



Projet initial – Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques

**Initial Projekt – Asphalt-Mischgut mit geringer
energetischer- und ökologischer Belastung**

**Initial project – Bituminous mixture with low energy and
ecological impacts**

**École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Laboratoire des voies de circulation (LAVOC)
Nicolas Bueche, ing. civil dipl. EPF
André-Gilles Dumont, professeur**

**IMP Bautest AG, Oberbuchsitzen
Christian Angst, Dr. sc. techn.**

**Mandat de recherche VSS 2008/502 sur demande de
l'Office Fédéral des Routes (OFROU)**



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la
communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle
comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen beauftragten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug : Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 "Clôture du projet", qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade. Ciò non vale per il modulo 3 «conclusione del progetto» che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e pertanto impegna soltanto questa.

Ordinazione : Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) appointed by the Swiss federal roads office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Supply : Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)

Impressum

Service de recherche et équipe de projet

Direction du projet

Prof. A.-G. Dumont

Membres

N. Bueche

Dr. C. Angst

Commission d'experts responsable

Commissions d'experts : FK5, FK4

Commission de suivi

Président

M. Alain Jacot FK5, président

Membres

M. Thomas Arn EK 5.01

M. Rémy Gubler EK 5.10

M. Manfred Partl FK 4

M. Martin Hugener EK 4.04

M. Josef Schwendeler EK 4.03

M. Max Seeberger Del. FK 4

M. Dieter Bosshardt

Auteur de la demande

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

Source

Le présent document est téléchargeable gratuitement sur <http://partnershop.vss.ch>.

Table des matières

RESUME	7
ZUSAMMENFASSUNG	8
SUMMARY	9
1. Projet initial: Contenu et objectifs.....	11
2. Buts et objectifs du paquet de recherches	13
3. Contexte général.....	15
4. Les enrobés à faibles impacts.....	17
4.1 Bref historique des enrobés tièdes.....	17
4.2 Définitions et concepts généraux des enrobés à faibles impacts.....	18
4.3 Principaux procédés tièdes et froids	20
4.3.1 Récapitulatif des différents procédés tièdes et froids	20
4.4 Considérations générales sur les enrobés tièdes	27
4.4.1 Types d'enrobés.....	27
4.4.2 Centrales d'enrobage.....	27
4.4.3 Remise en service.....	28
4.5 Avantages et potentiel des enrobés tièdes.....	28
4.5.1 Avantages liés aux enrobés tièdes	28
4.5.2 Considérations énergétiques.....	29
4.5.3 Considérations économiques.....	29
4.5.4 Potentiel des technologies tièdes : Bilan	30
4.6 Désavantages et risques potentiels pour certains procédés tièdes.....	31
4.7 Sélection de technologies pour le paquet de recherches	31
4.7.1 Considérations générales	31
4.7.2 Analyse des procédés et sélection.....	32
4.7.3 Exigences relatives au paquet de recherches proposé.....	37
5. Aperçu de l'état des recherches dans le domaine.....	39
6. Workshop	41
6.1 Concept et objectifs.....	41
6.2 Organisation.....	41
6.3 Thématiques prioritaires identifiées pour le paquet de recherches.....	42
7. Synthèse des attentes et besoins	45
8. Libellé du paquet de recherches	47
8.1 Introduction et données initiales	47

8.1.1	Procédés considérés et nomenclature	47
8.1.2	Mode de fabrication des différents procédés	49
8.1.3	Données complémentaires pour les mesures des émissions.....	49
8.1.4	Implication des entreprises.....	49
8.2	Paquet de recherches.....	50
8.2.1	Organisation générale.....	50
8.2.2	Contenu des recherches spécifiques.....	53
8.3	Programme du paquet de recherches.....	68
9.	Conclusions et recommandations	71
10.	Annexes	73
10.1	Principaux procédés tièdes et froids	73
10.1.1	Enrobés tièdes et semi-tièdes	73
10.1.2	Enrobés froids	89
10.2	Synthèse des interventions du workshop	93
10.2.1	Thématique 1: Situation dans le domaine	93
10.2.2	Thématique 2: Besoins dans le domaine des enrobés à faibles impacts.....	95
10.3	Liste des participants au workshop.....	99
10.4	Appel d’offre du paquet de recherches.....	101
10.5	Clôture du projet.....	115
10.6	Index des rapports de recherche en matière de route.....	118
11.	Bibliographie	120

RESUME

La production d'enrobé bitumineux pour les revêtements de chaussées consomme de grandes quantités d'énergie et produit des émissions considérables. Des réductions substantielles peuvent être obtenues en ayant recours à des techniques spécifiques : modification de la séquence d'enrobage, moussage du bitume par introduction d'eau ou maîtrise de la teneur en eau, utilisation de cires ou additifs chimiques,...

Un inventaire et une analyse critique des techniques ainsi que des besoins des différents acteurs en termes de recherche ont été effectués dans ce projet initial. Ceci a permis d'établir les bases d'un vaste paquet de recherches qui abordera les thèmes suivants au travers de recherches spécifiques : impacts sur les centrales d'enrobage, bilan énergétique et écologique, formulation et optimisation des performances, durabilité et vieillissement, hygiène au travail, exigences et contrôle qualité. Un modèle global d'évaluation prenant en considération ces différents aspects sera également développé dans le but de fournir une aide à la décision.

L'objectif du paquet de recherches proposé consiste à fournir les bases scientifiques et techniques pour la promotion et une plus large utilisation des enrobés à faibles impacts énergétiques et écologiques en Suisse.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Herstellung von Asphaltmischgut für den Strassenbau verbraucht grosse Mengen an Energie und hat einen beträchtlichen CO₂-Ausstoss. Mit Hilfe spezifischer Techniken können erhebliche Temperatur- und Emissionen-Ermässigungen erreicht werden: Modifizierung der Umhüllungs-Reihenfolge, Schäumen des Bitumen anhand von Wasserzufuhr oder Kontrolle des Wassergehaltes, Anwendung von Wachsen oder chemischen Zusätzen, ...

In diesem Initialprojekt werden die aktuellen Techniken beschrieben und einer kritischen Analyse unterworfen. Dazu wurden die Bedürfnisse an Forschung der verschiedenen Akteure untersucht. Dies führte schliesslich zur Definition eines umfangreichen Forschungspaketes, welches anhand spezifischer Forschungsprojekte diverse Themen untersuchen wird: Einfluss auf die Aufbereitungsanlagen, Energie- und Umweltbilanz, Mischgutrezeptierung und Optimierung der Leistungen, Dauerhaftigkeit und Alterung, Arbeitshygiene, Qualitätsanforderungen und -Kontrolle. Mit Hilfe dieser verschiedenen Aspekte wird ebenfalls ein globales Auswertungsmodell entwickelt, welches als Entscheidungshilfemittel benutzt werden kann.

Die Zielsetzung des Forschungspaketes besteht darin, eine wissenschaftliche und technische Basis für die Förderung einer weitgehenden Nutzung von Asphaltbelägen mit niedriger energetischer und ökologischer Belastung in der Schweiz, zu erreichen.

SUMMARY

The production of bituminous mixture for asphalt pavements has significant energy consumption and greenhouse gas emissions. Large savings can be obtained by resorting to specific techniques: modification of the coating sequence, bitumen foaming through water introduction or control of the water content, uses of waxes or chemical additives,...

An inventory and a critical analysis of the techniques as well as the needs of the various stakeholders in terms of research have been carried out in this initial project. This permitted to establish the basis of a vast research package that will treat following themes through dedicated specific researches: impacts on mixing plants, energy and ecological assessment, mix design and performance optimization, durability and ageing, work safety (hygiene), demand and quality control. A global evaluation tool taking into account these various aspects will also be developed in order to provide a decision support.

The objective of the proposed research package consists in providing the scientific and technical basis for the promotion and a wider use of bituminous mixture with low energy and environmental impacts in Switzerland.

1. Projet initial: Contenu et objectifs

Le "Projet initial VSS 2008/502 – Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques" a pour objectif prioritaire d'aboutir à une démarche détaillée en vue d'une évaluation d'enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques. Cette évaluation globale pourra s'effectuer ensuite dans le cadre d'un paquet de recherches dont les bases sont établies dans le présent projet initial. Il a donc pour but principal d'analyser les filières technologiques les plus récentes en matière d'enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques, et d'élaborer les détails du paquet de recherches qui suivra.

Le projet initial consiste dans un premier temps en une mise à niveau des connaissances au travers de recherches bibliographiques et contacts avec des acteurs nationaux et internationaux. Dans ce but un workshop a été organisé lors du projet initial. Ce workshop sur invitation de différents experts reconnus du domaine a permis de mettre en évidence les besoins actuels et problématiques récurrentes liées aux enrobés à faibles impacts. Il permet de plus d'affiner la définition de la problématique à développer lors du paquet de recherches. Les détails et enseignements du workshop sont rapportés au chapitre 6.

Dans une seconde phase, le projet initial s'attache à analyser et évaluer certaines techniques ou familles de procédés au potentiel élevé. Une sélection des procédés est conduite et un paquet de recherches est finalement élaboré. Au préalable certains principes sont fixés concernant le projet initial ainsi que le paquet de recherches qui suivra:

- La recherche va se concentrer sur les différents procédés en poste connus et existants sur le marché pour une évaluation, ceci sans développer de nouvelles technologies. La sélection des techniques à évaluer sera effectuée de manière à englober les principaux processus permettant ainsi une large vision de la situation. Aucun procédé nouveau ne sera donc développé.
- Le thème "Enrobés à faibles impacts énergétiques et écologiques" est très vaste. Les enrobés à faibles impacts (également appelés enrobés écologiques) mentionnés dans ces documents correspondent aux techniques de fabrication avec une température de production et de pose réduite, limitant ainsi la consommation énergétique et les émissions. Ceci comprend principalement les enrobés tièdes et semi-tièdes (voir chapitre 4). La température de production est prise comme critère de sélection pour les enrobés à faibles impacts énergétiques et écologiques. Au vu de la multitude de procédés existants et répondant au critère de température, il a donc été décidé de se focaliser sur certaines familles de technologies au potentiel important.
- Il a été choisi de se concentrer sur les enrobés tièdes, sans combinaison systématique avec des matériaux recyclés. En effet, le recyclage fait l'objet d'un projet de recherche de l'Office Fédéral des Routes indépendant actuellement en cours [1]. Une collaboration avec le projet relatif aux enrobés recyclés sera effectuée lors du paquet de recherches, mais la combinaison d'enrobés tièdes avec matériaux recyclés ne sera pas étudiée de manière approfondie. Certaines considérations et analyses de potentiel seront cependant faites lors de la recherche. Ceci limite l'étendue de la recherche et les paramètres à prendre en considération mais permet de concentrer les efforts sur les techniques essentielles.

2. Buts et objectifs du paquet de recherches

La technique routière peut contribuer notablement à la réduction des gaz à effet de serre en produisant des revêtements bitumineux à plus faible température. Plusieurs procédés apparus récemment présentent des bilans favorables de réduction de la consommation d'énergie et de réduction des émissions.

Avant de promouvoir ces techniques et avant de pouvoir les appliquer largement, il est nécessaire de répondre à plusieurs questions. L'objectif du paquet de recherches est de fournir aux administrations et aux entreprises un outil d'évaluation sous de multiples aspects des technologies innovantes existantes. Il sera alors proposé une décomposition de la recherche en projets spécifiques traitant chacun d'une problématique particulière. Il est d'ores et déjà prévu de traiter des différents thèmes sur l'ensemble de la durée de vie de la chaussée, de la phase de production au comportement à long terme, tout en considérant les aspects de santé, performances, etc. Le paquet de recherches proposé vise à donner les bases, mais également approfondir les points suivants:

1. Bilan énergétique et écologique
2. Propriétés mécaniques et performances
3. Durabilité et vieillissement
4. Modèle global d'évaluation (basé sur 1, 2, 3)
5. Hygiène au travail
6. Exigences et contrôle qualité
7. Mise en application sur sections tests

<p>Le but général de ce paquet de recherche consiste à fournir des bases scientifiques et techniques pour que la construction routière utilise largement les enrobés à faibles impacts énergétiques et écologiques en Suisse pour la production quotidienne.</p>
--

3. Contexte général

Avec la problématique du développement durable¹, les considérations sur la consommation d'énergie ainsi que les émissions de polluants (CO₂, NO_x, COV² principalement) sont au cœur des préoccupations. En effet, la consommation totale d'énergie en Suisse continue inexorablement sa croissance pour atteindre près de 870'000 TJ en 2007 [2] alors que la valeur était encore de 100'000 TJ au début du XX^{ème} siècle, ce qui représente une augmentation d'un facteur 8.7 en un siècle. Notons encore que de cette énergie finale, plus de la moitié provient du pétrole qui est donc le principal agent énergétique en Suisse loin devant l'électricité (environ 25%). En parallèle à cette augmentation de la consommation énergétique, les émissions nocives dont notamment le CO₂ - principal gaz à effet de serre d'origine humaine (il produit 80% des gaz à effet de serre en Suisse) – augmentent également. En effet, la concentration a augmenté de près de 35% entre la période pré-industrielle et 2007 pour atteindre près de 380 ppmv³, ce qui constitue un record. La production de CO₂ a diverses origines, mais dans le cas de pays dits industrialisés une part prépondérante peut-être imputée aux secteurs de l'industrie et de la construction (25% environ) et des transports (25% environ) selon l'AIE⁴.

Poursuivant cet objectif de diminution des émissions et réduction des consommations énergétiques tout en s'adaptant au niveau technologique, de nombreuses initiatives ont été prises à plus ou moins grande échelle. En mars 2007, le sommet européen de Bruxelles a fixé des objectifs de réduction du CO₂ à 20% d'ici dix ans. Par la ratification du Protocole de Kyoto à la Convention des Nations Unies en 2003, la Suisse s'est engagée à réduire de 8% ses émissions de CO₂ et autres gaz à effet de serre entre 2008 et 2012, ceci en comparaison avec la situation de 1990. Suivant cette même logique et dans l'objectif de respecter ses engagements du protocole de Kyoto, diverses mesures ont fait leur apparition en Suisse: taxe CO₂ pour les combustibles fossiles (mazout, charbon) de 12 CHF par tonne d'émissions de CO₂ dans un premier temps, cette taxe pouvant atteindre 36 CHF en 2010. Un centime climatique est également prélevé sur les carburants fossiles (essence, diesel) et une autre mesure comprend la baisse des prix du gaz utilisé comme carburant ainsi que du biogaz. Autre mesure incitative, la redevance sur le trafic poids lourds liée aux prestations (RPLP) en vigueur depuis janvier 2001 qui pousse à optimiser les dépenses énergétiques ainsi que les émissions.

Dans ce contexte général de soucis environnemental, les différents outils financiers incitent les acteurs à remettre en considération les filières de production, de transport et d'utilisation des ressources ; notamment le bitume routier dont le prix est directement lié à celui du baril de pétrole [3]. D'importants efforts sont indispensables et la route peut apporter également sa contribution à la réduction de la consommation d'énergie et des émanations polluantes. En effet, les matériaux bitumineux sont d'énormes consommateurs d'énergie lors de leur processus de fabrication.

Les acteurs de la technique routière se tournent vers des techniques innovantes de production des enrobés bitumineux comme par exemple un double enrobage à la mousse, l'utilisation d'un liant de synthèse à composants d'origine végétale ou encore l'ajout de plastifiants (cires ou package chimique) dans le bitume. D'autre part, la majorité des chantiers de renouvellement et construction de chaussées font appel à des matériaux de recyclage dont le potentiel énergétique et environnemental est indéniable.

¹ Défini ainsi selon Rapport Brundtland de la Commission Mondiale sur L'Environnement et le Développement: "...Développement qui répond aux besoins des générations du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs..."

² COV: Composés organiques volatiles

³ ppmv: partie par million de volume

⁴ AIE: Agence internationale de l'énergie

Il apparaît donc possible de contribuer à la préservation de l'environnement et des ressources naturelles.

Différentes techniques sont actuellement en plein développement, mais le recul sur le comportement à long terme de tels enrobés est très limité. Une évaluation des performances et du bilan énergétique et écologique sont nécessaires avant une application très large et reconnue de ces procédés. D'autre part le gain économique reste bien difficile à évaluer car dépendant de nombreux facteurs exogènes. L'outil permettant cette évaluation globale spécifiquement pour les matériaux de chaussée n'existe pas, bien que sa nécessité soit reconnue, et c'est à quoi le projet de recherche proposé va notamment s'attacher. Dans ce contexte ont émergés des mélanges bitumineux, qui s'efforcent de réduire leur impact à la fabrication en diminuant leur température d'élaboration en centrale. On désigne ces matériaux innovants comme enrobés tièdes (100 à 140 °C), semi-tièdes (60 à 100 °C) ou à froid (<60 °C).

