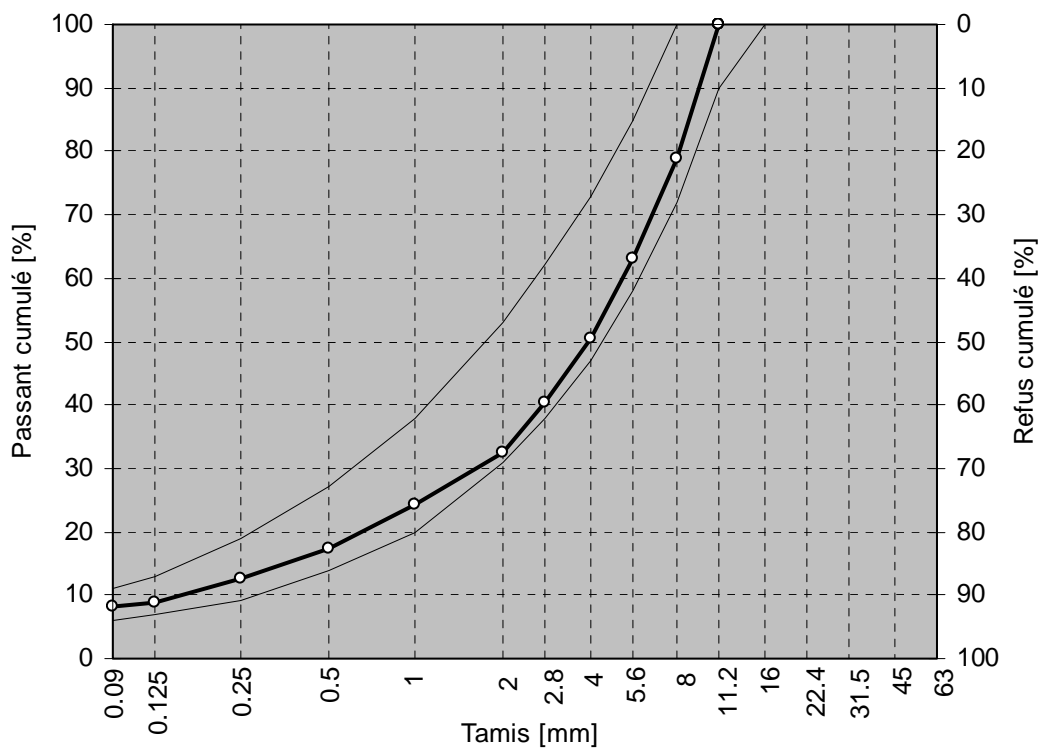


Figure 6 : Courbe granulométrique de l'enrobé AB 11S Uri/VS avec le fuseau normalisé AB 11N/S ou HMT 11N/S

- Courbe granulométrique de l'enrobé HMT 22S :

Tamis [mm]	0.09	0.125	0.25	0.5	1	2	2.8	4	5.6	8	11.2	16	22.4
Passant cumulé [%]	6.5	7.8	11.1	16.4	22.8	31.6	36.8	43.0	49.7	59.9	70.0	85.7	100.0

Tableau 13 : Valeurs de la courbe granulométrique de l'enrobé HMT 22S

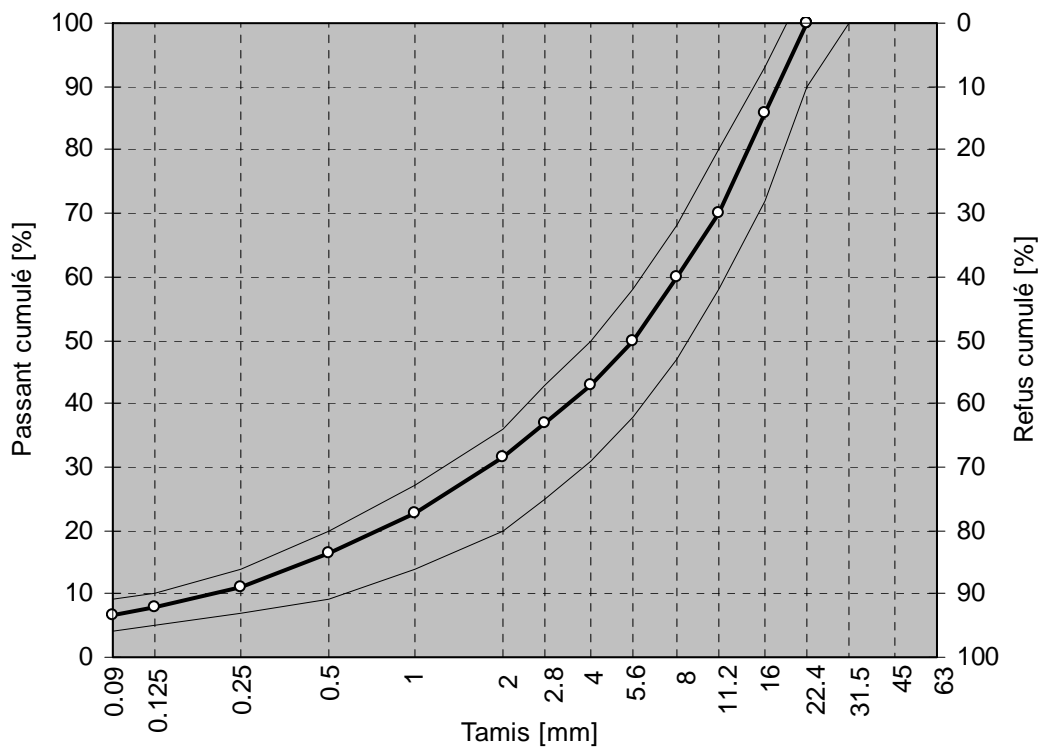


Figure 7 : Courbe granulométrique de l'enrobé HMT 22S avec le fuseau normalisé HMT 22N/S

- Courbe granulométrique de l'enrobé EME 2

Tamis [mm]	0.09	0.125	0.25	0.5	1	2	2.8	4	5.6	8	11.2	16	22.4
Passant cumulé [%]	7.5	8.8	11.9	17.1	23.3	31.8	36.8	43.0	49.7	59.9	70.0	85.7	100.0

Tableau 14 : Valeurs de la courbe granulométrique de l'enrobé EME 2

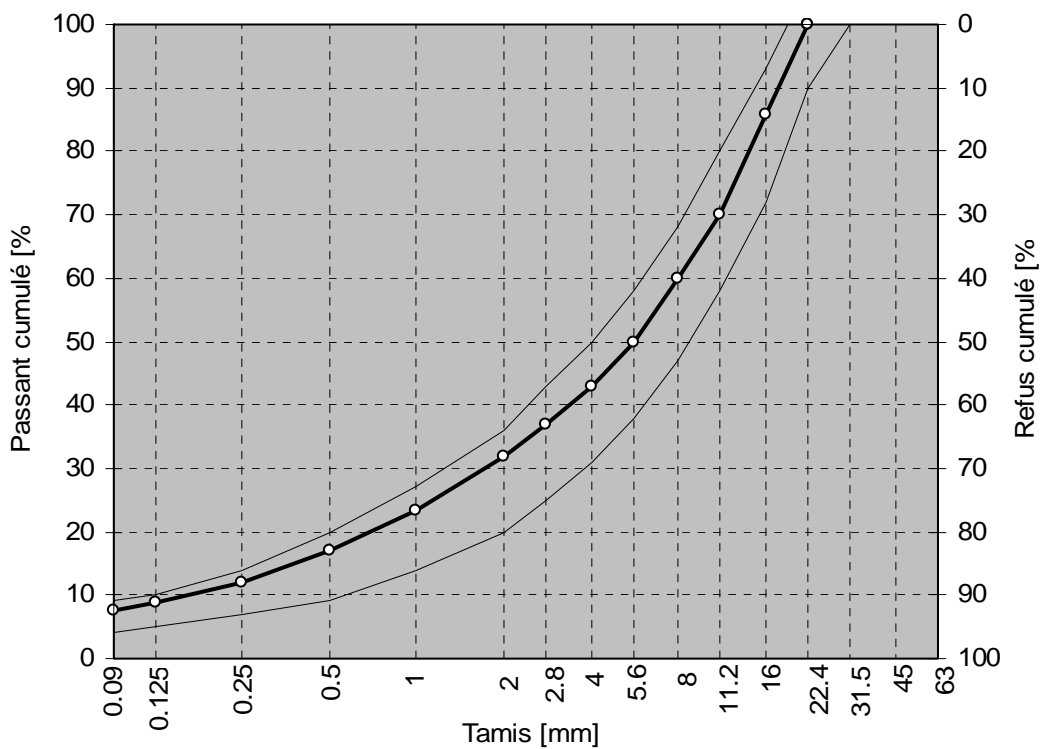


Figure 8 : Courbe granulométrique de l'enrobé EME 2 avec le fuseau normalisé HMT 22N

5.3.4 ESTIMATION DE LA TENEUR EN LIANT

L'estimation de la teneur en liant a été faite à l'aide du logiciel PRADO. Il a permis d'obtenir les valeurs suivantes :

Enrobé	Teneur en vides Marshall souhaitée [%]	Teneur en liant L/A [%]	Teneur en liant L/E [%]
AB 11S Schwyz	4.0	5.68	5.37
AB 11S Uri/VS	4.0	5.76	5.45
HMT 22S	5.5	3.96	3.81

Tableau 15 : Résultats de l'estimation de la teneur en liant par PRADO

5.3.5 OPTIMALISATION

L'optimisation a été faite par la teneur en vides Marshall. Plusieurs éprouvettes ont été façonnées avec des teneurs en liants oscillants autour de la valeur obtenue à l'estimation de la teneur en liant. La valeur finale de la teneur en liant est alors calculée par interpolation des résultats afin d'obtenir la teneur en vides Marshall désirée. D'une manière classique, ces éprouvettes sont confectionnées avec des écarts de ± 0.15 % et ± 0.45 %. On a rajouté les éprouvettes utilisées pour l'étude de sensibilité dont les résultats sont fournis au 5.3.8

- Enrobé AB 11S Schwyz

L/A [%]	5.53	5.68	5.83	5.83	5.9	5.9	6.13
Vides Marshall [%]	5.6	5.1	4.4	4.7	4.1	4.5	4.1

Tableau 16 : Valeurs de l'optimisation de l'enrobé AB 11S Schwyz

Vu la valeur des vides Marshall pour une teneur en liant de 5.53% il a semblé superflu de fabriquer un échantillon avec 5.23% (5.68-0.45).

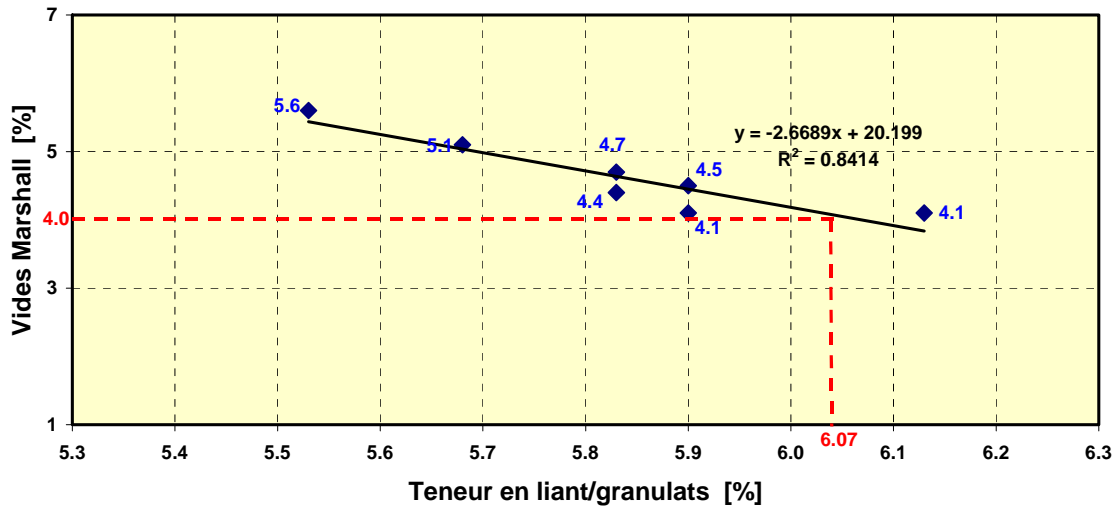


Figure 9 : Graphique de l'optimisation de l'enrobé AB 11S Schwyz

L'interpolation des résultats pour une valeur de teneur en vides Marshall de 4.0 % fournit une valeur de teneur en liant de 6.07 %.

- Enrobé AB 11S Uri/VS

L/A [%]	5.11	5.11	5.31	5.61	5.91	6.11	6.11	6.21
Vides Marshall [%]	5.2	5.9	4.8	4.2	3.1	2.7	3.4	2.7

Tableau 17 : Valeurs de l'optimisation de l'enrobé AB 11S Uri/VS

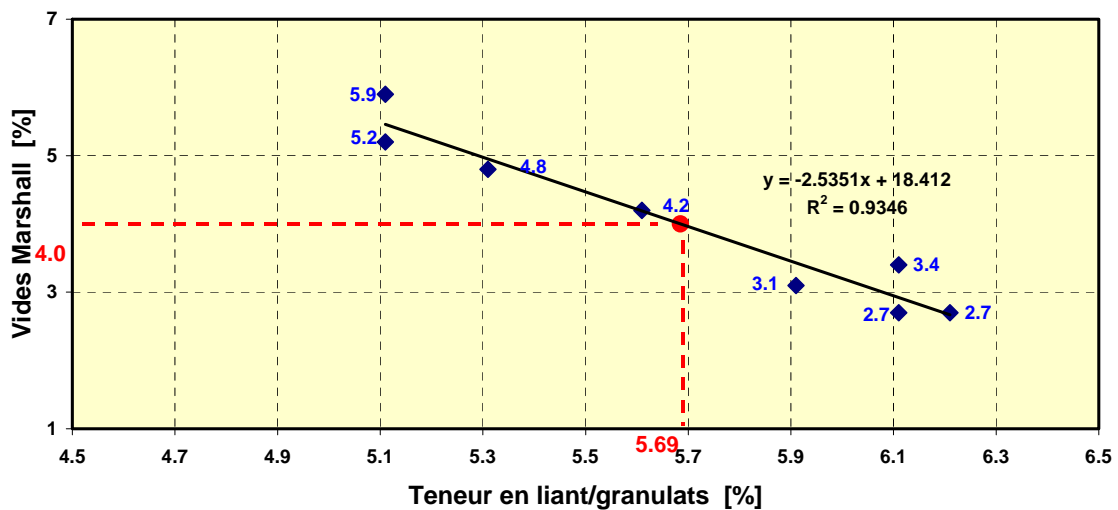


Figure 10 : Graphique de l'optimisation de l'enrobé AB 11S Uri/VS

L'interpolation des résultats pour une valeur de teneur en vides Marshall de 4.0 % fournit une valeur de teneur en liant de 5.69 %.

- Enrobé HMT 22S

L/A [%]	3.51	3.81	3.91	4.41	4.41	4.71	4.91
Vides Marshall [%]	7.4	6.5	7.6	5.3	5.8	4.8	4.5

Tableau 18 : Valeurs de l'optimisation de l'enrobé HMT 22S

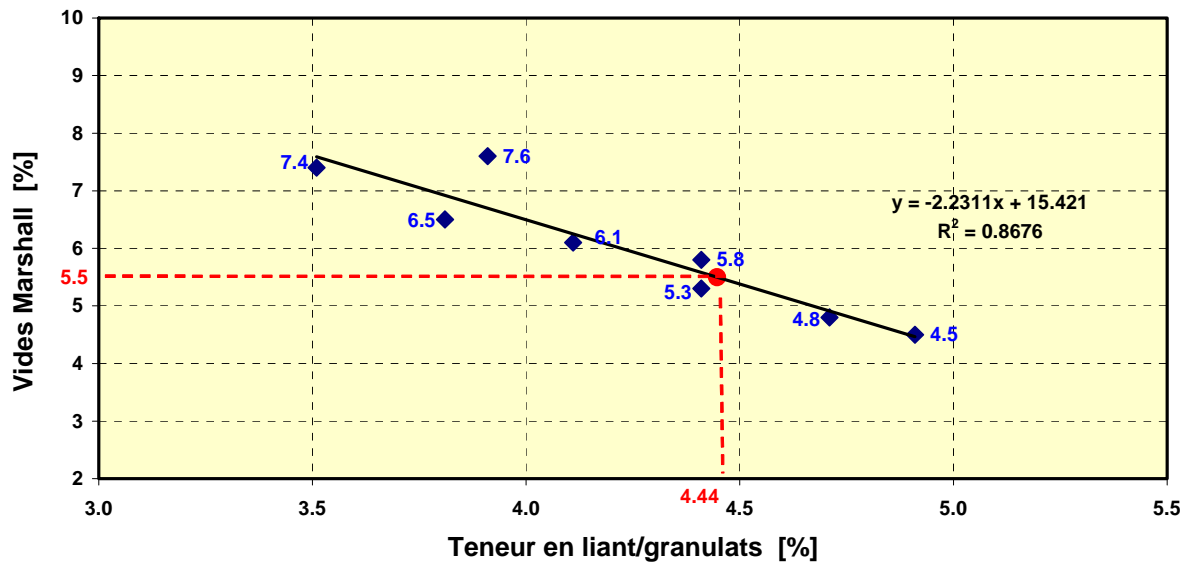


Figure 11 : Graphique de l'optimisation de l'enrobé HMT 22S

L'interpolation des résultats pour une valeur de teneur en vides Marshall de 5.5 % fournit une valeur de teneur en liant de 4.44 %.

- Enrobé EME 2

L'étude de formulation menée dans le mandat de recherche VSS 20/96 a fourni une teneur en liant optimale de 5.65 %. En laboratoire on a donc réalisé une échantillon avec cette teneur en liant pour faire les essais de performance.

5.3.6 VERIFICATION DE LA FORMULATION

La formulation volumique, à travers le logiciel Prado, a fourni des teneurs en liant en fonction des valeurs cibles des vides Marshall pour chaque enrobé. L'optimisation a ensuite amélioré cette valeur par interpolation. Pour connaître le niveau de précision entre la formulation analytique et le résultat final, comparons les valeurs obtenues.

Enrobé	Teneur en vides Marshall souhaitée [%]	Teneur en liant L/A obtenue avec Prado [%]	Teneur en liant L/A après optimisation [%]	Ecart absolu	Ecart relatif [%]
AB 11S Schwyz	4.0	5.68	6.07	0.39	+6.8
AB 11S Uri/VS	4.0	5.76	5.69	0.07	-1.2
HMT 22S	5.5	3.96	4.44	0.48	+12.1

Tableau 19: Comparaison des résultats fournis par Prado et des valeurs après optimisation

Les valeurs calculées à travers les formules analytiques sont une très bonne approximation du résultat final en ce qui concerne les deux enrobés AB 11S. En effet l'écart maximal relatif est inférieur à 7%. Par contre pour le HMT 22S cet écart dévient un peu plus important puisqu'il dépasse le seuil des 10% (+12.1%). De ce fait la valeur optimale n'est plus comprise dans l'intervalle d'optimisation ($4.44 > 3.96 + 0.45$).

5.3.7 PREVISIONS DE PERFORMANCE

Il existe la possibilité de modéliser, par une approche théorique, les performances mécaniques (module et fatigue) de l'enrobé. La méthode de formulation adoptée étant très proche de celle du C.R.R., l'approche théorique utilisée sera celle développée par L. Francken [24]. Cette méthode ayant été développée pour les matériaux belges, on peut se demander en quelle mesure les résultats s'adaptent aux matériaux utilisés en Suisse.

- Le module

Le travail de L. Francken a consisté à déduire, à partir d'une analyse statistique de différents résultats trouvés par divers auteurs (Heukelom et Klomp, Saunier, Verstraeten), une méthode permettant de prévoir le module complexe des mélanges bitumineux dans les limites d'erreurs acceptables.

En règle générale l'auteur propose la détermination du module complexe en deux étapes:

- La première se base sur le calcul du module purement élastique (E_{∞}) qui ne dépend principalement que de la composition du mélange
- La seconde est le calcul d'un module réduit (R^*), fonction de la fréquence réduite f_R (intégrant la fréquence de sollicitation et la température), dont la forme dépend des caractéristiques du bitume. Sa valeur est comprise entre 0 et 1.

La valeur du module complexe s'obtient par le produit de ces deux paramètres :

$$|E^*(f_R)| = E_{\infty} \cdot R^*(f_R)$$

Le logiciel de formulation (PRADO) permet également de calculer les performances en intégrant les formules trouvées par L. Francken. Pour évaluer la précision du calcul des performances nous avons comparé les valeurs obtenues en laboratoire (avec les formulations des enrobés AB 11S Uri/Vs et HMT 22S ; chaque formulation ayant

une teneur en liant différente et la formulation de l'enrobé EME 2 avec une seule teneur en liant) avec celles obtenues par le logiciel PRADO.

Enrobé Code formulations laboratoire	Volume de granulats V_g [%]	Volume de liant V_b [%]	Rapport V_g/V_b	Teneur en liant L/A [%]	Pourcentage de vides [%]
AB 11S URI/VS					
163	82.68	11.42	7.24	5.11	5.9
113	83.19	12.61	6.60	5.61	4.2
159	82.91	13.69	6.06	6.11	3.4
HMT 22S					
152	83.57	8.83	9.46	3.91	7.6
142	84.17	10.03	8.39	4.41	5.8
155	83.78	11.12	7.54	4.91	5.1
EME 2					
167	84.75	12.94	6.54	5.65	2.3

Tableau 20: Caractéristiques des formulations qui ont servi aux essais de module et de fatigue et au calcul avec le logiciel Prado.

Pour comparer les résultats fournis par le laboratoire avec les valeurs obtenues avec Prado on a représenté les résultats sur un graphique avec en ordonné les valeurs de prévision (PRADO) et en abscisse les valeurs obtenus par les essais en laboratoire (Figure 12). Pour les enrobés AB11 on voit que les courbes des différentes formulations ne s'éloignent pas trop de la courbe de référence $y = x$ (à 45°).

Il n'existe pas de tendance générale puisque les points d'une même formulation sont de part et d'autre de la diagonale. Néanmoins, on peut dire grossièrement que le modèle (logiciel Prado) tend à sous estimer les modules pour de faibles valeurs (<6000 MPa) et à les sur estimer pour des valeurs élevées.

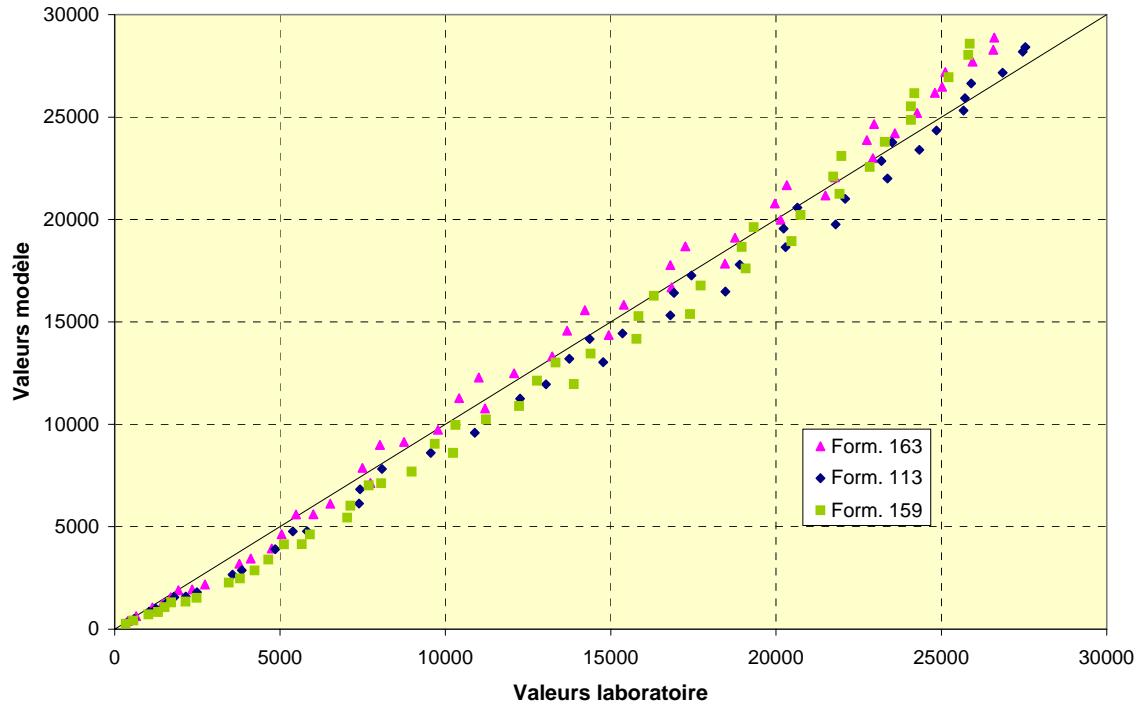


Figure 12: Comparaison entre les valeurs PRADO et les valeurs en laboratoire pour l'enrobé AB 11S

Pour avoir une meilleure idée de la précision on a aussi représenté graphiquement l'écart relatif entre la valeur calculée avec le logiciel Prado et celle obtenue en laboratoire (Figure 13). Les résultats ont montré que pour la couche de roulement (AB11S) la précision est très bonne pour presque toute la gamme de fréquences et de températures. Pour les hautes températures (modules faibles, <math><6000\text{MPa}</math>) les écarts sont très importants. Mis à part ces valeurs, les écarts sont compris entre -15% et +10% ce qui reste une bonne approximation. En effet, lors d'essais croisés inter laboratoires [25] il a été vu que suivant l'appareillage utilisé, les variations du module complexe, pour un même matériau, peuvent mener à des différences notables de l'ordre de 20%. De plus lors d'essais fait par un même laboratoire sur un même matériau une sélection minutieuse des échantillons testés (avec des teneurs en vides et des densités assez proches) permet de limiter ces variations à $\pm 5\%$. Les résultats obtenus par l'approche analytique restent donc, au vu de ces variations inter et intra laboratoires, acceptables.

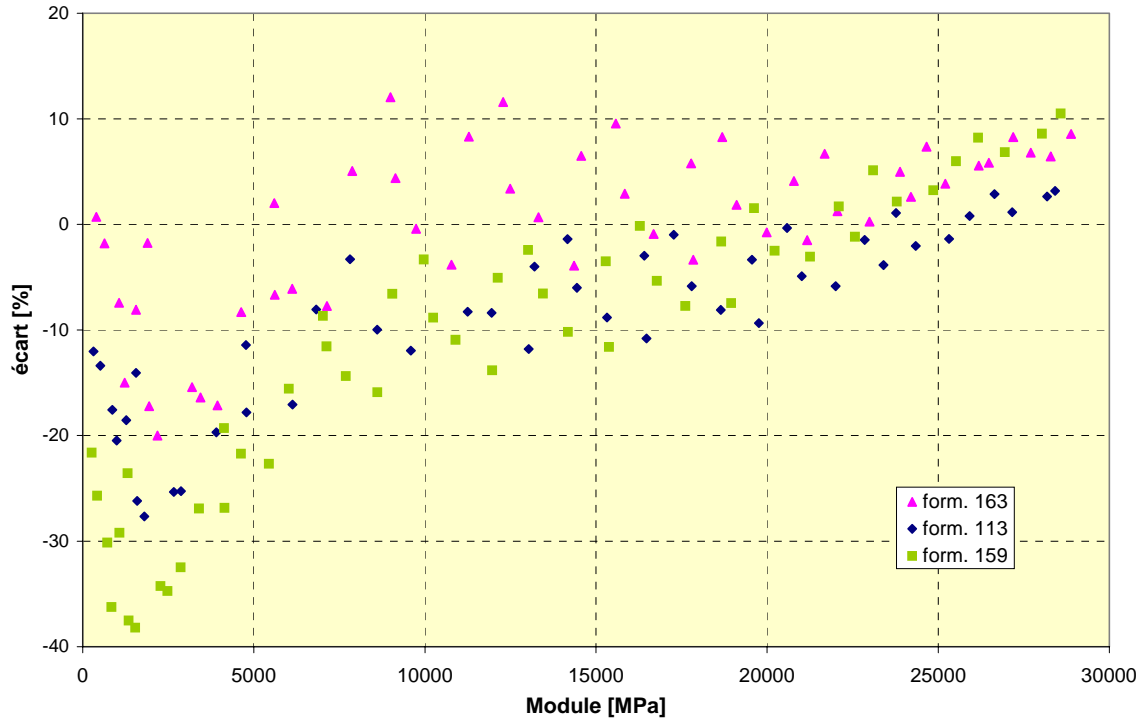


Figure 13: Ecart entre les valeurs obtenues avec Prado et les valeurs obtenues par les essais en laboratoire sur les différentes formulations des enrobés AB 11S Uri/Vs

On procède de la même manière pour l'enrobé HMT 22S avec tout d'abord une comparaison graphique des résultats et ensuite une analyse plus détaillée de la précision de la prévision.

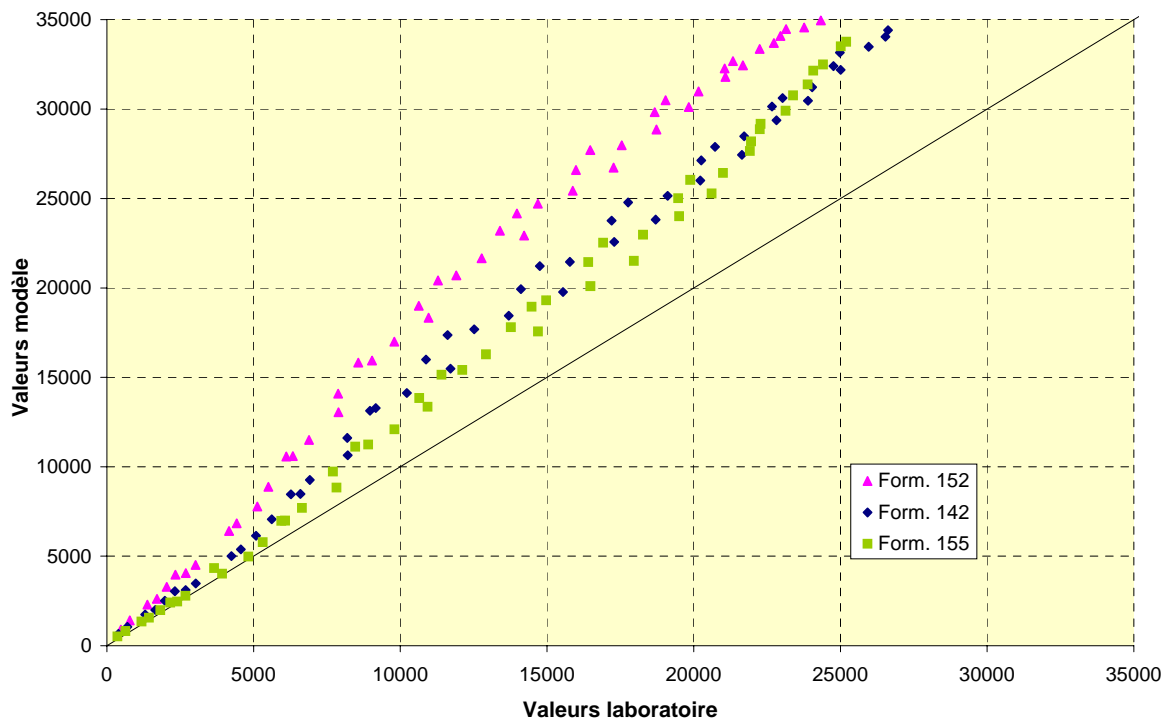


Figure 14: Comparaison entre les valeurs PRADO et les valeurs en laboratoire pour l'enrobé HMT 22S

L'approximation des valeurs des modules complexes des couches de base (HMT22S) avec le logiciel Prado donne toujours des valeurs supérieures à celles obtenues en laboratoires. La courbe des trois différentes graduations est au-dessus de la diagonale. De plus on remarque que les valeurs supérieures sont exagérées avec des modules dépassant les 35000 MPa !