4. Les enrobés à faibles impacts

Comme déjà mentionné, le projet initial ainsi que le paquet de recherches se focalisent sur les procédés d'entreprise existants, sans considérer le développement potentiel de nouveaux produits. Afin d'effectuer une sélection des techniques à analyser lors du paquet de recherches, qui corresponde à la situation mais également aux besoins dans le domaine, une description des filières technologiques existantes est préalablement effectuée. Cette description détaille les principes généraux appliqués. La liste des différents produits commercialisés selon les principes généraux ne se veut pas exhaustive, mais elle comprend les principaux produits développés avant début 2009. Cette analyse préliminaire poursuit donc l'objectif de mieux comprendre les modes d'élaboration ainsi que l'expérience acquise pour chacune des familles de procédés. Ceci permettra par la suite d'en effectuer une sélection pour le paquet de recherches.

Comme détaillé plus loin, les différents produits développés font l'objet, pour la plupart, de brevets détenus par des sociétés privées. Au vu de la multitude des procédés ainsi que de la nécessité de reconnaissance des produits en vue d'application, les dépositaires de brevets montrent en règle générale un large esprit de collaboration. Des contacts sont d'ailleurs engagés dans le cadre de ce projet initial.

4.1 Bref historique des enrobés tièdes

Les enrobés à l'émulsion étant utilisés et maîtrisés depuis de nombreuses années, ce bref historique va se focaliser sur les étapes majeures du développement des enrobés tièdes dans le monde.

Il est à relever que certaines techniques utilisées dans le développement d'enrobés tièdes ne sont pas récentes. Par exemple, les premières utilisations de bitume mousse datent de 1957, par le Dr. Ladis H. Csanyi professeur de l'Université de l'Iowa. A cette époque, l'objectif était de tirer bénéfice du moussage et de l'augmentation de volume du bitume lors de l'injection d'eau, ceci afin d'utiliser le bitume moussé comme liant pour la stabilisation des sols. Le principe consistait alors à injecter de la vapeur dans le bitume chaud. Par la suite, le principe a été modifié et simplifié, en remplaçant la vapeur par de l'eau froide notamment. Les premiers développements de bitume mousse étaient donc principalement liés aux enrobés froids et recyclés. Par la suite, ce système a été développé jusqu'à son utilisation actuelle.

Les enrobés tièdes ont connu les premières évolutions significatives au cours de années '90, en Europe. Ces développements avaient bien entendu pour objectifs principaux de répondre aux exigences de développement durable croissantes, par réduction des émissions de gaz à effet de serre et de la consommation énergétique. Dans ce processus, la signature du protocole de Kyoto (ouvert à ratification en 1998) a sans aucun doute joué un rôle majeur dans bon nombre de pays européens. Un autre facteur ayant assurément favorisé l'émergence de ces procédés en Europe est le prix de l'énergie ainsi que les exigences environnementales très strictes. Les premiers développements ont tout d'abord concerné des techniques à la zéolithe (Mitteldeutsche Hartsteinindustrie AG, Eurovia) en Allemagne, en 1995. L'année suivante, Shell et Kolo Veidekke commencent à expérimenter en Norvège une technique WAM (Warm Asphalt Mixes). La première chaussée en enrobé tiède utilisant une cire Fischer-Tropsch (Sasobit®) est réalisée l'année suivante, en 1997, à Hambourg. Les développements s'enchaînent alors et c'est en 1999 que les premières poses de WAM Foam® (Shell et Kolo Veidekke) et d'enrobé à l'Asphamin® sont effectuées [4]. Les premiers développements concernant notamment le WAM Foam sont publiés lors de la conférence Eurasphalt & Eurobitume 2000 qui marque un point de départ pour les différentes publications de recherches. Par la suite, les développements s'enchaînent, bon nombre dans le cadre de recherches d'entreprises privées [5].

Les Etats-Unis ont quant à eux effectué les premiers développements et expérimentations d'enrobés tièdes quelques années après l'Europe. Ceci a démarré en 2002 par une étude de la NAPA⁵, introduisant les enrobés tièdes aux Etats-Unis. Suite à cela, la FHWA⁶ et NAPA formèrent en 2005 le « WMA Technical Working Group » avec pour mission de faire connaître ces procédés, créer une base de données des expériences et développements, les performances, les spécifications,... Un événement charnière dans le développement des enrobés tièdes outre atlantique est le « European Scan tour » initié par la NAPA, FHWA, AASHTO⁷ et NCHRP⁸ dont l'objectif est de recueillir des informations sur les pratiques européennes afin d'en aider l'implémentation aux Etats-Unis. Actuellement de grand effort sont fournis et de nombreuses expérimentations en cours aux Etats-Unis, ceci afin de promouvoir la recherche et le développement des enrobés tièdes.

Nous pouvons encore relever qu'en Australie [6], les premiers développements datent de la fin des années 90. Dans le cas du Japon, ces techniques ne sont pas réellement implantées, hormis la réalisation sporadique de sections test. Il semble cependant que le pays soit prêt à produire et poser des enrobés tièdes, en fonction des décisions politiques à venir.

4.2 Définitions et concepts généraux des enrobés à faibles impacts

Nous définissons de manière générale les enrobés à faibles impacts comme des mélanges bitumineux dont la température de fabrication est inférieure à celle des enrobés à chaud traditionnels (Hot Mix Asphalt – HMA). Les enrobés à chaud ont une température de production qui se situe aux alentours de 150-180 °C et une température de pose à 130-160 °C. Le choix des températures est principalement lié au grade de bitume utilisé.

Ainsi, nous comprendrons sous la dénomination d'enrobés à faibles impacts les enrobés tièdes (Warm Mix Asphalt - WMA), semi-tièdes (Half-Warm Mix Asphalt - HWMA) qui tous deux se confondent volontiers sous le vocable général d'enrobé tiède, ainsi que les enrobés à froid (Cold mix asphalt - CMA). Ces différents enrobés ont pour objectif de baisser la température d'enrobage, tout en conservant une bonne maniabilité pour la mise en œuvre et le compactage. Il s'agit donc de trouver une méthode, avec ou sans ajout, permettant de maintenir artificiellement une bonne viscosité du liant durant la période d'application. Ces différents procédés peuvent se classer selon plusieurs paramètres tels que la température de fabrication, la consommation énergétique ou encore les émissions. La Figure 4-1 donne un exemple de classification. Dans cette figure, nous pouvons identifier les domaines suivants du point de vue de la température de fabrication:

- Enrobés à chaud: 150 à 180 °C
- Enrobés tièdes: 100 à 140 °C
- Enrobés semi-tièdes: 60 à 100 °C
- Enrobés à froid: 20 à 60 °C

Sans aller dans les détails, nous pouvons mettre en évidence d'un point de vue énergétique le palier important représenté par le passage de la température critique de 100 °C qui permet de clairement différencier deux catégories (tièdes et semi-tièdes). En effet, la chaleur latente de vaporisation de l'eau est très grande (537 kcal/kg ou 2250 kJ/kg), et il faut une énergie 500 fois supérieure pour la vaporisation de l'eau que celle nécessaire afin de chauffer la même masse d'eau de 1 °C. Nous pouvons également relever que l'énergie nécessaire à chauffer le squelette minéral est environ 5 fois plus faible

⁵ NAPA : National Asphalt Pavement Association

⁶ FHWA : Federal Highway Administration

⁷ AASHTO : Association of State Highway and Transportation Officials

⁸ NCHRP : National Cooperative Highway Research Program

que celle nécessaire afin d'élever la température de l'eau qui est définitivement le plus gros consommateur énergétique lors de la production d'enrobé.

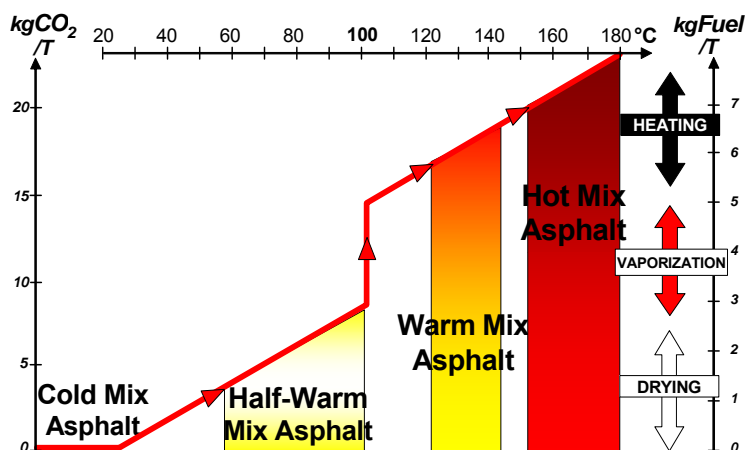


Figure 4-1: Classification des différents types d'enrobés bitumineux (Source: LEA-CO)

Le mode de fabrication d'enrobés à température réduite permet par conséquent un gain considérable au niveau énergétique, par exemple en effectuant un séchage partiel des granulats et en évitant la vaporisation de l'eau qui consomme une grande énergie en chaleur latente de vaporisation. Au niveau de la consommation de fuel, les gains sont évalués à environ 1l/t. pour les enrobés tièdes, et 1.5-3 l/t. pour les procédés semi-tièdes sur un total de 7-8 l. [7, 8]. A l'échelle de la France, ceci représente un gain potentiel de 0.7 mio. de tonnes de pétrole si l'ensemble de la production était fabriquée selon les procédés tièdes. Les gains au niveau environnemental obtenus en diminuant les nuisances tant à la fabrication que lors de la mise en œuvre sont également considérables avec une réduction d'émissions estimée globalement à environ 20% (CO₂, SO₂, NO₂) mais pouvant atteindre 50% selon certains procédés.

Pour rappel, le principe général d'un enrobé à chaud consiste à chasser toute l'eau afin d'avoir un enrobage parfait des granulats déshydratés avec le liant. Afin d'obtenir un séchage complet des minéraux, une température supérieure à 120 °C est nécessaire et l'adhésivité bitume-granulat est ainsi améliorée. Pour des enrobés à chaud, l'humidité résiduelle est en général inférieure à 0.5% à plus de 140-150 °C [9].

Dans le cas d'enrobés tièdes, la température étant moins élevée, il est indispensable d'obtenir tout de même une faible viscosité pour une bonne diffusion du bitume (enrobage) et une bonne maniabilité du mélange. Différents procédés vont permettre de maintenir la viscosité du liant très basse durant toute la période d'application. La classification entre les principes peut varier selon les auteurs et nous proposons ici la classification suivante :

- Catégorie A. Procédés recourant à une **modification de la séquence d'enrobage**; sans modification des éléments du mélange ou enrobage séquentiel.
- Catégorie B. Procédés basés sur **l'introduction d'eau** afin d'avoir un moussage in-situ du bitume (appelé effet de "soupe" ou "moussabilité").
- Catégorie C. Procédés basés sur la **chimie** en agissant sur le liant ou l'enrobage. Ceci comprend:
 - L'addition de substances abaissant la viscosité (exemple: la paraffine).
 - L'utilisation d'un liant spécial ou de synthèse d'origine végétale de faible viscosité.

Le développement d'enrobés tièdes fera appel à au moins un des principes ci-dessus comme il le sera explicité plus loin.

Dans le cas d'enrobés à froid, le concept général est différent puisqu'il consiste à mélanger à température ambiante les granulats avec un bitume préalablement fluidifié, soit par solubilisation dans un solvant ou une huile légère ou par mise en émulsion dans l'eau. Comme il sera développé plus loin, ces procédés ne sont pas sans incidence, notamment au niveau de la montée en performance.

4.3 Principaux procédés tièdes et froids

Une description détaillée de l'élaboration et des caractéristiques des principaux procédés tièdes, semi-tièdes et froids peut être trouvée en Annexe 10.1. Dans cette annexe, les différents procédés existants sont décrits, mais également leur potentiel énergétique, écologique ainsi que l'expérience acquise et les adaptations nécessaires au niveau des centrales de production. Cette description ne se veut pas exhaustive, mais elle permet de considérer les principaux procédés et de les comparer selon différents aspects. La Figure 4-2 contient un résumé comparatif selon différents critères dont notamment les gains potentiels au niveau énergétique et environnemental, l'expérience acquise ainsi que les modifications nécessaires en centrale. Ces comparatifs permettront par la suite d'effectuer un choix de technologies à analyser lors du paquet de recherches. Tous les procédés et produits cités par la suite sont des marques déposées ®.

Les performances mécaniques et la durabilité ne seront pas détaillées dans ce chapitre. Elles feront en effet l'objet d'une recherche spécifique. Nous pouvons cependant rappeler que dans le cas d'enrobés tièdes ou à froid, les performances doivent être au moins équivalentes à celles d'enrobés à chaud, dès la fin de leur mise en œuvre et lors de la mise en service.

Dans la suite de ce projet, nous n'allons pas considérer les bétons bitumineux coulés, ceci même si certaines technologies « environnementales » existent (Nynas - Nyguss 'S', BP - Olexobit TA GE V3,...).

4.3.1 Récapitulatif des différents procédés tièdes et froids

Les principaux enrobés tièdes et semi-tièdes mentionnés ci-dessus et détaillés en Annexe sont présentés de manière synthétique dans la Figure 4-2. Etant donné les caractéristiques communes aux enrobés froids, ces derniers ne seront pas insérés dans le tableau. Différents critères différenciant les procédés ont été choisis afin de pouvoir effectuer de futures évaluations :

- *Additif* : indique si en plus du procédé utilisé, un additif est nécessaire. Par exemple, dans le cas d'un procédé ayant recours à un liant modifié de type Evotherm, ceci indique si en sus de ce dernier d'autres additifs ou dopes d'adhésivité sont nécessaires.
- *Recyclage* : cette section fait référence aux expériences de poses in-situ avec enrobé recyclé. Les essais de développement en laboratoire uniquement ne sont pas indiqués ici. Ceci ne caractérise pas le potentiel de la technologie par rapport à l'utilisation de matériaux recyclés.
- *Températures* : les températures minimales de production à la centrale et de compactage sur le chantier sont indiquées.
- *Procédé appliqué* : référence à la décomposition utilisée préalablement afin de classer les procédés selon qu'ils sont basés sur une modification de la séquence d'enrobage (A), l'introduction d'eau (B), la chimie (C) ou une combinaison de différents procédés (D).
- *Gains potentiels* : Il s'agit de gains publiés pouvant être issus de mesures, en laboratoire ou lors de la production en centrale. Ces gains, bien souvent annoncés par les fabricants, constituent un ordre de grandeur ceci car ils varient énormément selon les conditions de pose, la formulation, le type de centrale...
- *Coûts* : Les coûts liés à une technologie sont un élément clef lors d'un processus de décision. C'est pourquoi ils sont considérés ici. Les coûts sont cependant très difficiles à obtenir et ils

varient énormément selon les conditions. Les données indiquées dans le tableau ne peuvent donc servir qu'uniquement à titre indicatif. De plus, la source des différentes données est variable (contacts avec le producteur, articles, rapports de recherches, sites internet). Les données indiquées dans le tableau concernent parfois le coût des modifications à effectuer à la centrale d'enrobage ou alors les coûts inhérents à l'achat du matériau spécifique (cire par exemple).

- *Expérience* : cette section indique le nombre de tonnes posées (état mars 2009). Ces données sont également indicatives, et lorsque disponible il est indiqué si des expériences en Suisse ont été effectuées.
- *Modifications en centrale* : indique de manière résumée le type de modifications à faire à une centrale dans le but d'utiliser une technologie donnée. Davantage de détails peuvent être trouvés dans la section concernant la description des technologies. Dans ce tableau, des modifications « nulles » indiquent que l'additif/la cire peuvent être ajoutés ponctuellement au liant en amont de la centrale, sans modification aucune du poste; des modifications « mineures » indiquent par exemple un besoin de cuve additionnelle pour le stockage.

Procédé	Compagnie	Additifs	Recyclage	Températures	Procédé appliqué	Gains potentiels	Coûts	Expérience	Modifications centrale	Références
ENROBES TIEDES										
3E-LT®	Colas-Sacer (France)	Additif avec liant de base	n.a.	T _{prod} =125 °C T _{comp} =80-110 °C	A (C)	GES: 20-25%	Equivalent à celui des enrobés traditionnels ⁹	5'000 t. (3E) entre 2004-2007 (Fr, CH, Ca)	Mineures voire nulles	[7], [10]
3E-DM®	Colas (France)	Dope	n.a.	T _{prod} =125 °C T _{comp} =80-110 °C	A (D)	GES: 20-25% Energie: 30%	Equivalent à celui des enrobés traditionnels	5'000 t. (3E) entre 2004-2007 (Fr, CH, Ca)	Système stockage et dosage mousse bitume – ligne bitume	[7], [11], [10]
3E-DB®	Colas (France)	n.a.	n.a.	T _{prod} =125 °C T _{comp} =80-110 °C	A	GES: 20-25%	Equivalent à celui des enrobés traditionnels	5'000 t. (3E) entre 2004-2007 (Fr, CH, Ca)	Système stockage – ligne bitume	[7], [10]
Advera®	PQ Corporation (USA)	Zéolithe (0.25% masse totale du mélange) – Dope selon le type d'agrégats ¹⁰	Oui (55%)	T _{comp} =120 °C	B	NO _x : 30% COV: 60% CO: 60% (Résultats d'essais)	zéolithe : env. 1.35 US\$ /kg Coûts modifications centrale : 5'000 – 40'000 US\$	Principalement Etats-Unis et Am. du Nord >10'000 t.	Mineures (idem Aspha-min)	[12], [4], [13], [5], [14]
Aspha-min®	Eurovia (Allemagne)	Zéolithe (env. 0.3% masse totale du mélange)	Oui (tests effectués avec 90-100%)	T _{prod} =125-150 °C T _{comp} =100-130 °C	B	Energie: 20% CO ₂ , SO ₂ , NO ₂ : 18-25%	0.60\$/lb d'Aspha-min ¹¹ , Coûts modifications centrale : 5'000 – 40'000 US\$	Premiers chantiers: 2002 2004 – 2008: env. 300'000 t. En Europe	Mineures pour discontinues – Légères pour centrales continues	[7], [15], [16],[8], [17], [5], [4], [14], [18]

⁹ Information pour les enrobés 3E fournie par M. Claude Morzier, Directeur Commercial Colas Suisse, selon email du 30.03.2009.

¹⁰ Informations complémentaires fournies par Mme Annette Smith, Project leader PQ Corporation selon email du 20.02.2009.

¹¹ Donnée 2006 ; 1 lb=0.45 kg

Procédé	Compagnie	Additifs	Recyclage	Températures	Procédé	Gains potentiels	Coûts	Expérience	Modif. centrale	Références
Double Barrel Green ¹²	Astec Industrie Inc. (USA)	Non	Oui (>50%)	T _{prod} =115-135 °C T _{comp} =105-115 °C	B	Energie: 14-26%	114'760 US\$ (prix du système 2008)	Sections tests dès 2007. Env. 2 mio t. fin 2008 aux USA (130 postes)	Embouts Double Barrel à installer sur système d'injection du bitume existant	[17], [5], [14], [19]
Sasobit ¹³	Sasol Wax (Af. Sud)	Non ¹⁴	Oui (tests effectués avec 90-100%)	T _{prod} =115-130 °C T _{comp} =80 °C	C	Energie: 30% Environnement: 20%	5.20 CHF/kg de pastilles ¹⁵ - 2'000 €/tonne	>10 mio t. entre 1997 et 2007 (surtout Allemagne, Scandinavie, Asie, Afrique, Am. du Nord)	Mineures (rampe) voire nulle (Sasobit ajoutée au liant)	[7], [20], [21], [17], [5], [4], [22]
Asphaltan B [®]	Romonta (Allemagne)	Oui (2.5% masse liant – Allemagne)	n.a.	T _{prod} =130-170 °C	C	n.a.	n.a.	n.a.	Mineures voire nulles	[13], [17]
Licomont BS 100 ¹⁶ Sübit [®]	Clariant (Suisse)	Non (sauf parfois SMA) ¹⁷	Oui	T _{prod} =130-170 °C T _{comp} =80-100 °C	C	Pas d'informations publiées	2.50 €/kg ¹⁸	>322'500 m ² depuis 1994 (All, CH, It, Scandinavie, Europe de l'Est,...)	Mineures voire nulles	[23],[17], [24]
Végécol ¹⁹	Colas (France)	n.a.	n.a.	T _{prod} =110 °C T _{comp} =95 °C	C	Energie: 20% NO _x : 8% SO _x : 10%	Env. 4-5 fois plus cher que liant traditionnel	Premiers essais dès 2003. Suisse: 1'147 t. (2006-2008)	Mineures voire nulles	[11], [25]
Compogreen [®]	Screg (France)	n.a.	Non ²⁰	T _{prod} =120 °C T _{comp} =80-110 °C	C	n.a.	n.a.	2008 : >70'000 t. Enrobés tièdes SCREG	Mineures voire nulles	[26]

¹² Informations complémentaires fournies par M. Malcolm Swanson, Astec Industrie Inc. selon email du 06.01.2009 et 08.01.09.

¹³ Informations complémentaires fournies par M. Matthias Nölting, Sasol Wax GmbH, selon email du 07.01.2009.

¹⁴ Selon certaines publications, Additif utilisé à environ 2.5% masse liant (Allemagne) mais ceci n'est pas indispensable (selon email du 07.01.2009 de M. Matthias Nölting, Sasol Wax GmbH).

¹⁵ Liste de prix 2008, Febrag AG, Watt (ZH) - Pastilles livrables en sacs de 30 kg. Sasol Wax annonce un prix indicatif de 2000 €/tonne.

¹⁶ Informations complémentaires fournies par M. Günther Heiling, Clariant Produkte GmbH selon email du 07.01.2009.

¹⁷ Informations complémentaires fournies par M. Günther Heiling, Clariant Produkte GmbH selon email du 10.01.2009.

¹⁸ Information fournie par M. Roger Wodey, Omya Schweiz AG selon email du 07.01.2009.

¹⁹ Information complémentaire fournie par M. Claude Morzier, Directeur Commercial Colas Suisse, selon email du 30.03.2009.

²⁰ Information complémentaire fournie par M. Thomas Verotte, direction technique et développement SCREG, selon email du 08.12.2008.

Procédé	Compagnie	Additifs	Recyclage	Températures	Procédé	Gains potentiels	Coûts	Expérience	Modif. centrale	Références
Evotherm ET®	MeadWestva-co Asphalt Innovations (USA)	Oui	Oui (jusqu'à 20%)	T _{prod} =100-130 °C T _{prod} =60-115 °C	C	CO ₂ ,SO ₂ : 40-60% NO _x : 60% GES: 60% Energie: 55%	7-10% plus cher que liant traditionnel, coûts modif centrale 1'000 – 5'000 US\$	En test depuis 2005, > 100'000 t. dans le monde entier (USA, Ca, Fr, Sp, AfS, Mex, Chi)	Mineures (Cuve/camion pour Evotherm ET/point d'injection) voire nulles	[27], [28], [13], [17], [5], [4], [14], [18]
Revix®	Mathy techn. & Inc and Paragon technical services (USA)	Non	Oui (jusqu'à 30%)	T _{prod} =85-115 °C	C	n.a.	n.a.	En test dès 2007, >5'600 t. aux U.S.A.	Mineures voire nulles	[13], [5]
Ecoflex®	SCREG (France)	Additif avec liant de base	Oui (10-20%)	T _{prod} =120-130 °C T _{comp} =110-120 °C	C	Energie: 21'000 MJ/km GES: 2380 kg eq. CO ₂	n.a.	2008 : >70'000 t. Enrobés tièdes SCREG	Mineures voire nulles	[26]
Ecolastic®	SCREG (France)	Liant modifié	Oui (10-20%)	T _{prod} =120-130 °C T _{comp} =110-120 °C	C	Energie: 21'000 MJ/km GES: 2380 kg eq. CO ₂	n.a.	2008 : >70'000 t. Enrobés tièdes SCREG	Mineures voire nulles	[26]
Rediset WMX®²¹	AKZO Nobel (Pays-Bas)	Pas nécessaire en général	Oui (tests à 15%)	T _{prod} =120 °C	C	Fuel: 20%	n.a.	4 sections tests aux Etats-Unis (2008): 2500 t. Sections test en Europe (Sw, No)	Mineures voire nulles	[29], [5]
Cecabase RT®	Ceca (groupe Arkema) (France)	Non (en général)	Oui	T _{prod} =120 °C T _{comp} =90-100 °C	C	Energie: 20-50% CO ₂ ,CO,NO: 20-50% Poussières: 90%	n.a.	Commercialisé dès 2006 2006: 80'000 t.	Mineures voire nulles	[30], [31]

²¹ Informations complémentaires fournies par M. Sundaram Logaraj, Akzo Nobel Surface Chemistry (Chicago) selon email du 08.01.2009.

Procédé	Compagnie	Additifs	Recyclage	Températures	Procédé	Gains potentiels	Coûts	Expérience	Modif. centrale	Références
Mexphalte RM ²²	Shell (Pays-Bas)	Non	Oui (section test 20%)	T _{prod} =170-180 °C T _{comp} =150-170 °C	C	n.a.	n.a.	Testé dès 2007: 100'000 m ²	Mineures voire nulles	[32]
Classe-S [®]	Shell (Pays-Bas)	Additif	Oui	T _{prod} =135 °C T _{comp} =110 °C	C	Energie: 7.5% CO ₂ : 7.5%	Enrobé final 10 à 30% moins cher	env. 10'000 t/an ²³	Mineures voire nulles	[32]
WAM-Foam ^{24 25}	Shell, KoLo Veidekke (Norvège) BP (Etats-Unis)	Dope (pas indispensable selon les granulats utilisés)	Oui (15-25%)	T _{prod} =100-120 °C T _{comp} =80-100 °C	D	Energie: 35% CO ₂ : 30-40% COV : 50-60%	Modification centrale : 60'000 – 85'000 US\$ ²⁶	1999-2007: 60'000 t. KoLo Veidekke 2000-2007: 100'000 t. en Europe 2008 : 15'000 t. En Australie pour Shell	ligne pour bitume dur, système pour mousse, air comprimé,...	[7], [33], [34], [35], [36], [37], [17], [4], [14]
ENROBES SEMI-TIEDES										
EBE (LEA) ²⁷	Fairco Eiffage T.P. (LEA-Co) (France)	Additif: Dope /agent moussant/ fluxant végétal résine végétale (0.2-0.5% poids du liant)	Oui (jusqu'à 50% selon le poste)	T _{prod} =90 °C T _{comp} =60-90 °C	B	GES,NO _x :50% COV: 80% Energie: 50%	Enrobé : Comparable aux enrobés à chaud - Modifications centrale : 75'000 – 100'000 US\$	200'000 t. en Europe (Etat 2007) 80'000 t. aux USA (Etat 2007)	Montage rampes, pompe volumétrique, contrôle humidité	[7], [38], [11], [39], [17], [5], [14]
EBT (LTA) ²⁸	Appia Eiffage T. P. (France)	Additif: Dope /agent moussant/ fluxant végétal résine végétale	Oui (jusqu'à 50% selon le poste)	T _{prod} =90 °C T _{comp} =70-90 °C	B	Energie: 35-50% CO ₂ :35-50%	Enrobé : Comparable aux enrobés à chaud	Opérationnel depuis 2005. 100'000 t. fin 2007	Montage rampe +év. Débitmètre	[7], [11], [40], [39]

²² Information fournie par M. Frank Beer, Shell Bitumen, selon email du 05.03.2009.

²³ Information fournie par M. Frank Beer, Shell Bitumen, selon email du 05.03.2009.

²⁴ Informations complémentaires fournies par M. Eivind Olav Andersen, Technical Manager KoLo Veidekke a.s, selon email du 07.01.2009.

²⁵ Informations complémentaires fournies par M. Frank Beer, Shell Bitumen, selon email du 13.01.2009.

²⁶ Les frais de modification s'évaluent entre 30'000 – 70'000\$ selon [18].

²⁷ Informations complémentaires fournies par M. François Olard, Eiffage Travaux Publics, selon email du 06.01.2009.

²⁸ Informations complémentaires fournies par M. François Olard, Eiffage Travaux Publics, selon email du 06.01.2009.

Procédé	Compagnie	Additifs	Recyclage	Températures	Procédé	Gains potentiels	Coûts	Expérience	Modif. centrale	Références
LT Asphalt®	Nynas (Pays-Bas)	Oui (0.5-1% filler hygros.)	n.a.	T _{prod} =90-95 °C T _{comp} =60 °C	B	Energie: 50%	n.a.	En développement dès 2004; Pays-Bas surtout	Modifications processus séchage, enrobage, ligne injection bitume	[7], [41]
LEAB®	BAM (Pays-Bas)	Additif (0.1% masse liant)	Oui	T _{prod} =90°C	B	Energie: 30-40%	n.a.	Quelques expériences commerciales (7 en 2007)	Système moussage, centrale disc. uniquement	[17]

Figure 4-2 : Récapitulatif des principaux types d'enrobés tièdes et semi-tièdes

4.4 Considérations générales sur les enrobés tièdes

Certaines considérations générales peuvent être effectuées concernant les différentes technologies et principaux procédés tièdes, semi-tièdes explicités auparavant. Ces considérations développent certains éléments clés jouant notamment un rôle lors de la sélection des procédés.

4.4.1 Types d'enrobés

Les différents procédés, leurs gains environnementaux et énergétiques, les modifications en centrale ainsi que l'expérience acquise ont été décrits. Ces enrobés peuvent cependant différer selon les couches de chaussée auxquelles ils sont destinés. De manière générale, et selon les différentes expériences recueillies, les enrobés tièdes peuvent être utilisés pour toutes les couches de chaussée. Ils seront cependant de préférence destinés aux couches de roulement ainsi qu'aux couches de base, comme par exemple le WAM Foam, ce qui exige de hautes performances mécaniques afin de résister aux différentes sollicitations. Ceci les distingue des procédés froids ou utilisant des bitumes fluxés.

De plus, la majorité des procédés tièdes et semi-tièdes présentés ici permettent de produire les différents types de béton bitumineux: traditionnels, enrobés drainants, macro-rugueux, enrobé à gros granulats (SMA-Stone Mastic Asphalt), etc. La majorité des formulations utilisées et testées à ce jour étant des enrobés traditionnels, le paquet de recherches considérera le même type d'enrobés. L'analyse d'enrobés spécifiques nécessiterait une recherche particulière. Par exemple, dans le cas de SMA, la réduction de température ne peut se faire que par le recours d'additifs au bitume ou alors bitume modifié (cires diverses, acides gras...)[33].

Nous pouvons encore relever qu'avec certains procédés (Licomont par exemple), des expériences concluantes ont été effectuées sur des surfaces très sollicitées telles que arrêts de bus, aires de stockage pour containers, chaussées d'aéroports,... Ceci montre également la palette de domaines d'applications que peuvent proposer les enrobés tièdes.

4.4.2 Centrales d'enrobage

Les modifications en centrale sont un des éléments clés pour le producteur et le chercheur et ce paramètre est donc considéré dans le cadre du projet initial, tout comme pour le paquet de recherches. Les incidences d'une modification de la centrale seront répercutées sur la cadence de production ainsi que le bilan économique. Certains procédés sont développés afin de s'adapter à tout type de centrale et de brûleur. Ils ont en commun une température réduite, ce qui nécessite une calibration du brûleur. Ensuite, plus ou moins de modifications seront nécessaires selon les procédés et la centrale existante. Ces modifications peuvent être diverses voire nulles ; allant du simple ajout de poudre dans le malaxeur à la modification complète de la centrale. De manière globale, nous pouvons établir que les modifications nécessaires à la production des filières tièdes peuvent concerner :

- Le mode d'introduction/dosage de l'additif,
- le stockage de l'additif
- le mode d'introduction du sable,
- le contrôle de l'humidité,
- la fabrication de la mousse,
- l'enrobage séquentiel.

4.4.3 Remise en service

Le temps nécessaire avant remise sous circulation des chaussées est un élément clef qui sera analysé lors du paquet de recherches. De manière globale, les technologies tièdes permettent un compactage à une température plus faibles que les enrobés à chaud et donc une remise en service plus rapide. Ceci est un avantage considérable vis-à-vis des enrobés à chaud, par exemple dans le cas de chaussées d'aéroports ou routes à fort trafic, si un temps de cure n'est pas nécessaire.

Cette problématique nécessite cependant d'être approfondie, et ceci particulièrement dans le cas des enrobés tièdes avec eau ou maîtrise de l'humidité. En effet, il semble que le temps de cure ainsi que la montée en performance ne soient pas systématiquement avantageux (avec bitume mousse par exemple), et c'est pourquoi de plus amples recherches seront effectuées.