Analysons plus en détails la précision en étudiant les écarts relatifs entre la valeur Prado et la valeur de laboratoire (Figure 15). Le graphique montre bien que les valeurs sont en excès, en effet les écarts sont tous positifs et la grande majorité des points est au dessus de 10% voir 20%. De plus on a l'impression que plus la teneur en liant est faible plus les écarts deviennent importants.

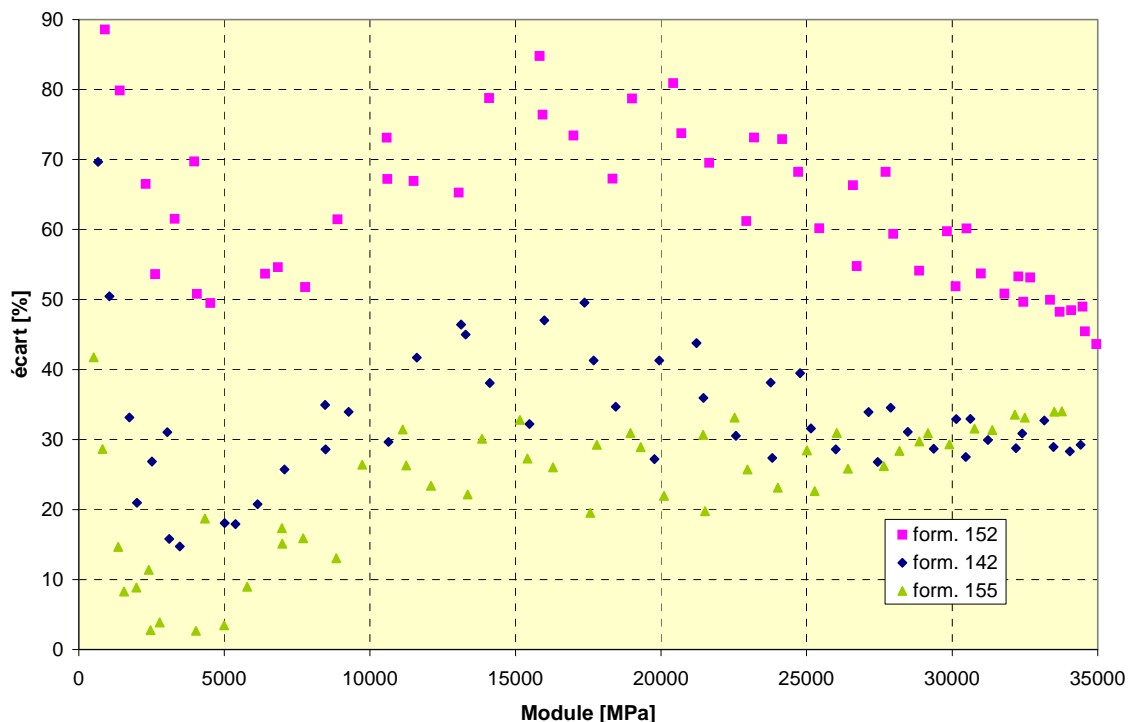


Figure 15: Ecart entre les valeurs obtenues avec Prado et les valeurs obtenues par les essais en laboratoire sur les différentes formulations des enrobés HMT 22S

Ceci est peut être du au fait que ce logiciel a été développé pour les matériaux belges avec une composition volumique des mélanges dans les limites suivantes : 5.5

$\frac{V_g}{V_b} < 6.5$. Lorsque la composition sort de ces limites (ce qui est toujours le cas ici)

avec des valeurs supérieures (Tableau 20), il faut appliquer une correction à la valeur du module réduit. En effet L. Francken a établi que plus le rapport Volume granulats sur Volume liant est grand plus la valeur du module réduit est grande et par conséquent plus la valeur du module complexe est grande. Le logiciel de calcul PRADO corrige directement la valeur du module réduit.

Il est intéressant de voir (vu que les modules trouvés sont trop grands) l'effet de cette correction sur les valeurs. Pour ce faire nous avons opté pour la résolution manuelle des formules de Francken en négligeant le facteur de correction du module réduit.

Les résultats de cette résolution sont plus proches de ceux obtenus en laboratoire par rapport aux résultats obtenus directement avec Prado (Figure 16).

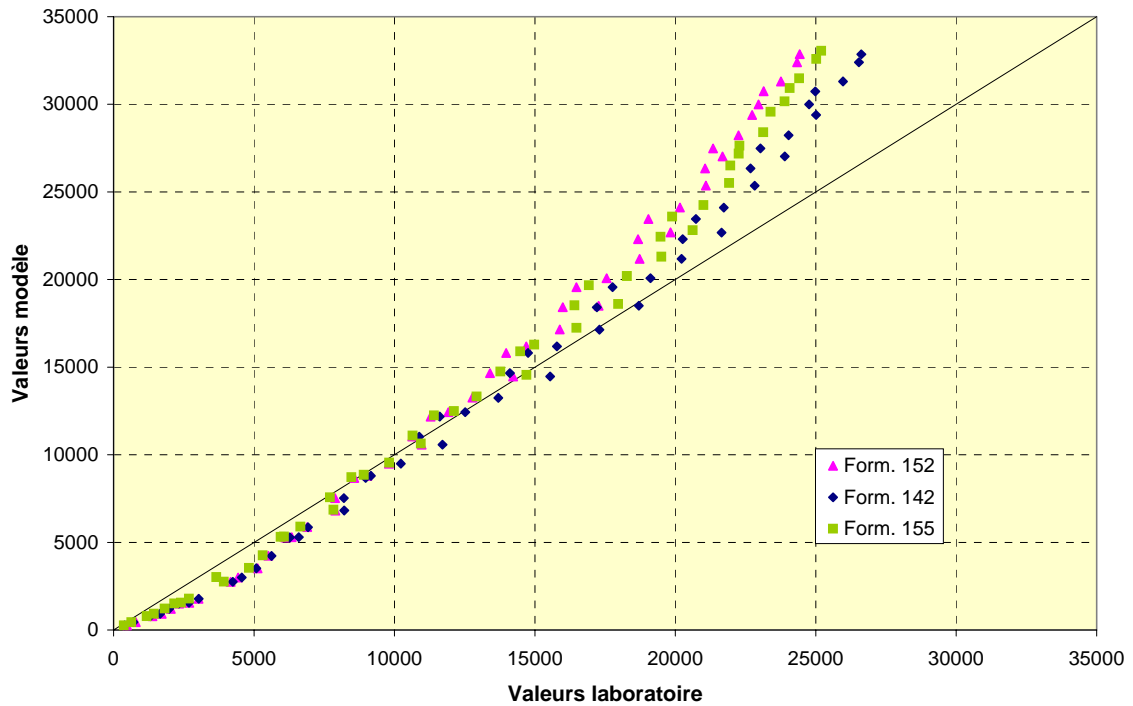


Figure 16: Comparaison entre les valeurs de prévision (Manuel) et les valeurs de laboratoire.

Si on ne tient pas compte de la correction du module réduit, les valeurs deviennent moins élevées et se rapprochent plus de la diagonale. De plus pour des faibles modules (<6000 MPa) le modèle sous estime les valeurs alors que c'est l'inverse pour des modules élevés et ceci à partir d'une valeur qui dépend de la formulation. Cette tendance se rapproche de celle observée pour les enrobés AB 11S.

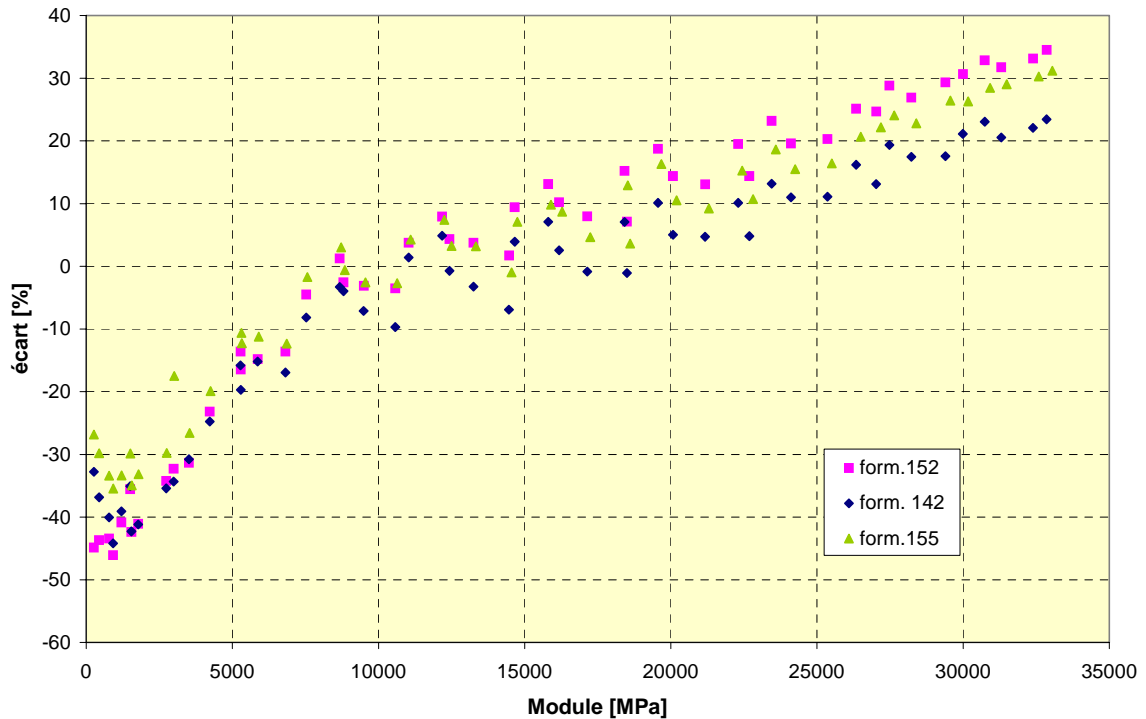


Figure 17: Ecart entre les valeurs obtenues avec résolution manuelle et les valeurs obtenues par les essais en laboratoire sur les différentes formulations des enrobés HMT 22S

Ce graphique des écarts montre plus en détail ce qui a été énoncé précédemment. De plus on peut voir qu'entre 7000 MPa et 18000 MPa, les écarts sont compris entre -10% et +15%, intervalle d'erreur acceptable. Notons que cet intervalle de valeurs des modules regroupe les valeurs utilisées pour le dimensionnement, à savoir le module à 15°C et 10Hz et à 10°C et 25Hz.

Dans tous les résultats on a pu constater que pour des faibles valeurs du module, les écarts sont très importants. Ceci s'explique par le fait que *la validité de la formulation présentée reste encore à démontrer dans le cas des mélanges à forte teneur en granulats ($V_g/V_b > 8$), et dans le domaine des hautes températures et basses fréquences.*[24]. Cette précision permet aussi d'expliquer pourquoi les résultats des prévisions sont plus satisfaisants pour les enrobés AB 11S que pour les enrobés HMT 22S. Les enrobés HMT22 étudiés ici sont tous en dehors de l'intervalle de validité ($V_g/V_b > 8$) exception faite de la formulation 155 ($V_g/V_b = 7.54$). Ceci explique la tendance qui veut que plus la teneur en liant est faible plus les écarts sont importants, en effet avec une teneur en liant plus faible le rapport V_g/V_b augmente. Par contre les enrobés AB11 sont dans l'intervalle de validité, c'est-à-dire $V_g/V_b < 8$ (Tableau 20).

En revanche, on peut noter que dans l'intervalle des modules entre 7000 et 18000 MPa, les écarts entre prévision et laboratoire sont moindres et permettent d'avoir une bonne approximation de la valeur du module. Ceci se constate pour les formulations de l'enrobé AB 11S et pour les formulations de l'enrobé HMT 22S à condition d'utiliser la méthode « manuelle » pour le calcul des modules.

En conclusion on peut souligner la grande adaptation de cette méthode de prévision pour les couches de surface (AB 11S) et une adaptation bien plus difficile pour les couches de base (HMT 22S). Cependant elle permet dans le premier cas d'avoir une bonne approximation des valeurs et dans le deuxième cas de connaître l'ordre de grandeur si lors du calcul on ne tient pas compte du facteur de correction du module réduit.

En ce qui concerne l'enrobé EME 2, la validation des résultats reste difficile vu que les essais de performance ont été réalisés sur une formulation unique.

Sur le même graphique (Figure 18) on montre les résultats obtenus par Prado et ceux obtenus par une résolution manuelle des équations, c'est-à-dire sans prendre en compte le coefficient de réduction du module réduit. On constate que les écarts entre les deux résultats sont faibles, en effet le rapport $V_g/V_b = 6.55$ de l'enrobé étudié est de peu en dehors des limites de validité ($V_g/V_b < 6.5$).

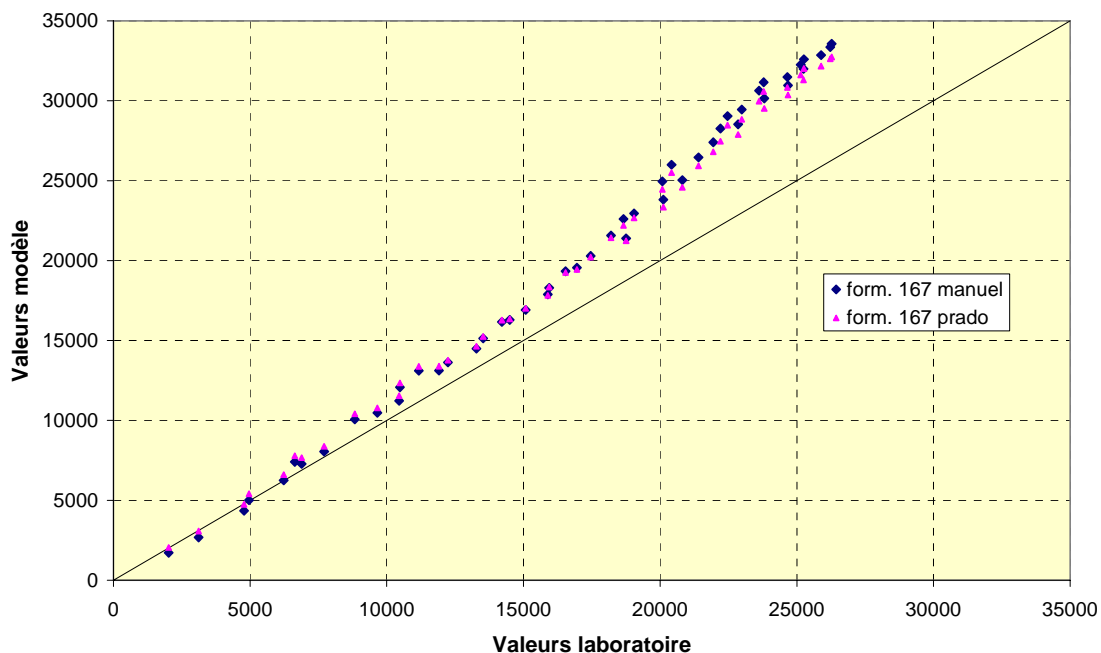


Figure 18 : Comparaison entre les valeurs de prévision (Prado et Manuel) et les valeurs de laboratoire

De même que pour les autres enrobés on a voulu évaluer en pourcentage l'écart entre les valeurs de prévision et les valeurs obtenues en laboratoire pour cet enrobé à module élevé. On peut noter que cet enrobé nouveau suit la même tendance que l'enrobé HMT 22S avec des écarts importants pour des modules faibles et des écarts relativement corrects pour des valeurs de module comprises entre 7000 MPa et 18000 MPa.