4.5 Avantages et potentiel des enrobés tièdes

4.5.1 Avantages liés aux enrobés tièdes

De manière générale, bon nombre de publications s'accordent à présenter les avantages suivants communs aux technologies tièdes :

- Diminution de la température de production de 30 à 70 °C [33].
- Gains énergétiques de l'ordre de 10 à 30%, parfois jusqu'à 50% pour les procédés semi-tièdes. Ceci est bien évidemment intimement lié au type de centrale, au brûleur (gaz, fioul) et à sa calibration.
- Réduction des émissions nocives (visibles et non visibles) lors de la fabrication et de la mise en œuvre. Des mesures en centrales permettent typiquement d'obtenir une réduction de l'ordre de 30 à 40% pour le CO₂ et SO₂, 50% pour les COV, 10 à 30% pour le CO. Les gains sont donc significatifs.
- Diminution de la viscosité dans une certaine plage de température, ce qui va permettre notamment d'améliorer la maniabilité et faciliter le compactage.
- Vieillesse plus faible du liant.
- Temps de stockage plus important (en trémies calorifugées par exemple), distance de transport plus élevée tout en conservant une bonne maniabilité. Par exemple, une pose en Australie a été effectuée, avec de la cire Sasobit, après transport en camion isolé pendant 9 heures. Des expériences avec stockage de l'enrobé pendant une nuit ou 48 heures ont également été répertoriées [5].
- Pose à des températures plus basses que pour des enrobés à chaud traditionnels. Par exemple, des poses d'enrobés (couche de base et de surface à l'Aspha-min avec 45% RAP²⁹) ont été effectuées en Allemagne à des températures comprises entre -3 °C et 4 °C, ceci avec pour résultat une meilleure densité comparativement à un enrobé à chaud, obtenue pour une énergie de compactage plus faible [17]. Les procédés tièdes permettent notamment de rallonger la saison de pose.

D'autres éléments, parfois discutables ou non généralisables peuvent être mentionnés. Ils ne constituent pas nécessairement des avantages à proprement parler mais démontrent de la variété de l'offre qui peut être atteinte avec les filières tièdes :

- Possibilité d'adapter la formulation à différents types d'enrobés et applications possibles aux diverses couches de la chaussée (voir chapitre 4.4).

²⁹ RAP : Recycled Asphalt Pavement

- Adaptabilité aux différents types de postes d'enrobage continu / discontinu.
- Diminution de la gêne pour les ouvriers et des risques (risque de brûlure, sensation de chaleur, diminution/disparition des fumées, diminution/disparition des odeurs).
- Energie de compactage plus faible que pour les procédés à chaud. Ceci n'est pas unanimement reconnu pour tous les procédés, mais il peut s'avérer un élément important permettant également de diminuer la facture énergétique et gagner du temps [17]. D'autres recherches font également mention d'une énergie de compactage supérieure pour atteindre une même teneur en vide que dans les enrobés chauds. Ce thème sera développé lors du paquet de recherches.
- Possibilité d'insérer un taux plus important de RAP qu'avec des enrobés à chaud. Ceci peut être expliqué par différents facteurs : viscosité plus faible, vieillissement moins important du liant permettant de prolonger la durée de service sans soucis de fissuration. Certaines expériences montrant une amélioration des propriétés mécaniques par l'ajout de fraisat ont également été répertoriées.
- Mûrissement plus rapide, possibilité de remise sous circulation plus rapide (voir chapitre 4.4).
- Préservation des qualités mécaniques, vieillissement plus faible du liant.
- Meilleur potentiel de recyclabilité qu'un enrobé à chaud.
- Réduction des salissures sur le matériel.

4.5.2 Considérations énergétiques

Au vu des avantages mentionnés, un des premiers éléments concerne les gains énergétiques possibles. Ces aspects constituent de plus un des axes prioritaires identifiés par les différentes associations et gouvernements. L'ordre de grandeur des gains est variable et dépend notamment des températures de fabrication. Harder et al. [42] ont effectué des mesures ainsi que des calculs énergétiques pour différents types d'enrobés tièdes et semi-tièdes permettant notamment d'effectuer une validation des aspects environnementaux. Associés à des simulations numériques, les calculs thermodynamiques ont permis de mieux comprendre et distinguer les différentes phases d'un enrobé tiède du point de vue énergétique. Le développement de cet instrument simple permettant d'évaluer le nombre de Joules économisés est une aide à la décision et justifie l'ordre de grandeur des économies annoncées et mesurées in situ. Nous pouvons donc raisonnablement attendre, selon les technologies appliquées, des économies allant de 20% pour les enrobés tièdes à 50% dans le cas d'enrobés semi-tièdes.

4.5.3 Considérations économiques

L'aspect bien souvent déterminant en vue d'une implémentation aisée d'une technologie réside en son potentiel d'économie. Le critère financier est en effet prépondérant dans la majorité des processus de décision. Les aspects économiques liés aux technologies tièdes ont notamment été discutés par Kristjansdottir et al. [18]. De manière générale et sans considérer l'ensemble du cycle de vie, les coûts associés vont concerner les modifications éventuelles de la centrale, l'achat du produit ainsi que le coût de l'énergie en centrale (fioul ou gaz, électricité). Certains coûts indicatifs de produits sont indiqués dans la Figure 4-2. Il est à relever que les technologies nécessitant pas ou peu de modification de la centrale (par exemple Evotherm, Sasobit ou Aspha-min) auront par la suite un coût de production plus élevé en raison des produits spéciaux nécessaires. A l'opposé, les technologies ayant un coût d'installation plus important (WAM Foam, Double Green Barrel,...) auront un coût de produit plus faible à la production. Les bénéfices principaux se situent quant à eux au niveau des gains environnementaux, énergétiques et de la réduction de viscosité et ses avantages associés (distance de transport augmentée,

compactage plus facile, meilleure maniabilité, diminution du matériel de compactage nécessaire). Kristjansdottir et al. effectuent un exemple de calcul dans lequel il est montré que dans le cas de gains énergétiques de l'ordre de 50% et avec un coût élevé de l'énergie, les gains peuvent compenser les coûts additionnels.

De manière générale les enrobés tièdes vont s'avérer légèrement plus chers à la production qu'un enrobé à chaud. Les économies sur le fioul ou gaz naturel (20 à 30 cents au maximum) ne permettant pas de compenser les dépenses supplémentaires liées à l'ajout d'additifs. Cependant pour certaines technologies comme par exemple les EBE et EBT, les fabricants annoncent un prix comparable à celui d'un enrobé à chaud au bilan global³⁰. Le gain énergétique et environnemental lié à la température plus faible permet alors de compenser les dépenses dans la modification de la centrale ainsi que le prix des additifs.

Cependant, avec la multiplicité des procédés devant engendrer la baisse de leurs coûts associés, cet équilibre pourrait dans le futur s'avérer favorable aux technologies tièdes. Ceci est également fortement lié à d'autres paramètres tels que le prix de l'énergie. L'apport des matériaux de recyclage de par leur gain environnemental et économique ainsi que le recours à des technologies semi-tièdes devraient permettre de déplacer davantage cet équilibre en faveur des technologies tièdes.

Dans le cas de la Suisse, l'utilisation d'enrobés tièdes en lieu et place d'enrobés à chaud permet également de diminuer les taxes CO₂, voire de s'en affranchir. A titre d'exemple, un calcul indiquant la taxe (montants 2009 et 2010 selon "l'Ordonnance sur la taxe sur le CO₂") par tonne d'enrobé produite en fonction de ses émissions associées [40] est présenté dans la Figure 4-3. Il est à relever que le montant théorique maximal de la taxe est fixé à 210 CHF/t. CO₂ selon la législation, ce qui correspondrait alors à une taxe de 4.7 CHF/t. d'enrobé à chaud comparativement à 0.54 CHF/t. en 2009. En considérant la production Suisse totale 2007 d'enrobé à chaud (5.2 mio t. [43]), le montant de cette taxe représente alors la somme d'environ 2.8 mio CHF. Pour une même production en enrobé tiède ou semi-tiède, la taxe versée serait alors de respectivement 2.1 mio CHF et 0.9 mio CHF. Ainsi, le passage hypothétique à une production uniquement tiède respectivement semi-tiède permettrait de diminuer la taxe de respectivement 24% et 56%. Ces calculs ne sont certes qu'indicatifs, mais ils dénotent les économies considérables pouvant être envisagées.

	Quantité [t.]	Emissions: kg CO ₂ /t.	Gains: CO ₂	Taxe 2009 24 CHF/t. CO ₂	Taxe 2010 36 CHF/t. CO ₂
Enrobé chaud	1	22.5	-	CHF 0.54	CHF 0.81
Enrobé tiède	1	17	24%	CHF 0.41	CHF 0.61
Enrobé semi-tiède	1	7.5	67%	CHF 0.18	CHF 0.27

Figure 4-3 : Taxe CO₂ pour la production d'une tonne d'enrobé selon [44]

Il est bon de rappeler que selon la loi Suisse [44] une « *Exemption des entreprises qui ont pris un engagement formel selon l'art. 9 de la loi* » est envisageable sous certaines conditions. Une exonération est ainsi envisageable.

4.5.4 Potentiel des technologies tièdes : Bilan

Les avantages et bénéfices potentiels liés aux enrobés tièdes sont nombreux. Cependant le recours à ces technologies ne peut certainement pas être motivé uniquement par des réductions d'émissions étant donné les progrès significatifs effectués au niveau des centrales d'enrobage à chaud également. De

³⁰ Selon email du 06.01.2009 de M. François Olard, Eiffage Travaux Publics

même, les aspects énergétiques ne peuvent à eux seuls motiver le changement étant donné que ces gains permettront au mieux de compenser les frais engendrés sur l'installation, ceci même dans le cas de pays où l'énergie est coûteuse. Mais le cumul des différents aspects avec également la diminution sensible de viscosité et ses avantages associés ou la possibilité d'effectuer des poses d'enrobé dans des conditions de températures froides sont d'autres éléments pouvant faire la décision. La réduction de viscosité peut représenter un gain financier significatif à terme [14, 18] ceci en diminuant le risque d'une mauvaise compaction et reconstruction précoce suite à une pose en conditions difficiles. Il s'agit donc d'un investissement à considérer sur le long terme également.

Les avantages sont donc multiples, mais il existe également un risque associé à ces technologies. Le recul est relativement faible avec ces procédés : 5 ans pour la plupart, les plus anciennes sections (en Europe) ayant à peine plus de 10 ans. Ceci limite donc l'expérience sur les performances à long terme même si les essais à ce jour sont positifs.

Le potentiel est donc manifeste et détaillé au travers de différentes recherches. De plus, ceci démontre si besoin est que les enrobés tièdes ne constituent pas une « mode passagère » mais réellement une réponse à un important besoin dans le domaine des matériaux de construction de chaussées routières. Il n'est certes pas envisageable actuellement de remplacer toute la production d'enrobés à chaud par des enrobés tièdes (7% des enrobés suisses sont des enrobés tièdes selon [43]). Mais considérant le potentiel et les avantages, le développement de recherches permettant d'avoir un meilleur recul serait la première étape afin d'en augmenter l'utilisation.

4.6 Désavantages et risques potentiels pour certains procédés tièdes

Des désavantages et risques potentiels pour certains procédés sont également à relever. Ces éléments dépendent des types de procédés appliqués, ne sont pas totalement connus à ce jour et souvent inexistant dans la littérature et les fiches produits des entreprises. Ils seront par conséquent évalués au cours du projet. Nous pouvons mentionner ici :

- Coûts de fabrication plus élevés,
- Modifications des équipements et engins,
- Sensibilité de la pose aux conditions météorologiques,
- Modification éventuelle de l'énergie de compactage,
- Durée de cure,
- Performances et durée de vie,
- Potentiel de recyclabilité (produits chimiques),
- Hygiène au travail.

4.7 Sélection de technologies pour le paquet de recherches

4.7.1 Considérations générales

Considérant les multiples aspects qui différencient les enrobés à froid des enrobés tièdes, il a été choisi dans la suite de cette recherche de ne considérer que la filière tiède, actuellement en plein essor. Ce choix est également illustré par les données de répartition des différents types d'enrobés bitumineux en Suisse et en Europe. En effet, en 2007 5.2 mio. de tonnes d'enrobé à chaud, 460'000 t. d'enrobé à froid et 600'000 t. d'enrobé tiède³¹ ont été produits en Suisse [43] . Ceci montre l'intérêt grandissant pour les

³¹ La définition de l'EAPA fait référence à un enrobé dont la température de production se situe entre 100 et 150 °C pour les enrobés tièdes.

enrobés tièdes dont le marché est très large puisqu'ils peuvent se substituer aux enrobés à chaud (90% environ de la production des pays Européens) au niveau des domaines d'utilisation.

Les enrobés tièdes et froids sont de plus diamétralement différents sous de multiples aspects tels que :

- Domaine d'application (type de routes et sollicitations),
- Couche d'application,
- Période d'application³²,
- Formulation, processus de fabrication, de pose et de compactage,
- Comportement mécanique et mûrissement,
- Expérience acquise sur les procédés,
- ...

Le domaine ainsi que la couche d'application sont des éléments primordiaux de la procédure de sélection. De manière générale les enrobés à froid ne sont pas applicables à toutes les couches de la superstructure [45]. Ils sont donc dédiés à des créneaux bien spécifiques tels que le petit entretien, pour lequel les enrobés sont stockés et utilisés à froid, ou les couches de roulement minces. Le domaine traditionnel d'utilisation est donc l'entretien des chaussées de trafic faible à moyen, en utilisation monocouche de 3-4 cm. Les performances mécaniques sont également plus faibles en ce qui concerne les enrobés froids, ce qui restreint leurs applications à des chaussées peu sollicitées. C'est principalement pour ces raisons que l'enrobé à froid ne peut concurrencer les enrobés à chaud classiques. Par contre, un enrobé tiède peut être utilisé dans toutes les couches de la chaussée, ceci même s'il se destine principalement à des couches de base ou de roulement beaucoup plus exigeantes du point de vue de la formulation et des performances mécaniques.

Nous rappelons également que dans le cadre du développement de ce paquet de recherches, l'ajout de matériaux recyclés ne sera pas testé de manière systématique. Ceci permet ainsi de limiter l'ampleur de la recherche et de maîtriser le nombre de paramètres variables. De plus, l'utilisation de matériaux recyclés fait l'objet d'un projet spécifique de la part de l'Office Fédéral des Routes [1]. Cependant, au regard de l'importance de l'ajout de matériaux recyclés, de son potentiel écologique ainsi que des effets sur les performances mécaniques pouvant même s'avérer améliorées [46], des considérations relatives à l'ajout de matériaux recyclés seront effectuées dans certaines recherches spécifiques.

4.7.2 Analyse des procédés et sélection

Différents procédés à tester lors du paquet de recherches doivent être maintenant sélectionnés. Afin d'effectuer des comparaisons entre les différentes recherches spécifiques, il est proposé de diviser les procédés tièdes sélectionnés selon deux catégories :

- I. Catégorie « **fil rouge** » : Cette catégorie comprend des procédés qui seront testés dans l'ensemble des recherches spécifiques. Le fil rouge permet d'avoir une base commune de comparaison entre les recherches spécifiques. Les procédés sélectionnés pour cette catégorie devront être représentatifs des différentes familles de technologies existantes.
- II. Catégorie « **procédés additionnels** » : Cette catégorie correspond à des procédés qui ne seront testés que dans le cadre de certaines recherches spécifiques. En effet, certaines recherches nécessitent de mettre un accent particulier sur les différents types de procédés et c'est pourquoi, en plus du fil rouge, les procédés additionnels y seront testés.

³² Le climat de la Suisse n'est pas très favorable pour les émulsions, par exemple en hiver et au printemps. Ainsi la période d'application est considérablement réduite.

En plus de ces procédés tièdes, un enrobé à chaud traditionnel sera testé et constituera à toutes les étapes le **matériau de référence**.

La procédure de sélection des procédés est effectuée selon une analyse multicritères que nous explicitons ici. La base d'informations pour cette analyse se trouve dans la Figure 4-2. Dans un premier temps, les critères prioritaires suivants ont été retenus afin d'évaluer les procédés :

- Possibilité de fabriquer l'enrobé en centrale, en Suisse, sans aménagements spécifiques ou investissements conséquents. Dans le cas d'une technologie nécessitant un aménagement spécifique (type Double Green Barrel), le critère note la présence ou non d'une telle centrale en Suisse en vue de fabrication.
- Possibilité de fabriquer l'enrobé tiède en laboratoire sans recours à des équipements spéciaux.
- Références européennes permettant de consulter nos voisins européens et si nécessaire, de planifier une fabrication en centrale ou des prélèvements dans un pays adjacent.
- Références suisses. Indique si des applications en Suisse sont connues à ce jour.
- Possibilité d'incorporer ou non des matériaux recyclés. Comme expliqué, l'ajout de matériaux recyclés ne sera pas détaillé dans le cadre de cette recherche, mais il constitue néanmoins un critère important caractérisant le potentiel d'une technologie.
- La disponibilité indique si un contact fabricant ou vendant le procédé est connu en Suisse, et s'il est envisageable de fabriquer ce procédé. Un produit « non-disponible » ne sera par conséquent pas envisageable dans ce paquet de recherches.