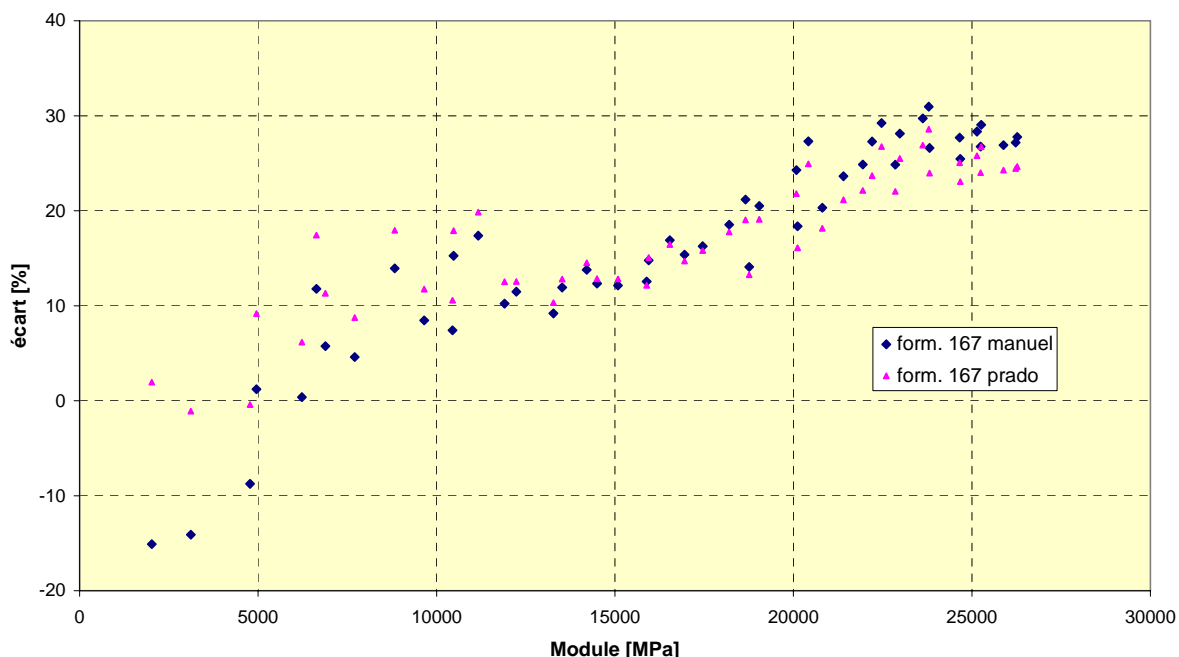


Figure 19 : Ecart entre les valeurs obtenues avec le modèle (Prado et Manuel) et les valeurs obtenues par les essais en laboratoire sur la formulation de l'enrobé EME 2

On peut conclure en remarquant que la prévision analytique des performances peut s'adapter aux nouveaux matériaux pour obtenir des ordres de grandeurs. En effet les écarts dans l'intervalle des valeurs de dimensionnement ($10000 \text{ MPa} < E < 20000 \text{ MPa}$) varient entre 5 et 20%. Vu les écarts inter laboratoires dans l'étude menée par la RILEM on peut qualifier ces différences d'acceptables en n'oubliant pas que pour cet enrobé nous ne disposons que d'une seule formulation !

- La fatigue

Le logiciel Prado permet également de calculer la déformation de fatigue à 10^6 cycles, c'est-à-dire la déformation initiale à imposer à l'échantillon pour avoir une « rupture » (souvent définie par une diminution du module de moitié) après 10^6 cycles.

La connaissance de la résistance à la fatigue est surtout importante pour les couches de base (HMT22S). Les résultats trouvés avec le logiciel sont très proches des valeurs trouvées par les essais en laboratoire (Tableau 21). Les données sont trop peu nombreuses pour nous permettre de tirer une conclusion définitive quant à la validité générale du logiciel pour les matériaux suisses, néanmoins on peut déjà voir que les résultats sont encourageants.

L/A	3.91	4.41	4.91
Déformation de fatigue obtenue par des essais en laboratoire (10^{-6})	81	85	102
Déformation de fatigue obtenue par le logiciel Prado (10^{-6})	82	92	103
Ecart absolu	1	7	1
Ecart relatif (%)	+1.2	+8.2	+1.0

Tableau 21: Comparaison des valeurs des déformations de fatigue pour la couche de base

Pour ce qui concerne l'enrobé EME 2 le résultat de l'essai de fatigue a été tiré de l'étude [39] (Tableau 20). Le résultat obtenu est comparé avec la valeur estimée par un calcul analytique. Le tableau suivant montre les deux valeurs mais aucune conclusion quant à la validité ou fiabilité des résultats de prévision ne peut être avancée avec un seul essai de fatigue.

Enrobé	Déformation de fatigue obtenue par des essais en laboratoire (10^{-6})	Déformation de fatigue obtenue par le logiciel Prado (10^{-6})	Ecart absolu	Ecart relatif
EME 2	143	129	14	-9.8

Tableau 22 : Comparaison des valeurs de prévision et de laboratoire pour la déformation de fatigue.

- L'orniérage

Pour pouvoir prédire l'orniérage d'une chaussée on se base sur une procédure développée au Lavoc dans le cadre du mandat de recherche 12/98 de la VSS.[32] Cette méthode permet de prédire la profondeur d'ornière d'une chaussée en fonction du trafic, de la vitesse du trafic poids lourd et de la température d'une part ainsi que des caractéristiques des matériaux d'autre part. Les caractéristiques des matériaux sont définies à l'aide de deux coefficients α et β , qui peuvent être obtenus à l'aide d'un essai PCG réalisé sur ce matériau. Ces deux coefficients sont caractéristiques du matériau, ainsi pour obtenir ces valeurs on peut aussi regarder dans le rapport du projet où une liste non exhaustive de ces coefficients par matériau a été établie. La méthode complète est détaillée dans l'annexe.

Dans le cadre de cette étude nous n'avons pas validé cette méthode car celle-ci a déjà fait l'objet d'une validation pour les matériaux utilisés en Suisse dans 11 planches d'autoroutes dans le mandat de recherche « Elaboration d'une méthode prédictive de l'orniérage des revêtements bitumineux ».

L'étude s'est contentée d'évaluer les enrobés obtenus en comparant les résultats d'essai PCG aux critères de la norme SN 640 431b (voir analyse de sensibilité).

5.3.8 ANALYSE DE SENSIBILITE

Cette analyse a été menée dans le but d'évaluer la variation des différents paramètres lors d'une légère variation de la teneur en liant ($\pm 0.5\%$). Ceci a permis de mettre en évidence le fait qu'il n'existe pas une teneur en liant optimale pour toutes les caractéristiques mais que l'essentiel d'une bonne formulation est d'avoir un bon compromis entre les différents paramètres (Marshall, module, orniérage,...). Cette étude de sensibilité faite autour de la valeur optimale pour chaque type d'enrobé met en évidence ce bon compromis dans les cas étudiés.

5.3.8.1 Résultats

- Module complexe

Les valeurs du module complexe ont été faites à 10 °C et à 15 °C avec une fréquence de 10 Hz.

L/A	3.91	4.41	4.91	5.11	5.61	6.11
AB 11S UR/VS 10°C				15392	15361	14393
HMT 22S 10°C	14687	15784	14975			
AB 11S UR/VS 15°C				12081	12261	11230
HMT 22S 15°C	11912	12518	12111			

Tableau 23 : Valeur des modules en Mpa à 10 °C et 15 °C pour une fréquence de 10 Hz

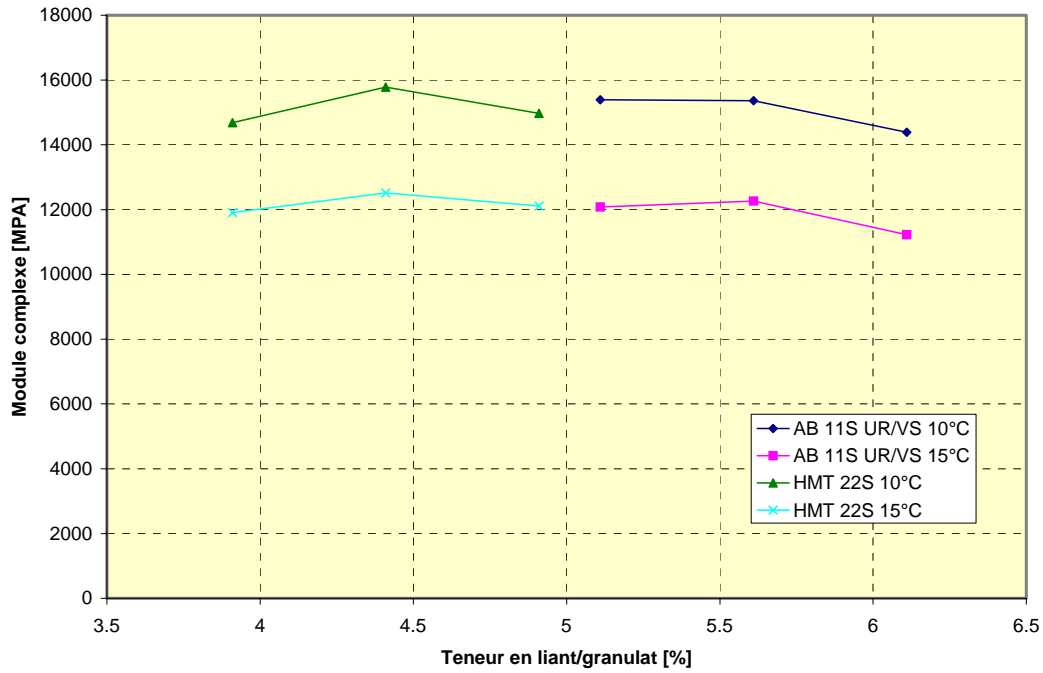


Figure 20 : Graphique des modules en fonction de la teneur liant/granulat

- Fatigue

Comme les enrobés de couche de base sont déterminants pour la fatigue, le comportement des enrobés AB 11S Schwyz et AB 11S Uri/VS n'a pas été testé.

L/A	3.91	4.41	4.91
HMT 22S	81·10 ⁶	85·10 ⁶	102·10 ⁶

Tableau 24 : Valeurs de la résistance à la fatigue, déformation à 10⁶

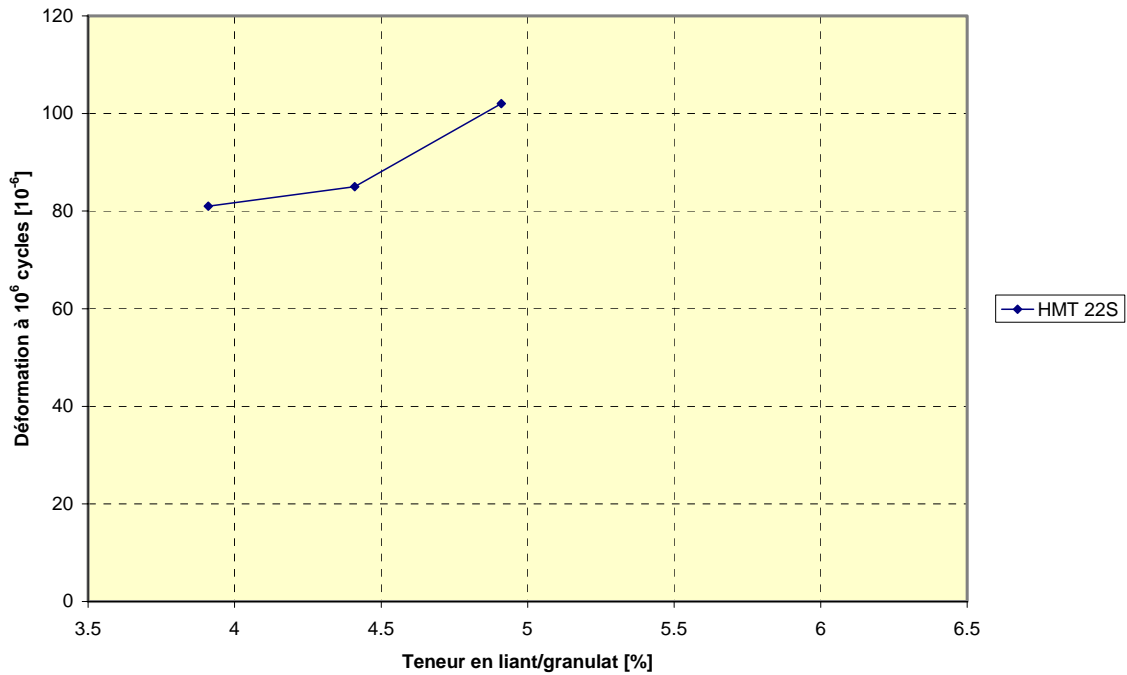


Figure 21 : Graphique de la résistance à la fatigue en fonction de la teneur liant/granulat

- Orniérage

La vérification des performances à l'orniérage a été faite avec l'essai à l'orniéreur LPC à la température de 60 °C. D'après la norme SN 640 431b, les enrobés AB S et HMT S ne doivent pas dépasser une ornière de 10 % à 10 000 cycles. Dans le Tableau 25 figurent les valeurs mesurées. Les valeurs des échantillons dont la teneur en liant est la plus proche de celle obtenue à l'optimisation sont en gras.

L/A	3.91	4.41	4.91	5.11	5.61	5.68	5.9	6.11
AB 11S SZ						4.5	6.4	
AB 11S UR/VS				3.0	4.5			6.6
HMT 22S	2.2	2.7	3.5					

Tableau 25 : Ornières en pourcents pour un essai à 60 °C à 10 000 cycles

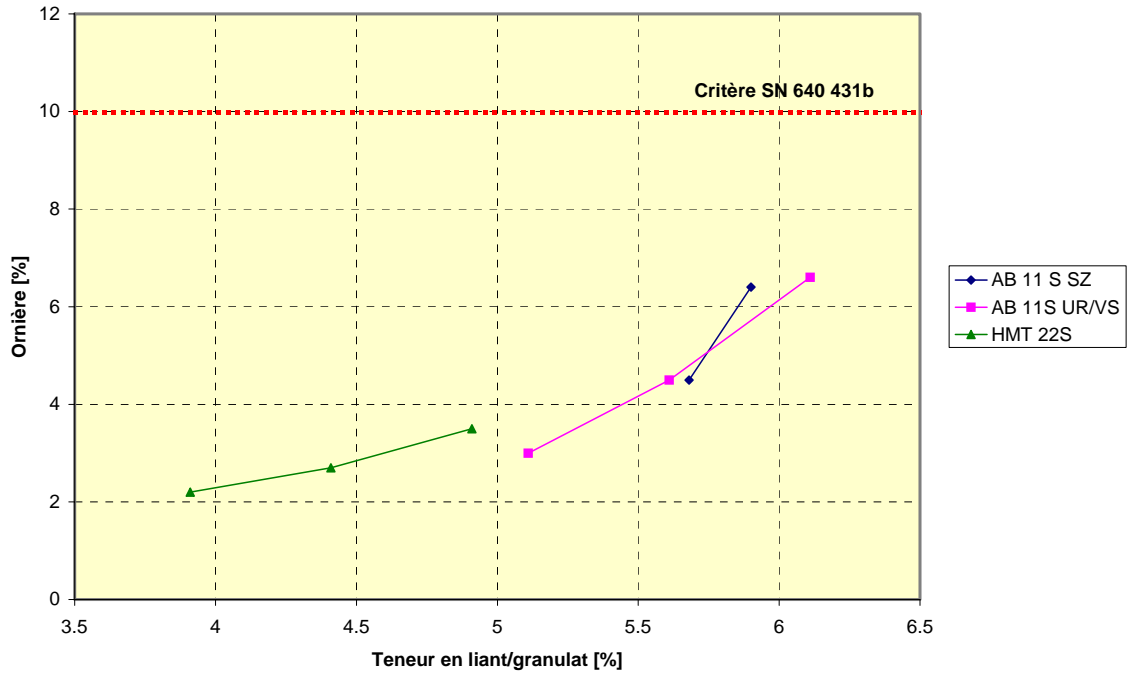


Figure 22 : Graphique des ornières à 10 000 cycles en fonction de la teneur liant/granulat