Les différents critères sont difficilement quantifiables sur une échelle numérique. Ils font en effet référence à l'existence ou non d'un élément. Ainsi, il a été décidé de noter les éléments selon leur présence, ceci sans pondération spécifique.

Par ailleurs, les éléments suivants n'ont pas été retenus comme critère de sélection :

- Prix : Peu de données ont été obtenues sur ce sujet sensible. De plus, le prix ne doit pas être un critère prioritaire de choix dans la procédure de sélection pour une recherche, d'autres éléments tels que l'expérience, la disponibilité,... priment.
- Aspects énergétiques et écologiques : Les différentes données relatives aux émissions et consommation énergétique indiquent une fourchette de gains possibles, mais ces derniers sont difficilement comparables et classifiables entre eux. Cependant, il semble primordial de sélectionner au moins une filière semi-tiède pour laquelle les gains potentiels sont beaucoup plus importants. C'est pourquoi, la température est également indiquée dans la Figure 4-4

La Figure 4-4 indique les différents procédés, répartis selon la technologie appliquée, ainsi que les différents critères et résultats obtenus. Dans ce tableau, « n.a. » signifie que l'information n'a pu être obtenue pour l'instant, alors que les signes vert et rouge indiquent respectivement un accord ou désaccord avec le critère concerné. Les technologies semi-tièdes ont également été écrites en orange.

Nom procédé	Possesseur du brevet (pays)	Température de production (WAM - HWAM)	Références européennes	Références suisses	Disponibilité	Recyclage	Fabrication en centrale	Fabrication en laboratoire	Contact
A) MODIFICATION DE LA SEQUENCE D'ENROBAGE									
3E-LT	Colas (France)	125 °C	☑	☑	☑	n.a.	☑	☒	☑
3E-DM	Colas (France)	125 °C	☑	☑	☑	n.a.	☑	☒	☑
3E-DB	Colas (France)	125 °C	☑	☑	☑	n.a.	☑	☑	☑
B) INTRODUCTION D'EAU									
Aspha-min	Eurovia (Allemagne)	< 150 °C	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☒
Advera	PQ Corporation (USA)	120°C (compactage)	☒	☒	☒	☑	☑	☑	☑
Double Barrel Green	Astec Industrie Inc. (USA)	115 ... 135 °C	☒	☒	☒	☑	☒	☒	☑
EBE (LEA)	Fairco, Eiffage T.P. (France)	90°C	☑	☒	☑	☑	☒	☑	☑
EBT (LTA)	Appia, Eiffage T.P. (France)	90°C	☑	☒	☑	☑	☒	☑	☑
LT Asphalt	Nynas Bitumen (Pays-Bas)	90 ... 95 °C	☑	n.a.	☑	n.a.	☑	☒	☑
LEAB	BAM (Pays-Bas)	90 °C	☑	n.a.	n.a.	☑	☒	☒	☒
C) CHIMIE									
Asphaltan B	Romonta (Allemagne)	130 ... 170 °C	☑	n.a.	n.a.	n.a.	☑	☑	☒
Licomont BS 100	Clariant (Suisse)	130 ... 170 °C	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑
Sasobit	Sasol Wax (Af. du Sud)	115 ... 130 °C	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑
Végécol	Colas (France)	110 °C	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑
Compogreen	Screg (France)	120 °C	☑	☑	☑	☒	☑	☑	☑
Evotherm ET	MeadWestvaco Asphalt Innovations (USA)	100 ... 130 °C	☑	n.a.	n.a.	☑	☑	☑	☒
Revix	Mathy techn. & Inc and Paragon technical services (USA)	85 ... 115 °C	n.a.	n.a.	n.a.	☑	☑	☑	☒
Rediset WMX	Akzo Nobel (Pays-Bas)	120 °C	☑	☒	n.a.	☑	☑	☑	☑
Cecabase RT	Ceca (Arkema group) (France)	120 °C	☑	n.a.	☑	☑	☑	☑	☑
Ecoflex	Screg (France)	120 ... 130 °C	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑
Ecolastic	Screg (France)	120 ... 130 °C	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑
Mexphalte RM	Shell Bitumen (Pays-Bas)	170 ... 180 °C	☑	☑	☑	n.a.	☑	☑	☑
Classe-S	Shell Bitumen (Pays-Bas)	135 °C	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑
D) COMBINAISON DE PLUSIEURS PRINCIPES									
WAM Foam	Shell Bitumen (Pays-Bas)	100-120 °C	☑	☑	☑	☑	☑	☒	☑

Figure 4-4 : Evaluation des procédés pour la sélection du paquet de recherches

Concernant les procédés ayant recours à une modification de la séquence d'enrobage, il est nécessaire de rappeler que seul le procédé 3E-DB fait appel exclusivement à ce principe. Les deux autres procédés 3E-DM et 3E-LT font appel à une combinaison de principes, mais principalement un enrobage séquentiel.

Pour chaque procédé, différentes variantes existent afin d'obtenir le matériau fini pour la recherche:

- Fabrication en centrale ;
- Fabrication en laboratoire ;
- Recueil d'échantillons lors d'une pose.

Afin d'avoir des procédés qui soient identiques dans leur formulation et conditions de fabrication, il a été choisi d'effectuer des fabrications en centrale. Ceci sera fait pour les procédés du « fil rouge », pour lesquels une même centrale fabriquera chacun des produits. L'enrobé sera par la suite réparti entre les partenaires du projet. Les procédés du fil rouge qui le permettent seront également fabriqués en laboratoire dans le cadre de certaines recherches spécifiques (voir plus loin).

Pour les procédés additionnels, des fabrications seront faites en laboratoire exclusivement ceci afin de limiter les frais inhérents à la fabrication en centrale. De plus, ces procédés additionnels ne seront utilisés que pour certaines recherches spécifiques ne nécessitant pas de fabrications en centrale (détails dans Chapitre 8).

Finalement, des prélèvements d'échantillons seront effectués lors de la fabrication d'une planche d'essai. Le matériau sélectionné pour la planche d'essai sera décidé lors de la première phase du paquet de recherches. De plus amples détails concernant les différentes étapes peuvent être trouvés au chapitre 8 relatif au descriptif du paquet de recherches.

Ainsi, dans la procédure de sélection des procédés du fil rouge, la possibilité d'une fabrication en centrale est prioritaire. La disponibilité ainsi que l'expérience en Suisse sont également des critères déterminants et discriminatoires. Par conséquent les procédés « Double Green Barrel » et « LEAB » ne peuvent être pour l'instant planifiés dans le cadre de cette recherche. Il est finalement proposé pour le fil rouge de tester un procédé de base par principe de la manière suivante :

PROPOSITION DE SELECTION DES PROCEDES DU FIL ROUGE					
N°	Code recherche	Principe	Procédé sélectionné	Alternative 1	Alternative 2
A1	FR-SEQ	Modification séquence d'enrobage	3E-DB	3E-LT	3E-DM
B1	FR-WATER	Introduction d'eau (enrobé tiède)	Aspha-min	LT Asphalt	
C1	FR-WAX	Chimie (cires ³³)	Sasobit	Licomont BS	Asphaltan B
D1	FR-COMB	Combinaison de plusieurs principes	WAM Foam		

Figure 4-5: Procédés fil rouge sélectionnés

Nous pouvons relever que tous les procédés à l'exception du WAM-Foam peuvent être fabriqués en laboratoire traditionnel. Pour les procédés ayant recours à la chimie, il est choisi de se focaliser ici sur les cires, très répandues et dont le potentiel d'utilisation est important. Les autres procédés relatifs à la chimie (liant vert, package chimique, ...) seront testés dans le cadre des procédés additionnels. Les procédés relatifs à la chimie présentent l'avantage de pouvoir être aisément fabriqués en laboratoire, ce qui sera effectué dans le cadre du paquet de recherches. Un procédé semi-tiède, pouvant être fabriqué en laboratoire voire en centrale est également à tester, ceci afin d'évaluer les différences avec les procédés tièdes. Il est de plus crucial de se situer, avec une technologie au moins, en deçà de 100 °C comme température de production. Ainsi, les procédés additionnels ci-dessous sont proposés. Le choix C4 constitue une alternative aux autres procédés basés sur la chimie (C2 et C3). Trois procédés additionnels seront testés dans le cadre du paquet de recherches.

PROPOSITION DE SELECTION DES PROCEDES ADDITIONNELS						
N°	Code recherche	Principe	Procédé sélectionné	Alternative 1	Alternative 2	Alternative 3
B2	PA-HWAM	Introduction d'eau (enrobé semi-tiède)	EBE	EBT		
C2	PA-GREEN	Chimie (liant vert)	Végécol	Compogreen		
C3	PA-PACK	Chimie (package chimique)	Cecabase RT	Rediset WMX	Revix	Evotherm ET
C4	N.A.	Chimie (liant modifié)	Classe-S	Ecolastic	Ecoflex	Mexphalte

Figure 4-6: Procédés additionnels sélectionnés

³³ Pour la présente recherche, il pourrait s'agir de cire ou alors de bitume modifié avec de la cire.

Afin de vérifier la disponibilité des différents procédés et produits et effectuer une proposition de sélection, contact a été pris avec les partenaires potentiels concernant leur participation au projet de recherche. Tous ont répondu positivement et accepté les principes d'une collaboration décrits ci-après.

4.7.3 Exigences relatives au paquet de recherches proposé

Du point de vue des producteurs et fournisseurs, ce travail offre l'opportunité d'effectuer une validation de leurs produits à l'extérieur, dans le cadre d'une recherche impartiale. Le paquet de recherches permet également aux différents producteurs d'obtenir des informations ainsi que se situer par rapport au marché Suisse qui pour l'instant n'applique que peu d'enrobés tièdes et semi-tièdes. Le potentiel en Suisse est donc important, ces technologies n'étant pas encore véritablement implantées. De plus, ce projet se veut global en impliquant les différents acteurs du domaine et en proposant une recherche qui réponde aux besoins des administrations, producteurs, associations et chercheurs.

Lors de la prise de contact avec un fournisseur éventuel de procédé, les éléments suivants doivent être mis en exergue et validés:

1. Les différentes informations apportées par le fournisseur seront utilisées uniquement à des fins de recherche.
2. Dans le cadre du projet de recherche, aucune dénomination explicite de nom de produit ne sera utilisée. Des termes génériques faisant référence à la famille de procédé seront utilisés (eau, cire...).
3. Le fournisseur autorise les chercheurs à effectuer des fabrications en laboratoire.
4. Le fournisseur autorise les chercheurs à effectuer des fabrications en centrale. Le choix de la centrale sera communiqué ultérieurement au fournisseur.
5. Le fournisseur autorise les chercheurs à procéder à des mesures (émissions, énergie) et essais de performance lors de la fabrication ainsi que sur le matériau fini.
6. Le fournisseur accepte de donner l'accès à des informations pouvant s'avérer nécessaires à la recherche.
7. La recherche fera l'objet d'un rapport de l'Office Fédéral des Routes ainsi que de diverses publications à définir.
8. Les différentes publications utiliseront le terme générique du produit et elles seront effectuées en accord avec le fournisseur du produit concerné.
9. Le fournisseur accepte dans la mesure du possible de collaborer et apporter un support technique notamment lors de la phase de fabrication des mélanges.
10. Le fournisseur communique au préalable les éventuelles spécificités de son procédé.

5. Aperçu de l'état des recherches dans le domaine

Comme mentionné auparavant, les premiers développements et publications datent de la fin des années '90, en Europe. Le congrès Eurasphalt & Eurobitume 2000 (Barcelone) a notamment marqué un point de départ avec de nombreuses publications. On peut mentionner Koender et al. [35] concernant les premiers développements du WAM-Foam, ainsi que [36, 41]. Suite à cela, les recherches et publications relatives aux enrobés tièdes se sont succédées. Il est à relever que la majorité des procédés ont été développés par des sociétés privées.

Actuellement, bon nombre de recherches traitent de l'évaluation des émissions et de la consommation énergétique ou le bilan de premières expériences concernant le comportement à long terme des enrobés tièdes. Quelques recherches concernant les performances mécaniques avec ou sans ajout de matériaux recyclés sont également publiées [46, 47]. Des recherches sont en cours dans différents pays européens comme par exemple la France où un effort est mis entre autre sur la mesure des émissions [48]. L'Espagne a également démarré un projet de grande envergure appelé Fénix. Ce projet regroupant organismes publics et privés a pour but de répondre à la demande sociale de moyen de transport plus sûrs, mais également plus respectueux de l'environnement. Ainsi, une des tâches concerne les enrobés tièdes et une autre les enrobés semi-tièdes. D'importants projets sont donc lancés au niveau national dans différents pays ceci afin de répondre à la demande nationale et en favoriser une future implémentation. Les enrobés tièdes ne sont pas encore appliqués de manière généralisée, mais des efforts sont engagés particulièrement en France, en Belgique et en Allemagne. L'Union Européenne conduit également des recherches sur cette thématique avec par exemple le projet DIRECT-MAT du 7^{ème} Programme Cadre de recherches. Les associations AIPCR³⁴ et l'IRF³⁵ effectuent des travaux sur la thématique, respectivement par l'intermédiaire de groupes de travail ou du développement de calculateurs de gaz à effet de serre [49].

Aux Etats-Unis, le "National Center for Asphalt Technology-NCAT", la "Federal Highway Administration – FHWA" ainsi que la "National Asphalt Pavement Association-NAPA" consacrent des efforts à cette problématique en produisant différents rapports de recherche. De plus, un groupe technique de travail "Warm Mix Asphalt Technical Working Group (WMA TWG)" a été créé aux Etats Unis avec pour mission d'évaluer et valider les technologies d'EBT ainsi que d'implémenter une politique qui soit proactive. Ceci passe notamment par différentes conférences de haut niveau également consacrées aux enrobés tièdes ainsi que bon nombre de sites internet et groupes de travail.

Nous pouvons encore relever que plusieurs conférences traitant des thématiques de l'environnement et du développement durable (Eurasphalt & Eurobitume 2008, International Symposium on Asphalt Pavements and Environment 2008, IRF 2nd Roads & Environment Conference 2008,...) ont été effectuées au cours des dernières années. La première conférence spécifiquement dédiée aux enrobés tièdes (International Conference on Warm-Mix Asphalt) a par ailleurs été organisée à Nashville (USA) par la NAPA, en novembre 2008. En Suisse, nous pouvons par exemple citer la journée technique "Forum Strasse 09: Temperaturabsenkung im Strassenbau".

³⁴ AIPCR : Association Mondiale de la Route

³⁵ IRF : Fédération Routière Internationale

6. Workshop

Un workshop a été organisé à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), le 2 juillet 2008 afin de recueillir l'avis et l'expertise de différents acteurs tant au niveau des professionnels de la route, des producteurs de matière premières, des fabricants de centrale que des administrations. La synergie entre les points de vue permet ainsi d'élaborer un projet de recherche qui soit complet et qui prenne en considération les besoins de chacun.

6.1 Concept et objectifs

La démarche suivie dans l'organisation du workshop a consisté à consulter différents experts nationaux et internationaux provenant de domaines variés en rapport avec les enrobés bitumineux. Ce partage des expériences et recommandations de chacun permet d'effectuer une synthèse des informations pour finalement en retirer les thématiques prioritaires à développer lors du paquet de recherches. Ce workshop a permis de clarifier la définition et dessiner le contenu général.

Le workshop a couvert deux thématiques principales:

1. Etablir une vision de la situation:
 - Quelles sont les technologies disponibles?
 - Quels procédés et matériaux ont été développés? Quelles incidences pour la production, la mise en service et les performances?
 - Quels sont les outils d'évaluation existants?
2. Identifier les besoins dans le domaine des enrobés à faibles impacts:
 - Considération de multiples aspects: énergie, écologique, performances mécaniques, durabilité, hygiène au travail, économie...
 - Identification des "manques de connaissances" au niveau de ces technologies pour les différents aspects ci-dessus.

6.2 Organisation

En guide d'introduction, il a été choisi d'effectuer une brève présentation du projet initial et de ses objectifs, ainsi que des technologies d'enrobés bitumineux à faibles impacts. Le descriptif du projet a été préalablement envoyé aux participants. Cette première présentation a permis de constituer une base de connaissances commune en vue des débats.