5.3.8.2 Synthèse

- AB 11S UR/VS

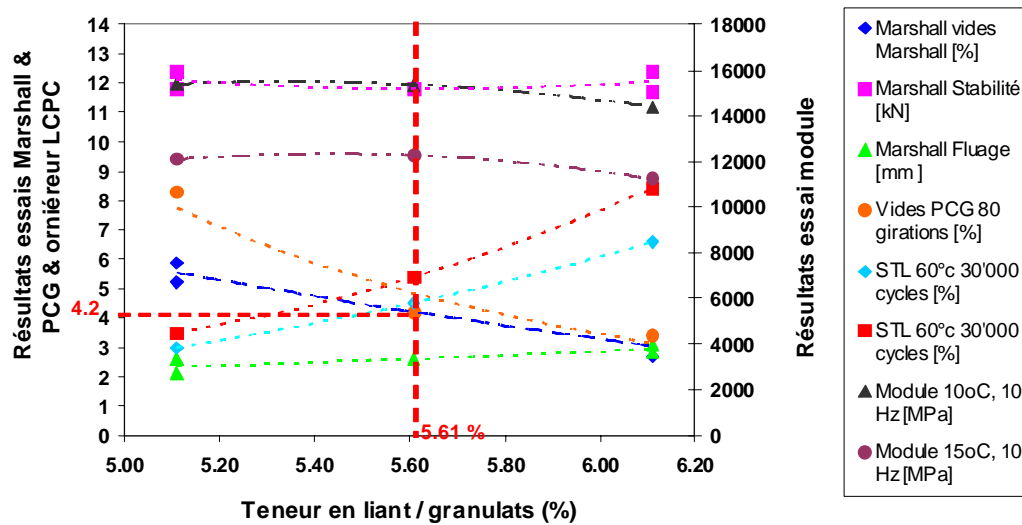


Figure 23 : Courbes de tendances des résultats de l'analyse de sensibilité de l'AB 11S UR/VS

• HMT 22S

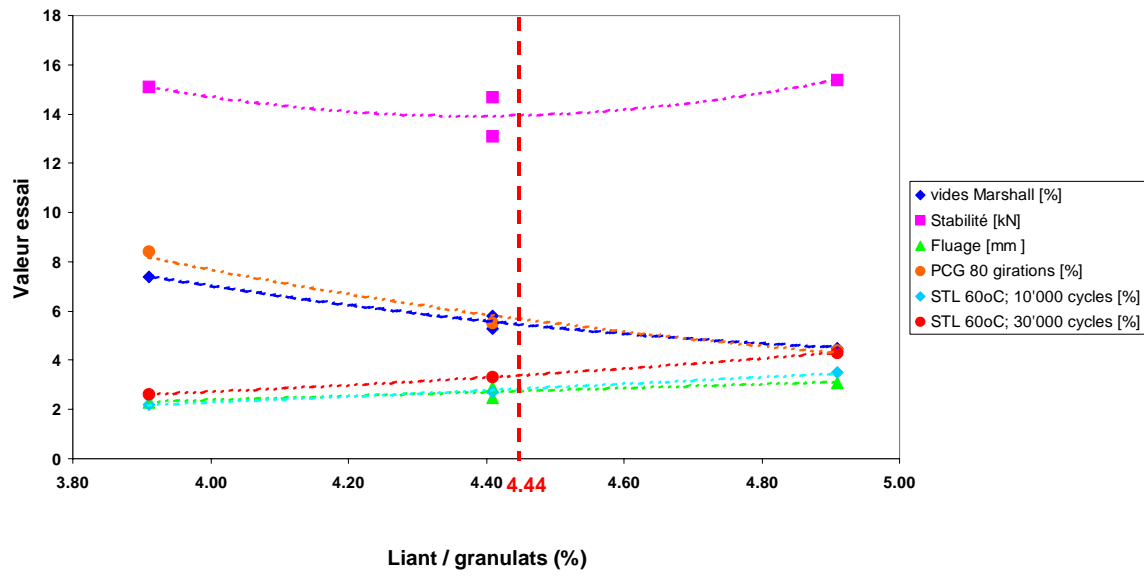


Figure 24: Courbes de tendance des résultats de l'analyse de sensibilité de l'HMT 22S

CHAPITRE 6 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Une méthode globale de formulation des enrobés bitumineux a été développée. Elle se base sur une approche volumique et permet d'évaluer les caractéristiques de module et de fatigue sans recourir systématiquement à des essais complexes de laboratoire.

Il ressort qu'il est possible de réaliser une étude de formulation, son optimisation et l'évaluation des performances à long terme en combinant un calcul de prévision et des essais complémentaires d'optimisation et de performance.

Les modèles de prévision ont un domaine de validité restreint ce qui diminue fortement la possibilité de les utiliser pour tous les matériaux. En effet, la variété des sortes d'enrobés (« asphaltés coulés », « enrobés drainants », « macrorugueux », ...) rend le problème de la formulation complexe au point qu'une formule universelle n'est pas envisageable. Ces outils restent néanmoins de bonnes approximations de la réalité pour les enrobés traditionnels et les liants classiques et permettront de repérer très vite des erreurs de formulation.

Une phase d'optimisation est préconisée en considérant la compactibilité du mélange par l'essai PCG et Marshall. La résistance à la déformation permanente est évaluée par l'essai d'orniérage. D'autre part, le comportement aux basses températures (fissuration thermique) est quantifié si nécessaire par un essai de retrait empêché et/ou un essai de traction directe.

En fonction du type de route, du trafic et des conditions climatiques, des essais de vérification sont recommandés. On distinguera trois niveaux de formulation : formulation de base, formulation intermédiaire, formulation avancée. Les limites d'application restent à établir avec les commissions techniques en charge de la normalisation.

Au vu de cette étude il est indispensable de recommander l'utilisation des essais de performances pour caractériser au mieux les enrobés. L'essai Marshall encore très répandu dans plusieurs pays ne peut plus « définir » la performance d'un enrobé

Une analyse de sensibilité a permis de mettre en évidence qu'il n'existe pas, à proprement parler, d'optimum en relation avec les performances testées. Pour certaines caractéristiques une augmentation de la teneur en liant de +0.5% diminue la performance (orniérage, fluage Marshall, ...). Par contre il existe d'autres caractéristiques qui voient leur performance s'améliorer avec une augmentation de la teneur en liant (fatigue, ...). La formulation doit donc être capable de trouver le bon compromis entre toutes ces caractéristiques.

A ce jour les expérimentations sur les performances à long terme sont en cours sur l'installation d'essais en vraie grandeur (Rundlauf de l'IGT-ETHZ) et sous circulation sur l'autoroute A2 dans la région de Pratteln (BL).

L'adéquation du comportement in situ avec les prévisions du modèle sera vérifiée lorsqu'un nombre suffisant de charges sera appliqué.

CHAPITRE 7 BIBLIOGRAPHIE

- [1] Angst C., "Oberbuchsiten 20 Jahre Splittmastixasphalt in der Schweiz", Revue Routes et Trafic 1/2001
- [2] Arand W., "Behaviour of asphalt aggregate mixes at low temperatures", Proc. 4th International RILEM symposium on "Mechanical Tests for Bituminous Mixes Characterisation, Design and Quality Control", p. 68-84, Budapest 1990
- [3] Arand W., "Comportement des asphaltes à basses températures, développement et mise à l'épreuve d'une méthode d'essai", revue Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, n°407, 1984
- [4] Aschenbrener T., "L'orniériste LCPC testé sur les chaussées du Colorado" Revue Générale des Routes et des Aéroports, n°729, mai 1995
- [5] Asphalt Institute, "Superpave Mix Design", Superpave Series No.2 (SP-02). Asphalt Institute, Lexington, KY, 2001.
- [6] Asphalt Institute, "Mix Design Methods", Manual Series No.2 (MS-02). Asphalt Institute, Lexington, KY, 1997.
- [7] Biczysko S.J., "Asphalt performance at low temperature", The journal of the Institution of Highways and Transportation and IHIE, N° 3 vol. 37 p.20-25, 1990
- [8] Bonaquist R.F., Christensen D.W., Stump W., "Simple performance tester for superpave mix design: first article development and evaluation", NCHRP report 513, Washington D.C., 2003
- [9] Bonnot J., "Généralité sur essais mécaniques pratiques de formulation et de contrôles des enrobés bitumineux", Symposium International RILEM, p. 133-170, Belgrade 1983
- [10] Brosseau Y., Hiernaux R., "Caractéristiques et méthodes d'essais fonctionnelles-étude des déformations permanentes des enrobés à chaud avec l'orniériste LPC, fiabilité, sélectivité, pertinence de l'essai", Eurobitume Congress Strassbourg 1996
- [11] Brown Stephen F., Gibb M., Read John M., Scholtz Todd V., "Laboratory protocols for the design and evaluation of bituminous mixtures", Eurobitume Congress Strassbourg 1996
- [12] Centre de Recherches Routières, "Code de bonne pratique pour la formulation des enrobés bitumineux denses", Recommandations C.R.R. – R 61/87
- [13] Centre de Recherches Routières, "Code de bonne pratique pour la formulation des enrobés bitumineux denses", Recommandations C.R.R. – R 69/97
- [14] De La Roche C., "Module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux – expérimentation et nouvelles perspectives d'analyse", thèse de docteur ingénieur, Ecole Centrale Paris, 1996
- [15] De La Roche C., Corté J.-F., Gramsammer J.-C., Odéon H., Turet L., Carof G., "Etude de fatigue des enrobés bitumineux à l'aide du manège de fatigue", Revue Générale des Routes et des Aéroports, p 62 à 75, n°716 mars 1994
- [16] Di Benedetto H., "Nouvelle approche du comportement des enrobés bitumineux: résultats expérimentaux et formulation rhéologique", proceeding of the 4th. International RILEM Symposium MTBM, Budapest, octobre 1990
- [17] Di Benedetto H., Soltani Ashayer A., "Fatigue Damage for bituminous", proceeding of the 5th international RILEM symposium BTBM, p. 263-270, Lyon, 1997
- [18] Di Benedetto H., De la Roche C., Francken L., & the RILEM 152PBM Technical Committee, "Fatigue of bituminous mixtures : Different approaches and RILEM interlaboratory tests", proceeding of the 5th international RILEM symposium BTBM, p. 15-28, Lyon, 1997
- [19] Dumont A.-G., "Réalisation des infrastructures de transport", Laboratoire des Voies de Circulation (LAVOC), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Suisse, édition mars 2000
- [20] Dumont A.-G., Turtzschy J.-C., Beauverd J., Buehler T., "Influence de la forme des granulats sur les caractéristiques d'un béton bitumineux, 2^{ème} partie", Rapport OFROU 11/1998
- [21] Dumont A.-G., Turtzschy J.-C., Simond E., "Caractéristiques d'une formulation de référence pour les enrobés bitumineux", Rapport OFROU n°396. Février 1998
- [22] European Standards Working Group CEN TC 227/WG1, "Bituminous mixtures", Task Group TG2 "Test methods"

- [23] European Standards prEN 12697-24, "Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt", part.24 : Resistance to fatigue, september 2000
- [24] Francken L., "Module complexe des enrobés bitumineux", Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, Numéro Spécial V, pp. 181-198, décembre 1977.
- [25] Francken L., Partl M. & the RILEM 152PBM Technical Committee, "RILEM interlaboratory tests on stiffness properties of bituminous mixtures ", proceeding of the 5th international RILEM symposium BTBM, p. 9-14, Lyon, 1997
- [26] Francken L., Vanelstraete A., "PRADO: formulation des enrobés bitumineux", Centre de Recherches Routières, janvier 1997.
- [27] Jones G.M., Darter M.I., Littlefield G., "Thermal expansion-contraction of asphaltic concrete", Proceeding Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), volumen 37 p. 56-100, Atlanta Georgia, 1968
- [28] Hicks Gary R., Leahy R., Monismith Carl L., "*Asphalt update*", Civil Engineering Revue, Etats-Unis, April 1996
- [29] Junker, J.P., "Entwicklungen zur bestimmung mechanischer Materialkennwerte an bituminösen Baustoffen, insbesondere an Asphalt, Thèse de doctorat, EMPA, 1987
- [30] Isacsson U., Vinson T.S., Zeng H., "The influence of material factors on low temperature cracking of asphalt", Mechanical Test for Bituminous Mixes (MTBM), proceeding of the 5th. International RILEM Symposium, Lyon, mai 1997
- [31] Kallas B.F., "Low temperature mechanical properties of asphalt concrete", Asphalt Institute Research Report N° 82-3, College Park, Maryland, 1982
- [32] Mandat VSS 12/98, "Elaboration d'une méthode prédictive de l'orniérage des revêtements bitumineux au moyen de l'orniéreur LCPC" , recherche en cours
- [33] Mengis M., "Contribution à l'interprétation des essais de fatigue par une approche thermo-mécanique ", DEA ENTPE, 1997
- [34] Molenaar, J.M.M., Verburg H.A., Westera G.E., "Characterisation of permanent deformation behaviour of asphalt mixtures", Proceedings of the Conference Strategic Highway Research (SHRP) and Traffic Safety on Two Continents", Prague, september 1995
- [35] Monismith Carl L. & al., "Temperature induced stresses and deformations in asphalt concrete", Proceeding of the Association of Asphalt Paving Technologist (AAPT), vol. 34, 1965
- [36] Neifar M., "Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux: expérimentation et modélisation", thèse de doctorat, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (France), septembre 1997
- [37] Norme Suisse VSS SN 640 925a, "Relevé et évaluation de l'état des routes", avril 1997
- [38] Nunn M.E., Lawrence, D., Brown A., "Development of a practical test to assess the deformation resistance of asphalt", 2nd Eurobitume Congress Barcelona 2000
- [39] Perret J., Dumont A.-G., Turtzschy J.-C., Ould-Henia M., "Evaluation des performances de nouveaux revêtement : 1^{ère} partie : enrobés à haut module », Rapport OFROU n° 1000. décembre 2001.
- [40] Pucci T., "Approche prévisionnelle de la fissuration par sollicitation thermique des revêtements bitumineux", thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, octobre 2001
- [41] Proceedings of the Workshop, "Performance related test procedures for bituminous mixtures", Dublin 6-7 november 1997
- [42] SETRA-LCPC, "Catalogue des dégradations de chaussées"
- [43] SETRA-LCPC, Conception et Dimensionnement des Structures de Chaussées – Guide technique, décembre 1994
- [44] Soltani Ashayer A., "Comportement en fatigue des enrobés bitumineux", thèse de doctorat ENTPE- INSA, 1998
- [45] Technical Committee TC 152-PBM, "Performance of Bituminous Mixes", Working Group 3 "Mechanical Tests on Bituminous Mixes", A New Approach to Better Roads, Draft Report March 1994
- [46] Turtzschy J.-C., Odéon H., del Val M., "*Climatic effects*", COST 333 – WG4 final report, july 1997
- [47] Valkering C.P., Lançon D.J.L., Hilster E.de, Stocker D.A., "Rutting resistance of asphalt mixes containing non-conventional and polymer modified binders", Journal of the Association of Asphalt Paving Technologistw, p.590-609, 1990
- [48] Vinson Ted S., Janoo V.C., Haas Ralph C.G., "Low temperature and thermal fatigue cracking", Summary Report SR-OSU-A-003A-89-1, Strategic Highway Research Program contract A-033A, 1989