Pour chaque thématique deux présentations ont été données en préambule à l'ouverture des débats sous la forme d'une table ronde. La synthèse de ces présentations ainsi que des différents commentaires peut être trouvée en Annexe 10.2.

<ul style="list-style-type: none"> ◆ Introduction Prof. André-Gilles Dumont, EPFL-LAVOC ◆ Présentation de la recherche M. Nicolas Bueche, EPFL-LAVOC
Thématique 1: Situation dans le domaine
<ul style="list-style-type: none"> ◆ Présentation 1 - Les enrobés à basse énergie: la technique WAM Foam et Foam Mix M. Christian Jacobi (Ammann AG) ◆ Présentation 2 - Shell S-Bindemittel und Shell WAM Foam- M. Frank Beer (Shell Bitumen) ◆ Discussion ouverte et tour de table
Thématique 2: Besoins dans le domaine des enrobés à faibles impacts
<ul style="list-style-type: none"> ◆ Présentation 3 - Enrobés à faibles impacts: Vision et objectifs de l'OFROU M. Hans-Peter Beyeler (OFROU) ◆ Présentation 4 - Enrobés tièdes et semi-tièdes: LEA® M. François Olard (Eiffage travaux publics) ◆ Discussion ouverte et tour de table ◆ Synthèse et conclusion Prof. André-Gilles Dumont, EPFL-LAVOC

Figure 6-1: Programme du Workshop – EPFL 2 juillet 2008

Le choix des participants a été effectué dans le but de prendre en considération l'avis de tous les acteurs potentiellement intéressés. Les participants provenaient de l'administration (Office Fédéral des Routes ainsi que des Offices Cantonaux), de la recherche, d'associations, mais également de producteurs (entreprises générales et exploitants de centrales) et fournisseurs de matière première (bitume). La liste complète des participants au workshop figure à l'annexe 10.3.

6.3 Thématiques prioritaires identifiées pour le paquet de recherches

Suite à ce workshop et aux discussions et réflexions qui en ont découlé en particulier dans la commission de suivi, un certain nombre de thématiques jugées prioritaires ont été identifiées. Ces thématiques seront prises en compte dans le paquet de recherches, ceci car elles revêtent un intérêt particulier pour les acteurs du domaine. L'identification d'axes de recherche prioritaires est l'un des objectifs du workshop, ceci pour avoir un paquet de recherches qui soit le plus complet et homogène possible.

Il ressort que les thématiques prioritaires suivantes sont à développer:

- A. **Energie & Environnement:** Quelles diminutions de température peuvent être atteintes et quels en sont les conséquences? Quels gains peuvent être obtenu en terme d'énergie et de pollution et comment peut-on les quantifier?

- B. Performances et propriétés mécaniques:** Il a été mis en évidence que peu d'informations existent concernant la prédiction des performances des enrobés tièdes et semi-tièdes. Un accent particulier sera donc à mettre sur cette problématique ainsi que sur l'optimisation des performances.

Un accent pourra être mis sur l'évaluation en laboratoire des performances mécaniques, leur évolution, le calcul de la diminution de température ainsi que ses effets sur les caractéristiques. Sélectionner les essais en laboratoire qui sont les plus adaptés pour évaluer ces procédés.

- C. Centrales:** Evaluation des émissions, modifications nécessaires en centrale et incidence sur la production journalière. Les incidences économiques sont également à analyser. Les aspects centrales sont indispensables dans l'objectif d'une analyse globale de procédés. De manière générale, la diminution de la température de fabrication permet de réduire la consommation énergétique, mais dans le cas d'une centrale dont le brûleur n'aurait pas été adapté l'effet peut se trouver inversé. Les centrales doivent donc être adaptées.
- D. Méthodes de suivi de la fabrication et de la pose:** Il s'agit de déterminer quels aspects sont déterminants lors du suivi (compactage, etc.) et comment ils peuvent être évalués. Par exemple, les méthodes actuelles de vérification du compactage (Troxler, maniabilimètre Nynas) ne permettent pas de vérifier ceci de manière satisfaisante. La cure (processus et durée) des différents produits sera également à évaluer en vue d'une comparaison avec les enrobés traditionnels. Les méthodes de contrôle doivent également être analysées afin d'être adaptables aux bitumes spéciaux et additifs utilisés dans le cas d'enrobés tièdes par exemple. Il faut alors se demander comment contrôler de manière simple et efficace ces bitumes modifiés, la température anneau & bille ainsi que pénétration n'étant pas suffisants pour ce type de bitume. Cette section est primordiale afin de faire le lien entre les notions théoriques et de laboratoire avec les aspects pratiques des entreprises de construction et maîtres d'œuvre.
- E. Hygiène au travail:** Les gains potentiels au niveau des émissions doivent être analysés. De plus, moins d'émissions ne signifie pas nécessairement un environnement moins nocif pour l'ouvrier ou les riverains. Ce thème est notamment relevé par l'Office Fédéral des Routes qui le fait apparaître dans ses priorités.
- F. Diffusion et publication des résultats:** L'aspect marketing devra être particulièrement soigné au travers de publications régulières, organisation de campagnes d'information lors de conférences telles que celles organisées par la VSS, INFRA,... Il pourrait également être envisagé l'organisation d'un workshop en fin (ou en cours) de projet afin de faire connaître les résultats.
- G. Sections test / planches d'essai / essais en vraie grandeur:** Deux approches différentes existent concernant le recours à des sections tests ou planches d'essai. Le comportement in situ est parfois différent des essais en laboratoire. Des sections tests permettraient alors de valider les éléments "théoriques" tout en favorisant la diffusion des résultats. A l'opposé, ce genre d'entreprise est d'une part très coûteuse, mais de plus les résultats d'expériences à l'étranger pourraient procurer d'importants résultats ceci à de moindres frais.
- Il a finalement été décidé de réaliser des planches d'essai dans le cadre du paquet de recherches. Ceci sera détaillé plus loin.

La version initiale de décomposition du paquet de recherches a également été discutée lors du workshop. Cette première décomposition proposée peut être trouvée au chapitre 1. Ceci a permis d'affiner et optimiser la décomposition des recherches. Les commentaires suivants indiquent les modifications principales qui ont été discutées ainsi que les commentaires majeurs concernant le déroulement de la recherche.

- **Normalisation et brevets:** Travailler dans un souci de normalisation orientée performance pour les liants et enrobés en lieu et place d'une normalisation des produits. Ceci correspond également à la tendance des normes européennes. Le but final est d'inciter les maîtres d'ouvrages à souhaiter voire exiger des procédés à faibles impacts tout en vérifiant que les produits correspondent aux prescriptions par des essais simples et rapides.
- **Modèle d'évaluation:** L'ensemble des flux devra être considéré. Cependant, afin de ne pas se situer dans un créneau identique à d'autres calculateurs (GHG Calculator IRF, EcologieL Colas), un accent particulier sera mis sur les performances mécaniques.
- **Procédés à évaluer:** Le choix de procédés à évaluer a fait long débat et il est détaillé au chapitre 4.7. Nous rappelons qu'afin d'éviter la redondance, il a été décidé de ne pas travailler avec des matériaux recyclés. Cependant, une collaboration étroite avec le projet [1] sera effectuée.
- **Bilan énergétique et écologique:** Lors du workshop, il a été proposé de séparer ces deux aspects et de lier les aspects écologiques au paquet traitant de l'hygiène au travail. Finalement une telle répartition ne sera pas proposée pour le paquet de recherches, l'hygiène au travail se distingue des aspects écologiques pour lesquels les émissions en centrale et lors de la fabrication sont sous-entendues. De plus, un lien étroit entre énergie et environnement se doit d'être maintenu en groupant ces aspects dans le même sous-projet.
- **Aspects pratiques:** Il est important que le projet débouche sur des recommandations pouvant être directement appliquées. Des outils pour la promotion des résultats devront également être établis. Ceci peut par exemple concerner des conférences ou débats impliquant les milieux spécialisés et non spécialisés (politiques, journalistes, ...).

7. Synthèse des attentes et besoins

Les besoins sont de deux types, selon le domaine des acteurs concernés. D'une part, les milieux politiques vont axer leurs besoins en termes de réduction de la charge environnementale afin de respecter les engagements du protocole de Kyoto. D'autre part, les producteurs d'enrobé vont essayer de réduire leur facture énergétique, de limiter les émissions afin de moins payer de taxes et de diminuer l'impact sur la santé des ouvriers,...

C'est justement afin de créer un paquet de recherches qui réponde à la demande et aux besoins des différents acteurs du domaine routier qu'un workshop a été organisé. Ce workshop a permis d'identifier et de détailler bon nombre de thématiques prioritaires. La synthèse de ces besoins issus du workshop est détaillée dans le chapitre 6.3 relatif aux thématiques prioritaires. Nous pouvons rappeler les éléments suivants :

- Faible recul sur l'influence des nouveaux procédés sur les performances et propriétés mécaniques, prévision du comportement ;
- Evaluation et analyse des émissions ainsi que des aspects énergétiques ;
- Incidences sur la production en centrale ;
- Méthode de suivi de la pose ;
- Hygiène au travail ;
- Procédure de validation et acceptation ;
- ...

D'autre part, bon nombre de rapports de recherches, associations et conférences mettent en exergue les recherches nécessaires afin de favoriser le recours aux technologies d'enrobés tièdes. Ces besoins ont été mentionnés tout au long du présent document, et nous n'allons pas les détailler davantage ici. En synthèse, Prowell et Hurley [5, 15, 21, 27] identifient les éléments suivants en terme de recherche nécessaire pour les enrobés tièdes:

- **Formulation :**
L'utilisation d'enrobés tièdes permet de réduire la température de fabrication et de compactage. Une méthode permettant de déterminer la température minimale serait nécessaire. Des considérations concernant le dosage en liant optimal devraient également être menées, la majorité des recherches actuelles effectuant une formulation identique à celle d'enrobés à chaud. Ceci simplifie certes la procédure, mais ne l'optimise pas nécessairement. Des réflexions sur la procédure de sélection des liant devraient également être menées étant donné le taux de vieillissement plus faible du liant lors de la production d'enrobé tiède. De même, le vieillissement effectué en laboratoire se doit d'être analysé afin de correspondre au vieillissement in-situ observé pour les enrobés tièdes.
- **Performances à long terme :**
Le recul sur ces technologies est encore faible et les performances sur l'ensemble du cycle de vie se doivent d'être analysées. En particulier la sensibilité à l'eau et l'orniérage doivent être mieux compris. Les premières données collectées semblent indiquer de manière générale des performances au moins aussi bonnes que pour des enrobés à chaud. Cependant, le risque d'orniérage semble être plus élevé et à une plus basse température en raison du vieillissement plus faible du liant. Ceci nécessite d'être approfondi en laboratoire, ainsi que par un monitoring et relevé régulier de sections. Cet aspect est crucial car de meilleures performances à long terme pourraient permettre de justifier des coûts

légèrement supérieurs. A l'inverse, de pauvres performances nécessiteraient un remplacement fréquent et péjoreraient le bilan sur le cycle de vie.

- **Evaluation des nouvelles procédures :**

Ces aspects ont également été abondamment discutés lors du workshop. Une procédure robuste d'évaluation et validation ainsi que de comparaison des différents produits offerts est nécessaire. Ceci constitue certainement un des besoins les plus urgents ainsi que la pierre angulaire en vue d'une construction de sections in-situ pouvant être suivies sur le long terme. De telles procédures d'évaluation sont développées en France et en Allemagne par exemple.

- **Quantification financière :**

Comme expliqué au chapitre 4.5, le bénéfice potentiel des technologies se doit d'être évalué et mis en regard avec les coûts associés.

- **Enrobés tièdes et matériaux de recyclage :**

Les combinaisons avec matériaux recyclés se doivent d'être considérées. Ceci pourrait améliorer encore le bilan sur le cycle de vie, mais peut également agir positivement sur les performances mécaniques. La production d'enrobé tièdes permet également d'augmenter la teneur en enrobé recyclé. La viscosité plus faible (meilleure maniabilité et compacité) ainsi qu'un liant de base moins vieilli sont des facteurs favorisant l'augmentation de la teneur en matériau recyclé. Des bénéfices combinés à l'utilisation de matériaux recyclés et production d'enrobés tièdes sont envisageables et ils doivent donc être évalués.

- **Equipements pour la production :**

La production ainsi que la possibilité de pouvoir passer « facilement » d'une production à chaud à un enrobé tiède doivent être analysés et optimisés.

Ces besoins en recherches sont également définis par les nombreux avantages et le potentiel des technologies. Ceci concerne par exemple le potentiel énergétique, écologique, la plus grande teneur en RAP, la diminution de viscosité favorisant le compactage, la plus grande distance de transport, ... Ce potentiel et les différents avantages se doivent d'être exploités au mieux afin de pouvoir offrir une alternative crédible aux enrobés à chaud. Au regard des besoins en terme de recherches exprimés par les différents milieux ainsi que du potentiel et des avantages identifiés, les enrobés tièdes constituent une technologie prometteuse pouvant révolutionner la production des enrobés à chaud. Il ne s'agit pas d'un effet de mode passager. L'intérêt croissant porté à ces technologies par les différents milieux (l'OFROU en a fait un de ses axes prioritaires) démontre également les attentes et besoins en vue d'une application à très large échelle.

Le développement des besoins effectués dans le cadre de ce projet initial, et résumé ci-dessus, montre donc la nécessité de procéder à une recherche au niveau Suisse également. Le paquet de recherches proposé par la suite a pour objectif de répondre à une partie de ces besoins, ceux jugés prioritaires pour la problématique du réseau routier suisse.

8. Libellé du paquet de recherches

8.1 Introduction et données initiales

Le titre proposé dans un premier temps pour le paquet de recherches était "Enrobés à faibles impacts énergétiques et écologiques". C'est sous ce nom que le projet initial est réalisé. Pour le paquet de recherches, un nouveau titre est proposé:

PLANET - Potentiel et Analyses des Enrobés Tières

8.1.1 Procédés considérés et nomenclature

Différents procédés ont été sélectionnés (voir chapitre 4.7 pour plus de détails), et séparés en deux catégories distinctes. La première, appelée "fil rouge" (FR), correspond à des procédés de base qui vont être testés dans toutes les recherches spécifiques (RS). Ceci permettra ainsi de faire des comparaisons entre recherches spécifiques sur une base commune. La seconde catégorie appelée "procédés additionnels" (PA) contient des procédés supplémentaires qui seront testés uniquement dans le cadre de recherches spécifiques pour lesquelles le type de mélange tiède nécessite une analyse approfondie. En plus des procédés tièdes sélectionnés (fil rouge et procédés additionnels) un mélange de référence à chaud (REF) sera également testé dans les différentes recherches spécifiques afin d'effectuer des comparaisons.

Dans un souci d'anonymat et de respect des possesseurs de brevets, les différents procédés ne seront pas dénommés explicitement mais sous la forme de termes génériques indiqués dans la Figure 8-1. Ces termes génériques permettent cependant de distinguer les différentes familles de procédés et d'éviter des confusions. La Figure 8-1 indique également pour chaque procédé s'il sera fabriqué en centrale ou laboratoire et s'il sera utilisé pour la construction de planches d'essais. Les recherches spécifiques (RS) concernées sont également indiquées. Ceci sera détaillé plus loin dans cette section.

Catégorie	Famille de procédé	Dénomination procédé	Fabrication centrale	Fabrication laboratoire	Planche d'essai
Fil rouge (FR)	Tiède – Modification séquence d'enrobage	FR-SEQ	RS-1, RS-2, RS-3, RS-4, RS-6, RS-7	RS-2, RS-3, RS-4*	RS-6, RS-7
	Tiède – Introduction d'eau	FR-WATER	RS-1, RS-2, RS-3, RS-4, RS-6, RS-7	RS-2, RS-3, RS-4*	RS-6, RS-7
	Tiède – Basé sur chimie (cire)	FR-WAX	RS-1, RS-2, RS-3, RS-4, RS-6, RS-7	RS-2, RS-3, RS-4*	RS-6, RS-7
	Tiède – Combinaison de principes	FR-COMB	RS-1, RS-2, RS-3, RS-4, RS-6, RS-7	RS-2, RS-3, RS-4*	
Procédés additionnels (PA)	Semi-tiède – Introduction d'eau	PA-HWAM		RS-2, RS-3, RS-4	
	Tiède – Basé sur chimie (Liant vert)	PA-GREEN		RS-2, RS-3, RS-4	
	Tiède – Basé sur chimie (package chimique)	PA-PACK		RS-2, RS-3, RS-4	
Mélange de référence (REF)	Chaud – Enrobé couche de base classique	REF-HOT	RS-1, RS-2, RS-3, RS-4, RS-6, RS-7	RS-2, RS-3, RS-4	

Figure 8-1 : Liste des procédés retenus et de leur dénomination pour le paquet de recherches ainsi que différentes fabrications et recherches spécifiques RS-X.

Notes :

- Les noms seront adaptés selon le choix définitif des produits, le principe étant conservé.
- *: A définir après le choix final des procédés, lesquels peuvent être fabriqués en laboratoire. Ceci peut légèrement modifier le choix des produits.

Afin de vérifier la disponibilité des différents procédés et produits, contact a été pris avec les partenaires potentiels concernant leur participation au projet de recherche. Tous ont répondu positivement et accepté les principes d'une collaboration décrits.

Pour la réalisation des planches d'essai, il est prévu de construire trois planches successives, avec trois des quatre procédés du fil rouge. Le choix final des trois procédés fil rouge sélectionnés sera arrêté selon les facilités de production et le déroulement du projet.

8.1.2 Mode de fabrication des différents procédés

Pour la fabrication ou l'obtention de matériau fini, différentes options ont été évaluées (voir chapitre 4.7):

- **Elaboration des procédés en laboratoire :**
Ceci n'est cependant pas envisageable pour tous les procédés. De manière générale, les procédés ayant recours à la maîtrise de la teneur en eau sont difficiles à produire en laboratoire sans appareillage spécifique. Des expériences concluantes ont cependant été réalisées [50].
- **Fabrication en centrale :**
Cette option présente l'avantage d'un matériau fini identique qui pourra ensuite être réparti entre les intervenants des différentes recherches spécifiques.
- **Prélèvements in situ :**
Cette option permet notamment d'analyser la mise en place et le compactage sur chantier qui sont des éléments clés avec les procédés tièdes.

Dans le cadre de ce paquet de recherches, il est finalement choisi de procéder de la manière suivante (Figure 8-1):

- **Procédés fil rouge:** fabrication en centrale et en laboratoire pour recherches spécifiques RS-2, RS-3 et RS-4 (sera adapté selon choix final des procédés).
- **Procédés additionnels:** fabrication en laboratoire uniquement comme détaillé précédemment.

Des prélèvements in situ ne sont en outre pas envisageables ici étant donné les relatives faibles quantités d'enrobés tièdes posées actuellement sur le réseau suisse. De plus, ceci nécessiterait un large carottage des chaussées existantes, ce qui est difficilement envisageable. Une alternative est cependant proposée dans le cadre de ce paquet de recherches par la construction des planches d'essai. De plus amples détails sont fournis au chapitre 8.2.

8.1.3 Données complémentaires pour les mesures des émissions

Comme détaillé par la suite, il est prévu de mesurer les émissions de la centrale et de l'enrobé bitumineux. Ces mesures seront faites lors de la production en centrale. Le choix des différentes émissions à mesurer est basé sur la législation suisse et internationale. Il est donc choisi de ne considérer que les matières pour lesquelles des valeurs limites existent. Il est proposé de mesurer les éléments suivants [51, 52]:

- TPM (total particle matter);
- Monoxyde de carbone CO;
- Dioxyde de carbone CO₂;
- Oxygène O₂;
- Oxydes d'azote NO_x;
- Composés organiques totaux (COT);
- Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) – Mesure discontinuée sur échantillon;
- Dioxyde de soufre SO₂.

8.1.4 Implication des entreprises

Les premiers développements d'enrobés tièdes ont été menés par des groupes privés actifs en construction routière et disposant d'infrastructures de recherche. D'autre part les applicateurs soit les entreprises locales de fabrication et pose d'enrobé souhaitent prendre une part active à ce paquet de recherches. Il est donc proposé un modèle d'implication du privé dans cette recherche publique. Ceci

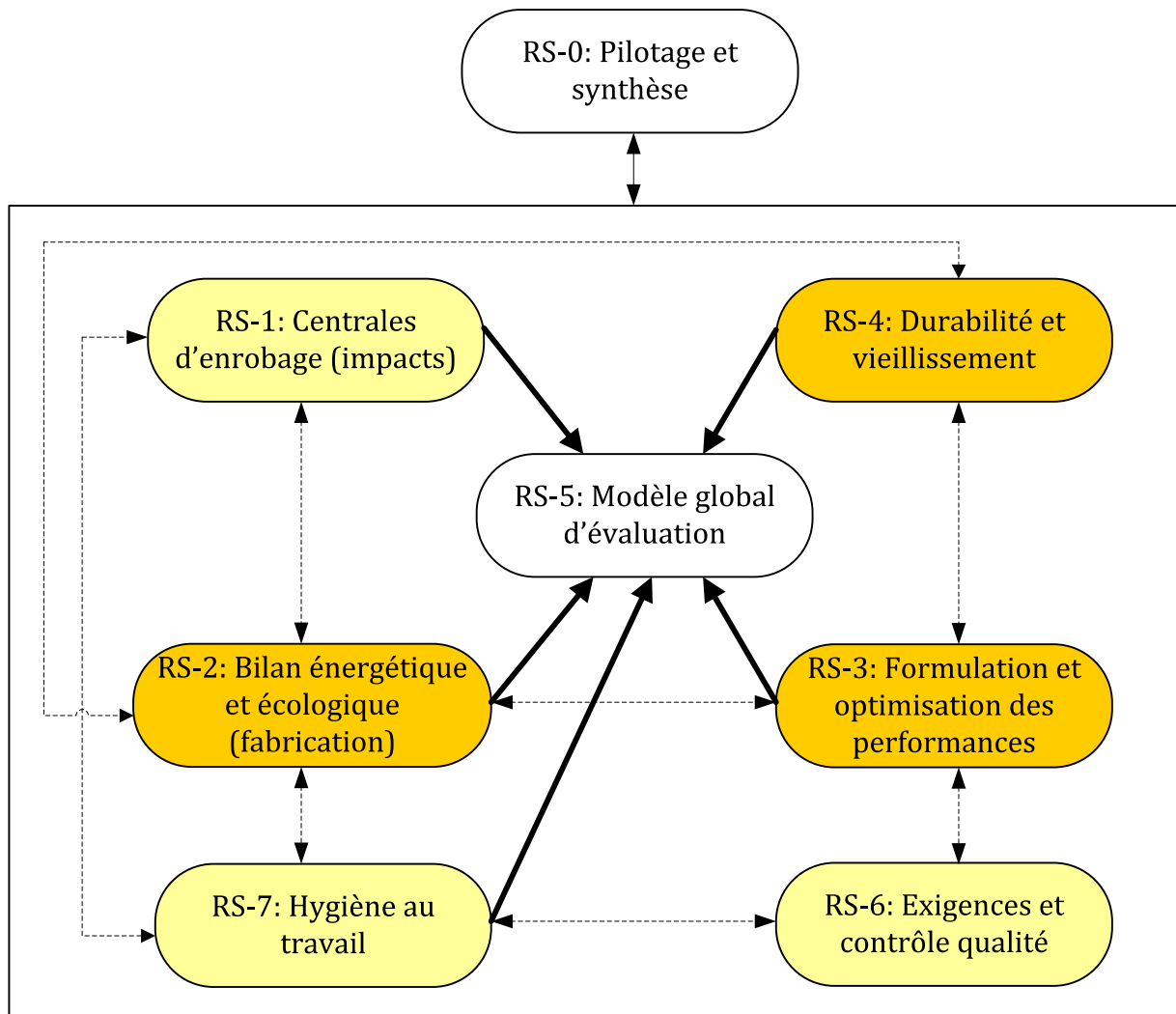
notamment par une participation pour les fabrications en centrale et la construction des planches d'essai.

8.2 Paquet de recherches

Ce paquet de recherches est constitué de plusieurs recherches spécifiques (RS), pouvant être menées en parallèle ceci de manière indépendante ; mais avec un fort lien entre-elles assuré par les actions de coordinations. Par exemple, les fabrications en centrale d'enrobage seront utilisées afin d'effectuer les mesures environnementales et énergétiques nécessaires aux recherches spécifiques concernées. Les liens ainsi que la coordination entre recherches spécifiques sont développés dans le descriptif des recherches. De plus, les différentes recherches spécifiques permettent de fournir des données d'entrée au modèle d'évaluation qui constitue une synthèse générale. Il est par ailleurs important de conserver dans le cadre de cette recherche une certaine indépendance des différents paquets, ceci afin de faciliter leur exécution d'un point de vue chronologique et éviter de conséquents délais. Les constituants principaux des différentes recherches spécifiques sont indiqués dans la suite de ce chapitre 8.2.

8.2.1 Organisation générale

L'organisation générale du paquet de recherches est représentée dans la Figure 8-2. Cette figure indique les liens entre les différentes recherches spécifiques ainsi que les procédés testés. Le projet présenté ainsi comporte trois recherches spécifiques orientées sur l'aspect pratique des technologies (Centrales d'enrobage – Hygiène au travail – Exigences et contrôle qualité), les autres recherches spécifiques étant plus orientées sur la recherche en laboratoire. Le tout permet ainsi d'aboutir au modèle global d'évaluation.



Légende:

Procédés: Fil rouge et procédés additionnels

Procédés: Fil rouge uniquement

Coordination / Coopération

Input

Figure 8-2: Organisation générale et liens entre recherches spécifiques (RS)

8.2.2 Contenu des recherches spécifiques

Recherche spécifique RS-0: Pilotage et synthèse

➤ Objectifs

Cette RS a pour rôle principal les activités traditionnelles de gestion et coordination, mais également une organisation approfondie d'activités de diffusion et publication des résultats. Il est important que les résultats ainsi que l'avancement du projet soient largement diffusés, ceci faisant partie de la procédure d'aide à l'acceptation des procédés tièdes (chapitre 6). Finalement, cette recherche spécifique sera également en charge de l'organisation des fabrications en centrale et de la répartition des matériaux entre intervenants. Une seule centrale d'enrobage sera utilisée pour les différentes fabrications.

➤ Résultats attendus

- Gestion financière du projet.
- Coordination entre les différentes recherches spécifiques et particulièrement pour les activités de diffusion et publication des résultats.
- Organisation kick-off meeting et procédure de décision concernant le choix du liant, le type de granulats ainsi que la formulation des enrobés en centrale. Ceci s'effectue en accord avec la commission d'accompagnement.
- Organisation des séances de suivi avec la commission d'accompagnement.
- Organisation et suivi de la concordance des données de centrale et procédés utilisés dans le paquet de recherches.
- Suivi et collaboration avec d'autres projets nationaux et internationaux relatifs à la thématique.
- Relations et suivi de la normalisation nationale et internationale ainsi que son évolution sur la thématique des enrobés tièdes. Analyse et élaboration d'une proposition de normalisation des résultats (ou partie des résultats) du paquet de recherches.
- Support à RS-3 pour l'organisation des fabrications en centrale et répartition des matériaux du fil rouge.
- Organisation de la répartition des liants, additifs et granulats nécessaires pour les fabrications en laboratoire des procédés additionnels selon chapitre 8.1 et Figure 8-1.
- Diffusion et publication des résultats:
 - Aide et suivi de publications scientifiques régulières ;
 - Organisation d'une campagne d'information lors de conférences annuelles de type VSS, INFRA, ... ;
 - Organisation d'un workshop en fin de projet.
- Rédaction du rapport de synthèse.

➤ Insertion dans le projet

Cette recherche spécifique fait la liaison entre toutes les autres recherches, indépendantes dans leur exécution mais pour lesquelles une forte coordination est nécessaire. Elle a également pour rôle d'organiser la fabrication et la répartition des matériaux entre partenaires. Pour cela une coordination particulière avec les RS-1 et RS-2 est nécessaire afin de mesurer les émissions lors de la production des enrobés tièdes en centrale.

➤ Budget et planning

Le budget de cette recherche spécifique est estimé à SFr. 136'000. Ceci constitue 7% du total. Une implication des entreprises privées pour la fabrication en centrale est également proposée (par exemple au-travers de la mise à disposition de produits).

La durée envisagée du projet est de 36 mois. Cette recherche spécifique se déroule sur toute la durée du projet avec une impulsion particulière lors des premiers mois afin d'avoir une préparation en centrale et répartition des matériaux efficaces.

Recherche spécifique RS-1: Impacts sur les centrales d'enrobage

➤ Objectifs

Cette recherche spécifique a pour objectif d'analyser l'impact de la fabrication des enrobés tièdes sur les centrales d'enrobage. Ceci concerne tant les modifications nécessaires selon les procédés que les conséquences sur la cadence de production. Cette thématique prioritaire a notamment été soulevée lors du workshop ; les chantiers suisses ayant une taille plus faibles que nos voisins français ou allemands, on peut se demander dans quelle mesure les technologies tièdes peuvent s'avérer rentables pour les producteurs nationaux.

➤ Résultats attendus

- Recherches bibliographiques – mise à jour des connaissances.
- Analyse du parc de centrales existantes en Suisse et de son évolution (type de centrales, production, ...).
- Prise de contact avec des centrales de production³⁶ (deux à trois centrales) représentatives du marché suisse et recueil de données concernant :
 - o Production et cadences de production ;
 - o Consommation énergétique (fioul, gaz, électricité) ;
 - o Données environnementales disponibles (mesure effectuées préalablement, type de mesure, résultats) ;
- Mesures des émissions à la centrale lors de la production d'enrobés tièdes ainsi que lors de la production de l'enrobé de référence. Pour les enrobés tièdes, la mesure lors de la production avec un seul procédé du fil rouge est suffisante. Cette mesure s'effectuera lors de la production des enrobés utilisés dans cette recherche ;
 - o Définition des paramètres à mesurer ainsi que des valeurs limites (collaboration avec RS-2) ;
 - o Mesure sur centrale lors de la production des enrobés ;
 - o Analyse chimique des COV.
- Possibilités techniques de modifications d'une centrale pour application des procédés tièdes (modifications requises, calibration du brûleur,...). Prendre également en considération l'ajout de matériaux recyclés (à chaud – à froid).
- Incidences de la production tiède sur la cadence de production.
- Analyse coûts-bénéfices pour une centrale d'enrobage - considérations économiques prenant en compte les considérations énergétiques et écologiques ainsi que les investissements nécessaires.
- Méthodes de suivi et de contrôle des centrales d'enrobage d'un point de vue énergétique et écologique.
- Recommandations énergétiques et écologiques pour une production efficace en centrale. Considérations des aspects liés à l'ajout de matériaux recyclés.

➤ Insertion dans le projet

La production en centrale est un élément primordial si l'on désire considérer une technologie sur l'ensemble de son cycle de vie. Cette recherche spécifique nécessite une coordination et communication avec la RS-0 afin d'effectuer des mesures d'émissions en centrale lors de la production des enrobés tièdes du fil rouge ainsi que lors de la production d'enrobé à chaud (référence). De plus, cette recherche spécifique est également liée aux recherches traitant du bilan énergétique lors de la fabrication en

³⁶ Tout comme pour les procédés, les centrales seront dénommées selon un terme générique faisant référence au type de centrale.

laboratoire (RS-2) ainsi que la RS-7 : Hygiène au travail. Cette recherche spécifique constitue également une source de donnée en vue du modèle global d'évaluation (RS-5).

➤ Budget et planning

Le budget de cette recherche spécifique est estimé à SFr. 140'000, ce qui constitue 7% du total.

Afin de pouvoir effectuer les productions d'enrobés tièdes et de références lors de la première année du projet, cette recherche spécifique démarre également au mois 0 avec le concept de mesures des émissions de la centrale. La durée de cette recherche spécifique est de 24 mois.

Recherche spécifique RS-2: Bilan énergétique et écologique lors de la fabrication

➤ Objectifs

Un des principaux avantages liés aux enrobés tièdes réside dans leurs gains énergétiques et écologiques annoncés par les différents fabricants. Ces aspects énergétiques et écologiques sont actuellement prépondérants et au regard des gains potentiels, ils constituent une des principales motivations du paquet de recherches. Cette recherche spécifique se concentre notamment sur la production en laboratoire, analysée également en regard des éléments fournis par les centrales d'enrobage (RS-1) pour ce qui est du bilan énergétique. Les fabrications en centrale seront utilisées pour le bilan écologique.