- [49] Vinson Ted S., Kanerva H.K., Zeng H, "Low temperature cracking: field validation of the Thermal Stress Restrained Specimen Test (TSRST)", Strategic Highway Research Program SHRP-A-401 contract A-033A, Washington DC 1994
- [50] Vinson Ted S., Zubeck H., "Prediction of low temperature cracking of asphalt concrete mixtures with thermal stress restrained specimen test", Transportation Research Board, 75th annual meeting, january 7-11,1996, Washington D.C.
- [51] Vinson Ted S., Jackson Mike N., "Analysis of thermal fatigue distress of asphalt concrete pavements", Transportation Research Board, 75th annual meeting, january 7-11, 1996, Washington D.C.
- [52] Vonk W., Korenstra J., Jongeneel D. et Udron J. "Amélioration des performances des enrobés par emploi de liants bitumineux modifiés aux SBS", Revue Générale des Routes et des Aérodrômes, n°733, oct 1995
- [53] WesTrack Forensic Team Consensus Report, "Superpave mixture design guide", Washington D.C., février 2001.
- [54] Younger K.D., Partl M.N., Fritz H.W., Gubler R., "Asphalt concrete shear testing with testing with the co-axial shear tester at EMPA", proceeding of the 5th international RILEM symposium BTBM, p. 189-195, Lyon, 1997
- [55] Zeng H. & al., "On low temperature cracking of asphalt pavements", thesis report, Departement of Infrastructure and Planning, Division of Highway Engineering Royal Institute of Technology, Stockholm, 1995

CHAPITRE 8 ANNEXES

8.1 FORMULATION ANALYTIQUE C.R.R.

La phase de formulation proprement dite découle d'une série de formules analytiques qui visent à prédire l'arrangement granulaire dans l'enrobé en fonction de sa composition. Les paramètres et les étapes qui interviennent lors du calcul sont les suivants :

1. Détermination des vides du squelette minéral
2. Détermination du volume disponible pour le mastic
3. Détermination de la composition du mastic
4. Détermination de la composition en masse

Résumé de la méthode : données de base et formules de calcul

Données de départ

Composants	Composition en volume	Masse volumique	Volume des vides
Pierre	p	ρ_P	x^2
Sable	s	ρ_S	V_S
Filler	f	ρ_F	V_F
Bitume	à déterminer	ρ_B	-

- % de vides du mélange : y (valeur cible définie par le projet)
- consistance du mastic définie par Δ_{AB} (°C)

² Les vides apportés par les pierres se calculent comme suit

$$x = 0.05 + 0.03 \cdot \left(\frac{\% P \leq 7mm}{\% P_{total}} \right)$$

1. Détermination des vides du squelette minéral

Valeurs	Apparents	Relatifs %
Pierres	$p_A = (1 + x) \cdot p$	$\% p = 100 \cdot \frac{p}{m_A}$
Sable	$s_A = \left(\frac{1}{1 - v_s} \right) \cdot s$	$\% s = 100 \cdot \frac{s}{m_A}$
Vides (granulat sec)	$q_A = s_A + p_A$ $v_Q = q_A \cdot \varphi - p - s$ $= m_A - p - s$	$\% v_Q = 100 \cdot \frac{v_Q}{m_A}$
Mélange (granulat enrobé)	$m_A = \varphi \cdot \left[(1 + x) \cdot p + \left(\frac{1}{1 - v_s} \right) \cdot s \right]$	$\Sigma = 100\%$

2. Détermination du volume disponible pour le mastic.

Volume disponible :

$$l_D = v_Q - \frac{y \cdot m_A}{100} = v_Q - v_M$$

Vérifier si %_D est suffisant

$$\%l_D = \%v_Q - y$$

Condition :

$$l = f + b < v_Q$$

3. Détermination de la composition du mastic

a) contrôle de K=f/b

b_{\max} s'obtient en retranchant le volume de filler du volume disponible

$$b_{\max} = l_D - f = v_Q - \frac{y \cdot m_A}{100} - f = v_Q - v_M - f$$

calculer K=f/b et vérifier si ΔAB est satisfaisant.

b) Contrôle de y

b est calculé à partir de ΔAB et de f ; y est ensuite déduit par différence :

$$y = \frac{100}{m_A}(v_Q - (f + b))$$

4. Détermination de la composition en masse

Masse totale des granulats :

$$G = P + S + F$$

Composition :

Pierres	%P = 100 P/G
Sable	%S = 100 S/G
Filler	%F = 100 F/G
Liant	%B = 100 B/G

8.2 LOGICIEL DE CALCUL: PRADO

Le logiciel de calcul utilisé est celui développé au CRR par L. Francken sous le nom de PRADO. Ce logiciel se base évidemment sur la théorie de formulation expliquée ci-dessus. La procédure pour l'utilisation du programme est expliquée dans la suite.

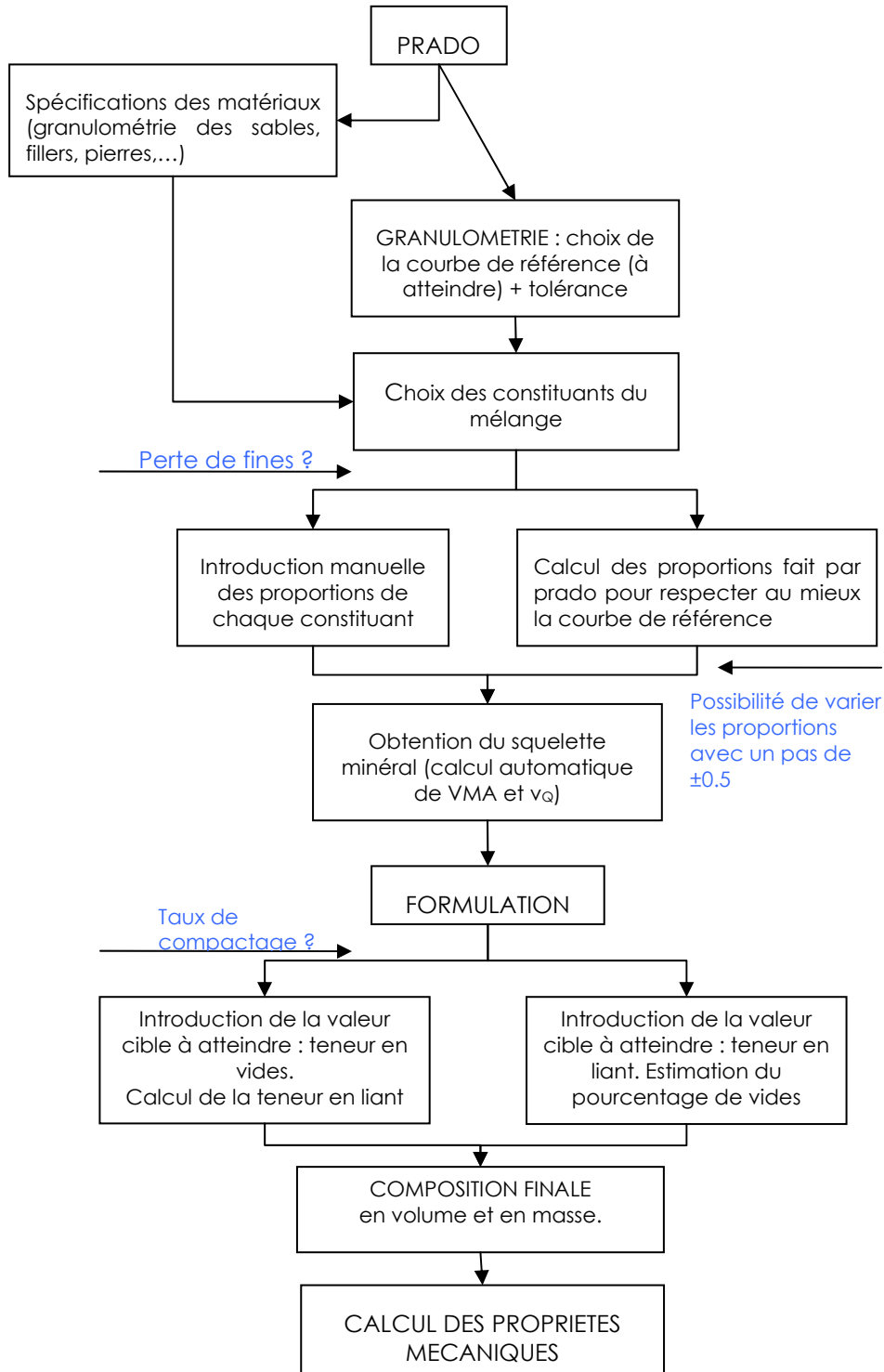


Figure 25: Procédure de formulation logiciel PRADO

8.3 BASES THEORIQUES DU CALCUL DU MODULE COMPLEXE DES MELANGES BITUMINEUX

D'après les études de L. Francken [24], le module complexe des mélanges bitumineux peut s'écrire sous la forme :

$$|E^*|(f_R) = E_\infty \cdot R^*(f_R)$$

où R^* est un module réduit compris entre 0 et 1

La détermination du module purement élastique E_∞ peut se déduire de l'ensemble d'études sur ce sujet (lire Van der Poel, C. Huet, Bazin et Saunier). Cette valeur dépend essentiellement du squelette minéral et en particulier du rapport volumique des granulats sur le bitume ($r = \frac{V_g}{V_b}$) et de la teneur en vides y .

$$E_\infty(r, y) = 1.436 \cdot 10^4 \cdot r^{0.55} \cdot \exp[-5.84 \cdot 10^{-2} \cdot y]$$

Cette formule est valable pour :

$$0.16 < r < 12$$

$$1.5\% < y < 32\%$$

La détermination de R^* en une seule équation est impossible vu le comportement différent du bitume. En effet le module réduit dépend presque exclusivement des caractéristiques du bitume et ainsi on déduit trois comportements différents selon la valeur de la fréquence réduite $f_R = a_T \cdot f$.

Hautes températures et basses fréquences : comportement parabolique

Fréquences et températures intermédiaires : comportement linéaire

Fréquences élevées et basses températures : tend asymptotiquement vers 1

Définissons $X = \log f_R$ et les limites des intervalles de comportement X_L et X_S .

$$X = \log f_R = 37.9 \frac{15 - T}{T + 273} + \log f$$

$$X_L = \frac{1}{H} \log \left(\frac{0.4343 \cdot P}{H \cdot R_{pen}^*} \right) - 1.672$$

$$X_S = X_L - \frac{0.4343}{H} + \frac{0.75}{P}$$

H , P et R_{pen}^* sont trois paramètres qui définissent un bitume donné.

$$R_{pen}^* = 6.55 \cdot pen^{-1.313}$$

$$H = -9.27 \cdot 10^{-2} + 1.352 \cdot B'$$

$$P = 6.28 \cdot 10^{-2} + 0.219 \cdot B'$$

Avec B' : susceptibilité thermique de la pénétration au temps t de chargement.

$$B' = \frac{\log pen(T_1) - \log pen(T_2)}{0.12 \cdot (T_1 - T_2)}$$

Calcul de R^* :

Si $X < X_L$

$$R^*(X) = R_{pen}^* \cdot \exp\left[\frac{H}{0.4343}(X + 1.672)\right]$$

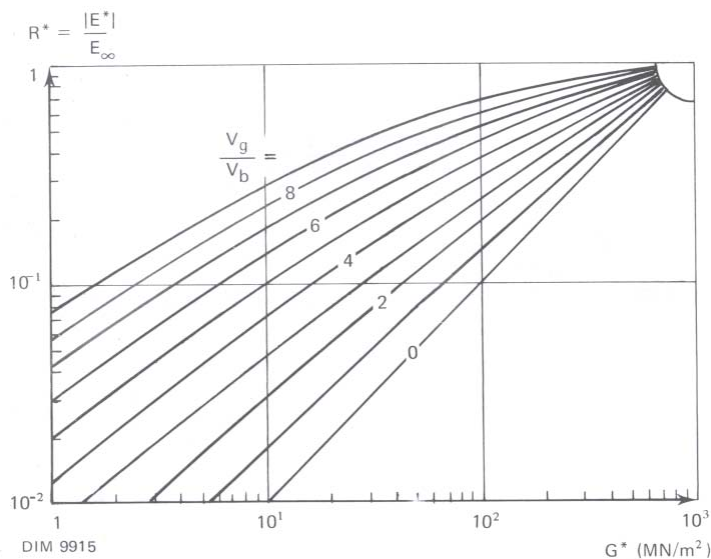
Si $X_L < X < X_S$

$$R^*(X) = 0.4343 \cdot \frac{P}{H} + P \cdot (X - X_L)$$

Si $X > X_S$

$$R^*(X) = 1 - 0.25 \cdot \exp\left[-\frac{P \cdot (X - X_S)}{0.25}\right]$$

La valeur de R^* calculée n'est valable que pour r compris entre 5.5 et 6.5. Si le rapport du volume de granulats sur le volume de bitume est en dehors de cet intervalle il faut corriger la valeur obtenue à l'aide d'un abaque fourni par Francken. Cet abaque découle d'une analyse des diverses expériences mettant en valeur la double dépendance du module réduit au rapport V_g/V_b et à la consistance du bitume utilisé.



Relation entre le module réduit R^* et le module de cisaillement G^* du bitume pour différentes valeurs de V_g/V_b .

8.4 METHODE DE PREDICTION DE L'ORNIERAGE

Pour appliquer cette nouvelle procédure de prédiction il faut passer par les cinq étapes décrites ci-dessous.

- Etape 1 :

Faire un essai d'orniérage à l'aide de l'orniéreur LPC du matériau et destiné à être mis en place (ou déjà en place), puis déterminer les coefficients expérimentaux α et β .

- Etape 2 :

Déterminer la charge de trafic équivalent total W , exprimé en essieux équivalents [ESAL], prévue durant toute la période de service du tronçon de chaussée considéré.

Une fois que la charge de trafic total est calculée, il faut l'intégrer dans l'équation d'orniérage en faisant intervenir un coefficient de trafic C_w dont la valeur est constante :

$$C_w = 5,102 \cdot 10^{-3}$$

- Etape 3 :

Déterminer la vitesse effective moyenne des véhicules lourds (>3.5t) prévue sur le tronçon de chaussée considéré.

La vitesse doit être liée à l'équation d'orniérage en introduisant un coefficient de vitesse C_v variable en fonction de la vitesse. Lorsque la vitesse moyenne est connue ou estimée, et pour connaître la valeur de C_v , on introduit dans l'équation :

$$C_v = 5 \cdot 10^{-5} \cdot V^{2,5177}$$

- Etape 4 :

Déterminer la température maximale pour une période de retour de 20 ans ou la température des 4 jours les plus chauds issue des mesures des stations environnantes.

Pour lier la température à l'équation d'orniérage, il faut calculer un coefficient pour la température C_θ , variable en fonction de la température. Il est égal à :

$$C_\theta = e^{\frac{\theta - 50}{10,8}}$$

- Etape 5 :

Prédire l'orniérage à l'aide de la formule :

$$T = C_\theta \cdot \alpha \left(\frac{C_w \cdot W}{1000 \cdot C_v} \right)^\beta + \delta$$

8.5 L'ORNIEREUR LPC

DESCRIPTION GENERALE

L'orniéreur du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées en France (LPC) est utilisé avec succès depuis plus de 20 ans pour prévenir les risques d'orniérage des chaussées, notamment en France, en Belgique et en Suisse (LAVOC). Récemment, l'EMPA et ViaGroup se sont équipés du même appareil.

L'orniéreur LPC est un instrument de laboratoire qui permet de tester :

- la susceptibilité à l'orniérage des enrobés bitumineux,
- la tenue aux sollicitations tangentielles des couches de roulement bitumineuses, en particulier les enduits superficiels et les revêtements minces.

L'éprouvette, de forme parallélépipédique, est confectionnée sur une table de compactage LPC ou prélevée dans une chaussée.

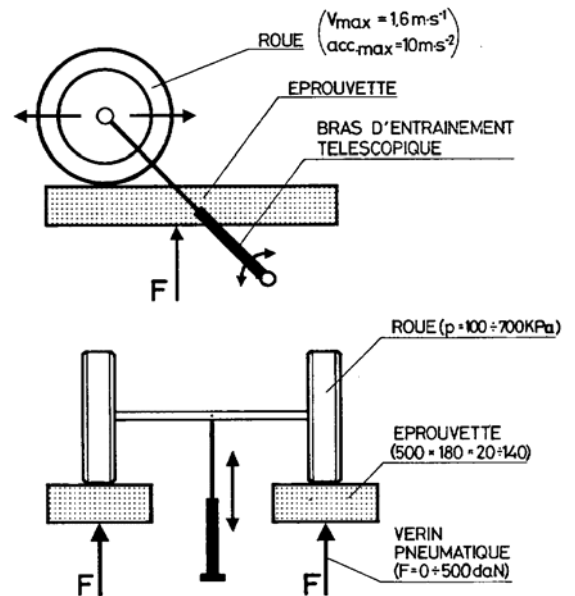
L'orniéreur, équipé de 2 berceaux indépendants, permet de tester 2 éprouvettes en parallèle avec des paramètres identiques ou non.

La surface de chacune des éprouvettes est soumise aux sollicitations d'une roue montée sur un chariot animé d'un mouvement alternatif sinusoïdal.

La charge est appliquée par un vérin qui agit sur le berceau support de chacune des éprouvettes.

Un effet de cisaillement latéral peut être introduit par la modification de l'angle de la roue par rapport au sens de roulement.

Le simulateur est caréné et calorifugé. Il permet donc de réaliser les essais à une température régulée et constante.



CARACTERISTIQUES

Les caractéristiques principales de l'orniéreur sont les suivantes :

- dimensions des plaques:
L * B * H = 500 * 180 * max. 140 mm
- charge exercée par le vérin : max. 5 kN
- pression du pneu : 0,100 à 0,700 MPa
- fréquence : 7200 passages/heure
- essai réalisé simultanément sur 2 plaques, temps d'essai pour une formule : 5 jours

Le résultat de l'essai est la profondeur d'ornière ou déformation en pourcentage de la hauteur initiale de l'éprouvette Pi %

VALEURS ADMISSIBLES*

Sorte d'enrobé	AB		HMT	
	S	H	S	H
Température d'essai	60°C	60°C	60°C	60°C
Nombre de cycles	10'000	30'000	10'000	30'000
Déformation admissible (Pi %)	< 10%	< 10%	≤ 10%	≤ 8%

PROCEDURE OPERATOIRE ET NORMALISATION

- **Norme française NF P 98-253-1** ; Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés, partie 1 : Essai d'orniérage
- **SETRA/LCPC** ; Guide d'application des normes pour le réseau routier national
- ***Norme suisse SN 640 431b** ; Revêtements en béton bitumineux : conception, exigences, exécution

REFERENCES SUR L'APPROCHE PERFORMANCIELLE DE L'ESSAI

ASCHENBRENER T. " L' ORNIEREUR LCPC TESTE SUR LES CHAUSSEES DU COLORADO",
REVUE GENERALE DES ROUTES ET DES AERODROMES. 1995/05. (729) pp66-72 (8 Refs.)

Cette étude prospective a été menée dans l'état du Colorado par le département des transports de l'état du Colorado et le centre de recherche routière Turner Fairbanks avec l'orniéreur LCPC. Il s'agissait pour l'essentiel de vérifier les capacités de prédiction du matériel en procédant à des essais sur des enrobés dont le comportement sur le terrain était connu. Des échantillons de chaussée ont été identifiés et soumis à l'orniéreur LCPC. L'originalité de l'étude a consisté à tester les enrobés à différentes températures. Les résultats ont montré qu'il y avait corrélation entre les résultats de l'essai et l'ornière mesurée en place lorsque l'on prenait en compte le volume du trafic et la température du site.

MANDAT VSS 12/98, "ELABORATION D'UNE METHODE PREDICTIVE DE L'ORNIERAGE DES
REVETEMENTS BITUMINEUX AU MOYEN DE L'ORNIEREUR LCPC"

Au travers l'utilisation de l'orniéreur LCPC, cette recherche a pour objectif de permettre la prédiction en laboratoire de l'évolution de l'ornière d'un enrobé bitumineux en place compte tenu des sollicitations générées par le trafic et des conditions climatiques qui sont propres à la Suisse. Ce mandat est actuellement en cours au LAVOC.

8.6 ESSAI DE RETRAIT THERMIQUE EMPECHE TSRST

DESCRIPTION GENERALE

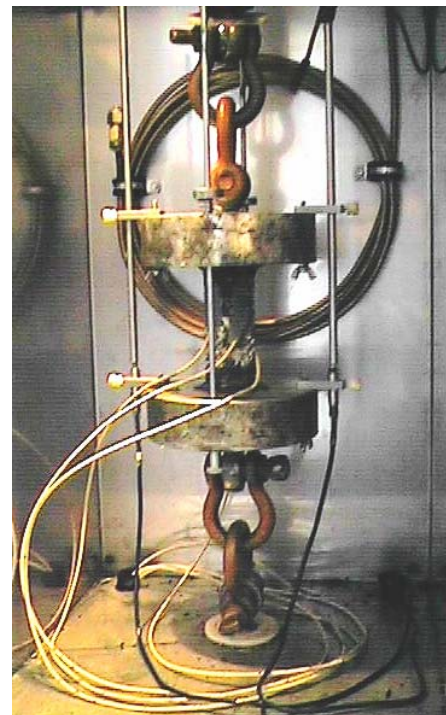
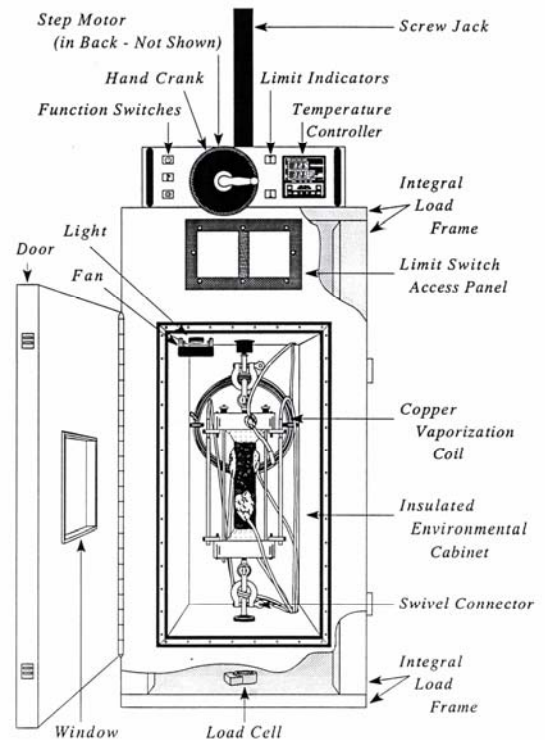
L'Université d'Etat de l'Oregon aux U.S.A a développé et exploité, sous mandat SHRP, un essai de retrait thermique empêché appliqués sur des éprouvettes d'enrobés bitumineux. Cet essai, qui reprend le principe développé par Monismith puis par Arand en Allemagne, se nomme "Thermal Stress Restrained Specimen Test" ou TSRST.

L'éprouvette d'enrobé prismatique de dimension de 51*51*254mm ou de 30*30*100mm, est collée entre deux plateaux à l'intérieur d'une enceinte thermique. Le plateau inférieur est relié à une cellule de force et le plateau supérieur est relié à un moteur pas à pas qui maintient l'éprouvette à une longueur constante durant la phase de refroidissement.

La régulation du moteur pas à pas se fait sur la valeur moyenne de deux capteurs LVDT placés de part et d'autre du plateau inférieur et sur lesquels viennent se poser deux barres en invar reliées au plateau supérieur.

La chambre thermique est refroidie par un système d'azote liquide ou d'air comprimé pulsé à l'intérieur de l'enceinte. Quatre capteurs de température sont disposés sur les faces de l'éprouvette. Un capteur de température, fixé sur le dispositif de montage, est relié à un module dynamique de contrôle permettant la régulation de la température à l'intérieur de l'enceinte.

Le dispositif mis en place, l'enceinte est refroidie à la température de +5°C et elle est maintenue à cette valeur jusqu'à ce que l'équilibre de la température à l'intérieur de l'éprouvette soit atteint.

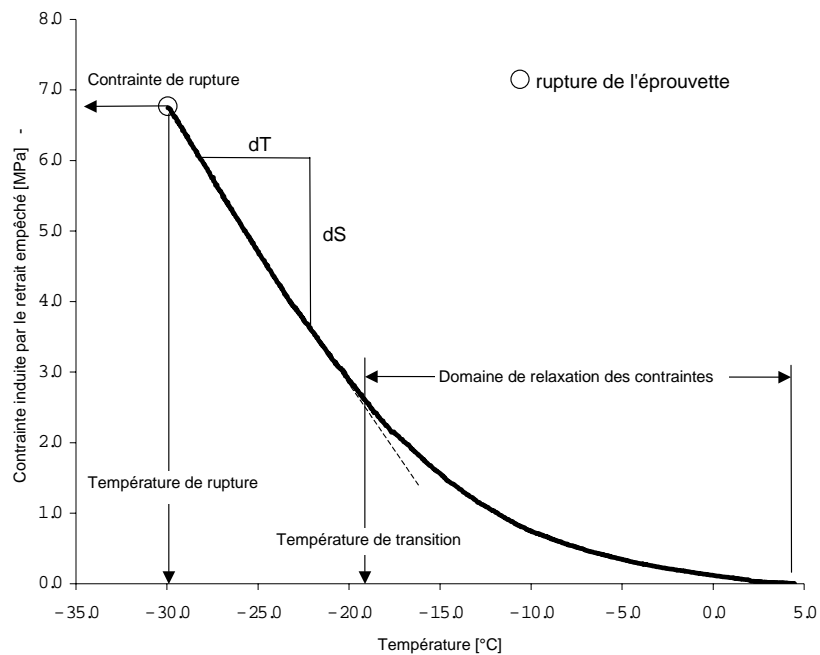


CARACTERISTIQUES

L'équipement permet d'effectuer des essais à des vitesses de refroidissement constantes de $2^{\circ}\text{C}/\text{heure}$ à $-10^{\circ}\text{C}/\text{heure}$, cela dans une gamme de température de $+5^{\circ}\text{C}$ à -50°C . Notons que la procédure standardisée propose un gradient de température de $-10^{\circ}\text{C}/\text{heure}$. L'essai a une très bonne répétabilité, deux essais suffisent généralement pour caractériser un matériau, soit une durée d'essai de l'ordre de 10 heures.

L'essai fournit les caractéristiques suivantes :

- la température de rupture de l'éprouvette
- la contrainte de rupture de l'éprouvette
- la température de transition qui définit la limite, dans les conditions de sollicitations de l'essai, à partir de laquelle l'évolution de la contrainte est linéaire
- la pente de l'évolution de la contrainte (ds/dT) en phase "linéaire"
-



VALEURS ADMISSIBLES

Des recherches prospectives ont permis de spécifier des valeurs de référence au regard du comportement observé in situ de sections d'essais, en particulier aux U.S.A et en Suisse (voir les références ci-jointes).

Toutefois à ce jour, pour des conditions climatiques données, aucune recommandation ne mentionne de valeurs admissibles.

PROCEDURE OPERATOIRE ET NORMALISATION

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), *"Standard test method for thermal stress restrained specimen tensile Strength"*, AASHTO designation:TP10-93, first edition, may 1993

REFERENCES SUR L'APPROCHE PERFORMANCIELLE

VINSON TED S. KANERVA H.K. ZENG H. "LOW TEMPERATURE CRACKING: FIELD VALIDATION OF THE THERMAL STRESS RESTRAINED SPECIMEN TEST (TSRST)", Strategic Highway Research Program SHRP-A-401 contract A-033A, Washington DC 1994

L'essai TSRST a été validé in situ par l'analyse de cinq sections routières en Alaska, en Pennsylvanie, et en Finlande. Les résultats du TSRST ont été comparés à des indices de fissuration caractérisés par la fréquence des fissures transversales. L'ensemble des sections testées présente des températures en surface de l'ordre de -20°C à -25°C . Il apparaît que les résultats des essais TSRST, réalisés sur des éprouvettes de laboratoire ainsi que sur des éprouvettes carottées in situ, ont une bonne correspondance avec les indices de fissuration. Toutefois notons que cette validation, basée sur un faible échantillon de population, ne peut fournir une référence satisfaisante au regard de nos conditions climatiques tempérées.

PUCCI T. "APPROCHE PREVISIONNELLE DE LA FISSURATION PAR SOLLICITATION THERMIQUE DES REVETEMENTS BITUMINEUX", Thèse de doctorat n°2282, Laboratoire des Voies de Circulation - Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, octobre 2000

Dans le cadre de ce travail de thèse, une campagne d'essais TSRST a été menée sur des éprouvettes d'enrobé prélevées in situ sur 16 sections d'essais le long de la N9 dans le canton du Valais. Ces 16 sections, dites "les planches comparatives du Valais", diffèrent uniquement par le choix du bitume de formulation de la couche de roulement. Les planches comparatives présentent une palette de bitumes représentative de la tendance du marché de ces dix dernières années, soit des bitumes classiques, des bitumes modifiés et des bitumes composés d'ajouts pulvérulents.

L'analyse des résultats de laboratoire des matériaux prélevés dans la couche de roulement a distingué une caractéristique de l'essai qui est en adéquation avec l'état de la fissuration de surface relevé après 10 ans de mise en service ; il s'agit de la température de transition.

Les conditions spécifiques des planches du Valais, à savoir le type de la superstructure, la formulation des enrobés bitumineux "modifiés" et non modifiés, les sollicitations thermiques et mécaniques propres au site définissent le domaine de validité des conclusions apportées dans cette étude. Une validation à grande échelle de planches d'essais constituées d'une gamme de produits représentative du marché actuel et pour diverses conditions climatiques doit encore être apportée.

8.7 ESSAI DE COMPRESSION DIAMETRALE

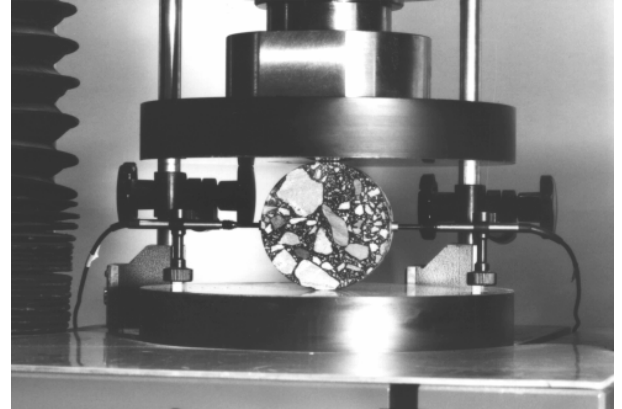
DESCRIPTION GENERALE

L'éprouvette cylindrique de dimensions variables est placée dans une enceinte thermorégulée jusqu'à ce qu'elle atteigne la température désirée (24h pour l'essai à -10°C, 6h pour l'essai à +45°C). Ensuite elle est placée entre les deux plateaux d'une presse cylindrique.

La presse doit être équipée de deux plateaux en acier ; l'appui d'un des plateaux est à rotule, l'autre étant fixe. La partie mobile du plateau doit être fixée solidement dans son logement sphérique, mais de façon à permettre la rotation de la face d'appui et son inclinaison dans toutes les directions suivant de petits angles.

Des capteurs de déplacement sont mis en place de sorte à enregistrer la déformation horizontale de l'éprouvette au cours de l'essai.

La charge est appliquée jusqu'à la rupture en maintenant constante la vitesse de déformation (0.3mm/s à -10°C et 0.8 mm/s à +45°C)



CARACTERISTIQUES

Cet essai permet d'obtenir d'une part la contrainte à la rupture ; elle est donnée par l'équation suivante

$$\sigma_{\text{rupture}} = \frac{2P}{\pi h D}$$

P = charge de rupture (N)

h = hauteur de l'éprouvette (mm)

D = diamètre de l'éprouvette (mm)

On calcule également la déformation à la rupture au cours de l'essai à 45°C :

$$\varepsilon_{\text{rupture}}(45^{\circ}\text{C}) = \frac{\Delta D}{D}$$

ΔD = déformation verticale

D = diamètre de l'éprouvette

8.8 ESSAI DE FATIGUE

DESCRIPTION GENERALE

L'essai de fatigue en flexion deux points consiste à solliciter en flexion une éprouvette trapézoïdale isocèle encastrée à leur grande base. Cette sollicitation peut se faire de deux manières :

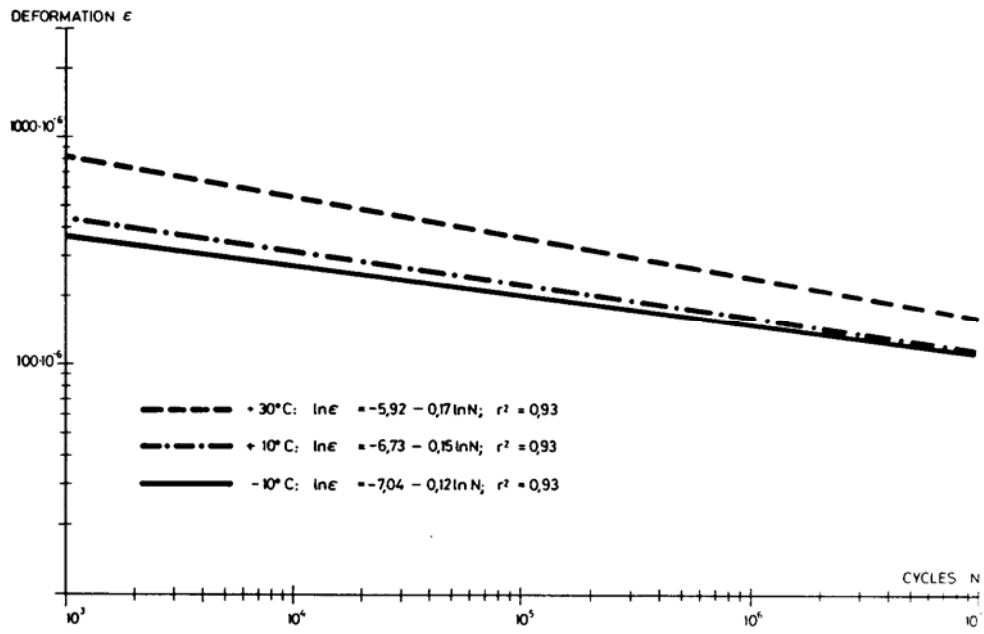
- En déplacement imposé : on impose un déplacement sinusoïdale d'amplitude constante à l'extrémité de l'éprouvette et on admet que la rupture est atteinte lorsque l'effort nécessaire pour obtenir la déformation est égal à la moitié de l'effort initial.
- En force imposée : on impose une force sinusoïdale d'amplitude constante à l'extrémité de l'éprouvette et on admet que la rupture est atteinte lorsque le module de rigidité vaut la moitié de celui initial.

A une température, l'essai est répété à plusieurs niveaux de déformation, ce qui permet d'établir la courbe de fatigue $N=f(\varepsilon)$, N étant le nombre de chargements provoquant la rupture et ε étant la déformation sur une fibre externe de l'éprouvette.



CARACTERISTIQUES

- éprouvettes ($h = 250$, $B = 56$, $b = 25$, $e = 25$ mm).
- Fréquence d'excitation : de 10 à 40 Hz.
- Amplitude de déplacement en tête d'éprouvette : de 0 à 1.4mm
- Enceinte thermique
- Appliquer la déformation imposée sinusoïdale. : $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t)$



8.9 RESULTATS DE L'ETUDE DE FORMULATION

Granulométrie

Enrobé		AB 11S SZ	
N° fabrication		107	109
Teneur liant/granulat théorique [%]		5.53	6.13
Filler théorique [%]		9	9
Passant [%]	Tamis [mm]		
	11.2	96.2	98.4
	8	74.4	80.9
	5.6	65.2	69.5
	4	60.1	63.6
	2.8	53.9	57.7
	2	44.4	48.6
	1	28.4	32.0
	0.5	21.9	24.4
	0.25	16.0	17.5
0.125	11.0	11.6	
0.09	8.5	8.8	

Essai Marshall

Enrobé	AB 11S SZ							
	107	110	127	128	129	133	109	
N° fabrication	107	110	127	128	129	133	109	
Teneur liant/granulat théorique [%]	5.53	5.68	5.83	5.83	5.9	5.9	6.13	
Filler théorique [%]	9	9	9	9	9	9	9	
Rapport filler/bitume [-]	1.6						1.5	
Module de richesse [-]	3.1						3.5	
MVR enrobé [g/cm ³]	2.489	2.484	2.479	2.479	2.476	2.476	2.478	
MVA enrobé [g/cm ³]	2.349	2.356	2.371	2.361	2.376	2.364	2.376	
Teneur en vides HM [%]	5.6	5.1	4.4	4.7	4.1	4.5	4.1	
Teneur en vides comblés HFB [%]	64.7	70.5	74.4	72.7	76	73.9	75.6	
Teneur en vides squelette HMM [%]	16.8	17.4	17	17.4	16.9	17.3	16.9	
Stabilité SM [kN]	15.5	13.7	15.4	14.3	15	14	13.4	
Fluage FM [mm]	2.3	2.3	2.3	2.3	2.4	2.3	2.2	
SM/FM [-]	6.8	6	6.9	6.2	6.3	6	6.1	

Enrobé	AB 11S UR/VS 50/70								AB 11S UR/VS 70/100	AB 11S UR/VS C85
	162	163	112	113	114	158	159	115		
N° fabrication	162	163	112	113	114	158	159	115	139	145
Teneur liant/granulat théorique [%]	162	163	112	113	114	158	159	115	5.61	5.61
Filler théorique [%]	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2		8.2
Rapport filler/bitume [-]										
Module de richesse [-]										
MVR enrobé [g/cm ³]	2.503	2.503	2.496	2.486	2.476	2.469	2.469	2.466	2.486	2.486
MVA enrobé [g/cm ³]	2.373	2.356	2.377	2.382	2.399	2.402	2.386	2.401	2.404	2.398
Teneur en vides HM [%]	5.2	5.9	4.8	4.2	3.1	2.7	3.4	2.7	3.3	3.5
Teneur en vides comblés HFB [%]	68.4	66.5	71	74.7	80.7	83.2	79.8	83.7	79	77.7
Teneur en vides squelette HMM [%]	16.4	17	16.4	16.5	16.1	16.1	16.7	16.3	15.7	15.9
Stabilité SM [kN]	12.4	11.8	13.4	11.8	13.8	12.4	11.7	12.4	11.8	14.8
Fluage FM [mm]	2.6	2.1	2.6	2.6	3	3.1	2.8	3.2	2.6	3.1
SM/FM [-]	4.9	5.6	5.1	4.5	4.6	4.1	4.2	3.9	4.6	4.8

Enrobé	HMT 22S										EME2	
	118	119	151	152	121	142	124	155	134	168	164	
N° fabrication	118	119	151	152	121	142	124	155	134	168	164	
Teneur liant/granulat théorique [%]	3.51	3.81	3.91	3.91	4.41	4.41	4.71	4.91	4.91	5.65	5.95	
Filler théorique [%]	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	7.5	8	
Rapport filler/bitume [-]												
Module de richesse [-]												
MVR enrobé [g/cm ³]	2.559	2.548	2.545	2.545	2.527	2.527	2.516	2.51	2.51	2.485	2.475	
MVA enrobé [g/cm ³]	2.371	2.382	2.334	2.351	2.393	2.381	2.395	2.382	2.397	2.427	2.422	
Teneur en vides HM [%]	7.4	6.5	8.3	7.6	5.3	5.8	4.8	5.1	4.5	2.3	2.1	
Teneur en vides comblés HFB [%]	51.5	56.5	50.7	53	64.9	62.8	68.5	68.1	70.8	84.6	86.1	
Teneur en vides squelette HMM [%]	15.2	15	16.8	16.2	15.1	15.5	15.3	15.9	15.4	14.9	15.3	
Stabilité SM [kN]	13.7	14.8	11.7	11.7	14.7	13.1	16.3	13.3	15.3	21.2	22	
Fluage FM [mm]	1.9	2.5	2.3	2	2.9	2.5	2.9	2.5	3.1	4.2	4.6	
SM/FM [-]	7.1	5.9	5.1	5.9	5.1	5.3	5.8	5.4	4.9	5.1	4.9	

PCG

Enrobé		AB 11S SZ					AB 11S UR/VS 50/70						
N° fabrication		107	127	128	129	109	162	112	113	114	158	115	
Teneur liant/granulat théorique [%]		5.53	5.83	5.83	5.9	6.13	5.11	5.31	5.61	5.91	6.11	6.21	
Filler théorique [%]		9	9	9	9	9	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	
Compacité moyenne [%]	Nb girations	5	85.5	87.1	86.7	87.7	87.3	83.4	84.3	84.6	85.4	85.5	86.5
	10	88.1	89.6	89.3	90.3	89.9	85.4	87.2	87.6	88.3	88.5	89.5	
	15	89.5	91.1	90.8	91.8	91.5	86.7	88.9	89.4	90.1	90.3	91.3	
	20	90.6	92.2	91.9	92.8	92.6	87.6	90.1	90.6	91.4	91.5	92.6	
	25	91.4	93	92.7	93.7	93.4	88.3	91	91.5	92.3	92.5	93.6	
	30	92	93.6	93.3	94.3	94.1	88.8	91.7	92.3	93.1	93.3	94.4	
	40	93	94.6	94.3	95.2	95	89.7	92.7	93.5	94.2	94.4	95.5	
	50	93.7	95.3	95	95.8	95.7	90.4	93.5	94.3	95	95.2	96.2	
	60	94.3	95.8	95.6	96.3	96.2	90.9	94.2	94.9	95.6	95.8	96.7	
	80	95.1	96.5	96.3	96.9	96.9	91.7	95.1	95.8	96.5	96.6	97.2	
	100	95.7	97	96.8	97.2	97.4	92.3	95.7	96.4	97	97.1	97.5	
	120	96.1	97.3	97.2	97.3	97.5	92.8	96.1	96.8	97.4	97.4	97.6	
	150	96.5	97.5	97.5	97.4	97.7	93.4	96.7	97.2	97.6	97.6	97.8	
	174	96.8	97.7	97.7	97.5	97.8	93.7	97	97.5	97.8	97.7	97.8	
	200 (extrap.)												
	C1 [%]		80.8	83	82.3	84.3	83.4	78.7	79.2	79.5	80.5	80.9	82.7
	Pente [-]		3.21	3.02	3.13	2.78	3.01	2.95	3.57	3.66	3.55	3.49	3.2
Vides hydro. à 174 girations [%]		2.6	1.5	1.5	1.6	1.6	4.9	1.9	1.4	1	1.4	1.1	

Enrobé		HMT 22S					EME2			
N° fabrication		118	119	151	121	124	134	168	164	
Teneur liant/granulat théorique [%]		3.51	3.81	3.91	4.41	4.71	4.91	5.65	5.95	
Filler théorique [%]		6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	7.5	8	
Compacité moyenne [%]	Nb girations	5	82.5	83.8	82.7	84.8	85.7	85.9	86.8	87.3
	10	84.9	86.2	85.1	87.4	88.1	88.5	89.7	90.3	
	15	86.2	87.6	86.4	88.9	89.7	90	91.4	92.1	
	20	87.1	88.6	87.4	89.9	90.7	91.1	92.7	93.3	
	25	87.8	89.3	88.1	90.8	91.5	92	93.6	94.2	
	30	88.4	89.9	88.7	91.4	92.1	92.6	94.3	94.9	
	40	89.2	90.8	89.6	92.3	93.1	93.6	95.2	95.7	
	50	89.8	91.5	90.3	93	93.8	94.3	96	96.3	
	60	90.3	91.9	90.8	93.6	94.3	94.8	96.5	96.7	
	80	91.1	92.7	91.6	94.5	95.1	95.6	97.1	97.2	
	100	91.7	93.3	92.2	95	95.6	96.1	97.4	97.5	
	120	92.1	93.7	92.7	95.5	96	96.5	97.6	97.7	
	150	92.5	94.2	93.2	96	96.5	96.9	97.8	97.9	
	174	92.8	94.6	93.5	96.3	96.8	97	97.8	97.9	
	200 (extrap.)							97.8	97.9	
	C1 [%]		78.3	79.5	78.1	80.1	81.2	81.5	83	84.1
	Pente [-]		2.89	3	3.06	3.23	3.14	3.17	3.13	2.92
Vides hydro. à 174 girations [%]		4.6	3.7	4.2	2	1.7	1.6	1.2	1	

Simulateur de trafic LPC

Enrobé		AB 11S SZ		AB 11S UR/VS 50/70			HMT 22S			EME2		
N° fabrication		110	130-131	160-161	122-123	156-157	149-150	125-126	135-136	169-170	165-166	
Teneur liant/granulat théorique [%]		5.68	5.9	5.11	5.61	6.11	3.91	4.41	4.91	5.65	5.95	
Filler théorique [%]		9	9	8.2	8.2	8.2	6.5	6.5	6.5	7.5	8	
Teneur en vides moyen. hydro. [%]		5.6	5.1	6.2	4.6	3.4	7.2	5.4	4.8	3.3	2.4	
Degré de compacité Marshall [%]		99.5	98.9	99	99.6	99.3	101.1	99.9	99.7	99	99.8	
Température d'essai [°C]		60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	
Profondeur d'ornièrè [mm]	Nb cycles	30	1.1	1.4	1.2	1.6	1.9	0.9	1.1	1.3	0.8	1
	100	1.5	1.9	1.4	2	2.5	1.1	1.3	1.6	1	1.5	
	300	1.9	2.5	1.7	2.4	3.1	1.3	1.5	1.9	1.3	2.1	
	1000	2.6	3.5	2.1	3	4	1.6	1.9	2.4	1.7	3	
	3000	3.4	4.7	2.5	3.6	5.1	1.9	2.3	2.9	2.2	4.3	
	10000	4.5	6.4	3	4.5	6.6	2.2	2.7	3.5	2.9	6.2	
	30000	5.8	8.6	3.5	5.4	8.4	2.6	3.3	4.3	3.8	8.7	
	60000	6.9	10.3	3.9	6.1	9.7	2.9	3.7	4.9	4.4	10.8	
	100000			4.3		10.8	3.1					
	Pente [-]		0.241	0.265	0.158	0.175	0.215	0.151	0.163	0.175	0.226	0.308
Coefficient de corrélation r2 [-]		0.98	0.97	0.97	0.82	0.83	0.99	1	0.9	0.95	0.85	

Module

Enrobé		AB 11S UR/VS 50/70			HMT 22S			EME2
N° fabrication		163	113	159	152	142	155	168
Teneur liant/granulat théorique [%]		5.11	5.61	6.11	3.91	4.41	4.91	5.65
Filler théorique [%]		8.2	8.2	8.2	6.5	6.5	6.5	7.5
10°C/10Hz [Mpa]		15392	15361	14393	14687	15784	14975	19044
15°C/10Hz [Mpa]		12081	12261	11230	11912	12518	12111	16951

Essai de fatigue

Enrobé	HMT 22S		
N° fabrication	152	142	155
Teneur liant/granulat théorique [%]	3.91	4.41	4.91
Filler théorique [%]	6.5	6.5	6.5
K [10⁻⁶]	1055	1012	1302
Pente a [-]	-0.186	-0.18	-0.184
Coefficient de corrélation r² [-]	0.84	0.9	0.96
ε 10⁶ [10⁻⁶]	81	85	102