➤ Résultats attendus

- Recherches bibliographiques – mise à jour des connaissances.
- Procédés considérés:
 - o Fil rouge: fabrications en centrale et en laboratoire ;
 - o Procédés additionnels: fabrications en laboratoire.
- Un partage de données ou alors l'obtention de données initiales peut-être envisagé par l'intermédiaire d'autres projets ou bases de données (par exemple Ecoinvent).
- Le principe consiste ici à analyser et comparer les enrobés tièdes, mais également effectuer des comparaisons avec le mélange de référence à chaud.
- Bilan énergétique (fabrications en laboratoire):
 - o Définition et analyse de sensibilité des paramètres à mesurer ;
 - o Mesure de l'énergie de production en laboratoire et analyse de la représentativité par rapport à la production en centrale ;
 - o Mesure par une méthode de laboratoire appropriée de l'énergie de compactage ;
 - o Analyse critique des méthodes de mesures et de leurs incertitudes ;
 - o Optimisation énergétique de la fabrication et mise en œuvre ;
 - o Analyse et critique de modèles énergétiques existants ;
 - o Modèle de calcul énergétique et analyse selon les données mesurées en laboratoire ;
 - o Bilan énergétique des procédés et recommandations.
- Bilan écologique (fabrications en centrale³⁷):
 - o Définition et analyse de sensibilité des paramètres à mesurer ;
 - o Analyse des valeurs limites au niveau national et international (collaboration RS-1) ;
 - o Mesure des émissions du mélange lors de la production en centrale directement à la sortie du malaxeur ;
 - o Evolution des émissions du mélange à différentes températures lors de la production en centrale ;
 - o Analyse critique des méthodes de mesures et de leurs incertitudes ;
 - o Optimisation écologique de la production en centrale ;
 - o Analyse et critique de modèles de calcul d'émissions existants ;
 - o Modèle de calcul écologique et analyse selon les données mesurées en centrale ;
 - o Bilan écologique des procédés et recommandations.
- Considérations générales concernant l'effet d'un ajout de matériaux recyclé sur les bilans énergétiques et écologiques.

³⁷ Considérant les travaux effectués sur les mesures d'émissions en laboratoire et de la difficulté de la mesure ainsi que ses coûts associés, il est proposé d'effectuer les mesures d'émissions en centrale d'enrobage.

- Aspects économiques relatifs aux émissions et consommation énergétique (analyse coût-bénéfice).

➤ Insertion dans le projet

Cette recherche spécifique est un des éléments au cœur du projet puisqu'elle concerne les éléments clés des procédés tièdes. Une étroite collaboration est nécessaire notamment avec la recherche spécifique RS-1 : Impacts sur les centrales d'enrobage et RS-0 : Pilotage et synthèse, en ce qui concerne les mesures d'émissions de l'enrobé lors de la production en centrale. Ces résultats seront, dans une dernière phase, à mettre en regard avec les données obtenues pour l'hygiène au travail (RS-7) ainsi que la RS-3 : Formulation et optimisation des performances. Cette recherche spécifique constitue également une source de donnée en vue du modèle global d'évaluation (RS-5).

➤ Budget et planning

Le budget de cette recherche spécifique est estimé à SFr. 250'000 ce qui constitue 13% du total. Modification de la centrale estimée à SFr. 50'000 prise en charge par les partenaires (concepteurs de la centrale, exploitant de la centrale, fournisseur du procédé, du liant et de l'éventuel additif).

Le planning du projet de recherches prévoit un début au mois 0 afin d'effectuer les mesures environnementales sur les mélanges fabriqués en centrale. La durée de cette recherche spécifique est de 24 mois.

Recherche spécifique RS-3: Formulation et optimisation des performances

➤ Objectifs

Cette recherche spécifique a pour objectif principal d'analyser les incidences d'un procédé d'enrobé tiède au niveau de la formulation et des performances à court terme (montée en performance) comparativement aux enrobés traditionnels à chaud. Il a donc pour but de répondre entre autre aux questions suivantes : Quels seront les paramètres à considérer lors de la formulation ? Comment optimiser les performances ? Les outils de formulation volumiques classiques peuvent-ils sans autre être adaptés aux enrobés tièdes ?

Cette recherche spécifique fournira également des résultats et analyses concernant l'ajout de matériaux recyclés dans la formulation, ceci par la fabrication de mélanges à deux différents taux de recyclé.

➤ Résultats attendus

- Recherches bibliographiques – mise à jour des connaissances.
- Procédés considérés:
 - o Fil rouge: fabrications en centrale et en laboratoire ;
 - o Procédés additionnels: fabrications en laboratoire.

Les performances à court termes peuvent être sensiblement différentes selon les procédés et c'est pourquoi il est proposé dans cette recherche spécifique, de considérer aussi les procédés additionnels.
- Organisation des fabrications en centrale (avec support de RS-0). Utilisation d'une seule centrale d'enrobage.
 - o Libellé de la fabrication en centrale et recueil des quantités demandées pour chaque recherche spécifique auprès des partenaires.
 - o Coordination avec RS-1 et RS-2 pour les mesures lors de la production.
 - o Organisation et acheminement des mélanges aux différents laboratoires partenaires.
- Inventaire des chantiers réalisés à ce jour en Suisse avec des enrobés tièdes:
 - o Historique construction ;
 - o Mesures de portance ;
 - o Relevé de l'état de surface ;
 - o Analyse critique de l'état fonctionnel ainsi que l'état structurel au regard des sollicitations ;
 - o Premières recommandations pour la formulation et l'optimisation des performances.
- Détermination des caractéristiques mécaniques critiques de l'enrobé tiède notamment au-travers de recherches bibliographiques et expériences diverses.
- Analyse et quantification de l'impact sur la formulation et les performances à court terme des caractéristiques mécaniques critiques de l'enrobé.
- Il est en particulier recommandé de considérer les performances suivantes :
 - o Sensibilité à l'eau ;
 - o Maniabilité, compactibilité ;
 - o Mûrissement, temps de cure ;
 - o Degré de compacité (teneur en vides) ;
 - o Comportement à basses température ;
 - o Comportement à hautes températures ;
 - o Module.

- Analyse détaillée des procédés d'évaluation en laboratoire des performances mécaniques déterminantes relevées précédemment. Evaluation de la compatibilité des méthodes avec les enrobés tièdes.
- Analyse des caractéristiques des liants utilisés.
- Optimisation de la formulation d'enrobés à faibles impacts:
 - o Procéder par comparaison avec le mélange de référence ;
 - o Pour deux mélanges du fil rouge, tenir compte du recyclage (à chaud) avec des formulations à des taux de 20% et 50% (en masse de granulats). Effectuer une analyse et comparaison. Une analyse préliminaire du liant récupéré et du fraisat sont nécessaires.
 - o Formulation et optimisation selon au moins une méthode traditionnelle sélectionnée (par exemple Prado) ;
 - o Mesure et analyse des performances mécaniques sélectionnées pour les différents mélanges ;
 - o Analyse des gains en températures (gains énergétiques et environnementaux, RS-2) en regard des performances mécaniques ;
 - o Considérations sur l'évolution des propriétés au jeune âge et montée en performance (mûrissement) ;
 - o Impacts sur la formulation – intégration dans un outil de formulation ;
 - o Recommandations relatives à la formulation et optimisation des performances à court terme. Considérations particulières relatives à l'ajout de matériaux recyclés.

➤ Insertion dans le projet

Cette recherche spécifique concerne la formulation ainsi que les propriétés mécanique au jeune âge des différents procédés. Un lien étroit existe notamment avec la recherche spécifique RS-4 : Durabilité et vieillissement, ainsi qu'avec la RS-2 en ce qui concerne la considération des performances relatives aux gains environnementaux / énergétiques et la RS-6 pour le contrôle qualité en laboratoire. Cette recherche spécifique constitue également une source de donnée en vue du modèle global d'évaluation (RS-5).

➤ Budget et planning

Le budget de cette recherche spécifique est estimé à SFr. 260'000 dont SFr. 40'000 pour les fabrications en centrales et l'acheminement des matériaux chez les partenaires. Le montant de cette recherche spécifique constitue 14% du total.

Le planning du projet de recherches prévoit un début au mois 3 et une durée de recherche de 24 mois.

Recherche spécifique RS-4: Durabilité et vieillissement

➤ Objectifs

Cette recherche spécifique a pour objectif majeur l'investigation des propriétés à long terme des enrobés tièdes, comparativement à la recherche spécifique précédente dont l'objet est les propriétés à court terme. Ainsi, la durabilité et le comportement de l'enrobé au vieillissement seront analysés ici.

➤ Résultats attendus

- Recherches bibliographiques – mise à jour des connaissances.
- Procédés considérés:
 - Fil rouge: fabrications en centrale et en laboratoire ;
 - Procédés additionnels: fabrications en laboratoire.

Ceci permet d'effectuer des comparaisons avec les propriétés à court terme analysées dans la recherche spécifique RS-3. Les essais de fatigue étant particulièrement long, des options avec essais de fatigue uniquement sur les procédés du fil rouge peuvent être envisagées.
- Analyse de la durabilité des enrobés tièdes :
 - Analyse critique des modèles de comportement des enrobés bitumineux à la fatigue ;
 - Analyse critique des modèles d'orniérage des enrobés bitumineux ;
 - Essais de fatigue pour les différents enrobés tièdes ;
 - Recommandations concernant un modèle d'évolution des enrobés tièdes testés à la fatigue ainsi qu'à l'orniérage ;
 - Evaluation des résultats du comportement à la fatigue sur des calculs de durée de vie d'une chaussée.
- Analyse du comportement au vieillissement des liants et enrobés tièdes :
 - Sélection d'une méthode de vieillissement du liant normalisée, adaptée aux procédés tièdes et semi-tièdes (<100 °C) de type RCAT (Rotating Cylindrical Ageing Tester – EN15323) ;
 - Vieillissement en laboratoire du liant des différents procédés ainsi que du mélange de référence ;
 - Evaluation des paramètres caractéristiques du liant (voir RS-3) ;
 - Considérations sur l'évolution des propriétés du liant au cours du processus de production et de pose ainsi qu'à long terme ;
 - Analyse critique des méthodes de prédiction de l'évolution des caractéristiques testées en laboratoire ;
 - Etablissement de recommandations concernant un modèle d'évolution du vieillissement des liants utilisés ;
 - Sélection d'une méthode de vieillissement d'enrobé bitumineux tièdes fabriqués en laboratoire par une méthode ne générant pas une excitation des molécules d'eau (injection d'oxygène par exemple) ;
 - Vieillissement en laboratoire des échantillons d'enrobé ainsi que du mélange de référence ;
 - Essais de durabilité sur matériau vieilli ;
 - Considérations sur l'évolution des propriétés du mélange au cours du processus de production et de pose ainsi qu'à long terme ;
 - Analyse critique des méthodes de prédiction de l'évolution des caractéristiques testées en laboratoire ;

- Etablissement de recommandations concernant un modèle d'évolution du vieillissement des enrobés utilisés.
- Analyse du potentiel de recyclabilité des enrobés tièdes – multi-recyclage.
- Considérations particulières relatives à l'ajout de matériaux recyclés ainsi que le multi-recyclage.

➤ Insertion dans le projet

Cette recherche spécifique est le complément de la RS-3 en vue d'une analyse sur l'ensemble du cycle de vie. En outre, une relation avec la RS-2 : Bilan énergétique et écologique ainsi qu'un apport au modèle global d'évaluation (RS-5) sont nécessaires.

➤ Budget et planning

Le budget de cette recherche spécifique est de SFr. 280'000 ce qui constitue 15% du total.

Le planning du projet de recherches prévoit un début au mois 12 afin de bénéficier des premiers résultats de la RS-3 notamment. La durée de la recherche est de 24 mois.

Recherche spécifique RS-5: Modèle global d'évaluation

➤ Objectifs

L'objectif de cette recherche spécifique est de fournir un modèle d'évaluation de procédés tièdes ainsi qu'une validation à l'aide des résultats obtenus dans les autres recherches spécifiques. Ce modèle global d'évaluation a pour but de fournir une aide et un support aux administrations et entreprises afin que cette démarche puisse être adaptée et insérée dans leurs processus de décision.

➤ Résultats attendus

- Recherche bibliographique – mise à jour des connaissances.
- Analyse des procédures d'appel d'offre dans le cas d'enrobés écologiques: Etablir comment ces nouveaux procédés peuvent être mieux valorisés du point de vue du développement durable.
- Considération de l'ensemble du cycle de vie des enrobés: du matériau granulaire de base à l'enrobé final qui sera détruit et éventuellement recyclé.
- Evaluation et analyse de calculateurs partiels existants.
- Caractérisation des techniques du point de vue du développement durable :
 - Développement d'une analyse multicritère des technologies. Ces critères devront comprendre entre autre :
 - Consommation énergétique ;
 - Emissions de GES ;
 - Ressources naturelles (matériaux neufs / recyclés) ;
 - Performances mécaniques ;
 - Difficultés de pose ;
 - Economie ;
 - Potentiel de recyclage futur.
 - Mise au point d'une systématique de pondération et établissement de recommandations notamment concernant les critères discriminants et valeurs limites.
 - Intégration des différents éléments et développement d'un programme (outils d'aide à la décision) convivial permettant d'effectuer cette analyse. Cet outil (modèle global d'évaluation) devra entre autre permettre à son utilisateur d'entrer les critères souhaités ainsi que leur pondération.
 - Validation du modèle d'évaluation à l'aide des résultats obtenus dans le cadre des autres recherches spécifique RS-1, RS-2, RS-3 et RS-4.

➤ Insertion dans le projet

Cette recherche spécifique, dont le but est de fournir un outil d'aide à la décision et de synthèse est en étroite relation avec les recherches spécifiques RS-1, RS-2, RS-3 et RS-4. Ces recherches spécifiques fournissent les inputs nécessaires à la validation. La recherche spécifique RS-5 s'insère comme un élément au cœur du projet permettant par la suite de promouvoir le travail fait dans les différentes recherches spécifiques.

➤ Budget et planning

Le budget de cette recherche spécifique est estimé à SFr. 120'000, ce qui constitue 6% du total. Ceci comprend notamment le développement du logiciel d'aide à la décision.

Le planning du projet de recherches prévoit un début au mois 12 et une durée de recherche de 24 mois. Les autres recherches spécifiques seront utilisées pour la validation du modèle ce qui permet de conserver une certaine indépendance dans son exécution. Il ne sera ainsi pas nécessaire d'attendre les résultats des autres recherches spécifiques afin de démarrer.

Recherche spécifique RS-6: Exigences et contrôle qualité

➤ Objectifs

L'objectif de cette recherche spécifique est de développer les méthodes de contrôle qualité ainsi que leurs exigences. Il a été soulevé notamment lors du workshop les limitations des méthodes actuelles de contrôle (de pose par exemple), et il est de plus nécessaire d'analyser la compatibilité de ces méthodes avec les enrobés tièdes. Pour cela, cette recherche comprend notamment la réalisation de la planche d'essai en collaboration avec la RS-7.

➤ Résultats attendus

- Recherche bibliographique – mise à jour des connaissances.
- Procédés considérés: Fil rouge (fabrication en centrale).
- Analyse des différentes méthodes de contrôle qualité et les exigences relatives à :
 - o Matière première ;
 - o Processus de fabrication ;
 - o Pose, compactage et maniabilité.
- Critique des méthodes de contrôle qualité existantes et établissement de recommandations pour l'application aux enrobés tièdes.
- Elaboration d'exigences relatives aux procédés tièdes concernant les matières premières, la fabrication, la pose, le compactage et la maniabilité.
- Organisation de la construction de trois planches d'essai in situ (SN 640 434) en enrobé tiède. Les entreprises privées qui commercialisent ou produisent les procédés seront partenaires financier du projet pour SFr. 30'000 :
 - o Lieu à définir proche de la centrale. Une proposition de localisation des planches d'essais est à l'étude ;
 - o Construction de planches pour trois technologies tièdes (fil rouge) ;
 - o Type d'enrobés (fil rouge) à convenir conjointement avec RS-7 : Hygiène au travail ;
 - o Dimensions minimales 300 m. x 3.5 m avec une épaisseur de couche minimale de 6 cm (1000 m² de surface minimale et 100 t selon norme) ;
 - o Mesures sur planches d'essai:
 - Instrumentation avec capteurs de déformation et température ;
 - Relevé régulier de l'état des dégradations de surface et d'orniérage;
 - Relevé régulier de la portance de la chaussée ;
 - Sollicitations avec un simulateur de trafic mobile si possible sur site choisi.
- Construction d'une planche d'essai en conditions contrôlées (température, humidité, sollicitations)
 - o Halle Fosse ou équivalent ;
 - o Une planche d'essai pour une technologie tiède du fil rouge.
 - o Type d'enrobé analogue aux planches d'essais in-situ (technologie du fil rouge).
 - o Sollicitation avec simulateur de trafic lourd. Degré de sollicitation à définir.
 - o Mesures sur planche d'essai en conditions contrôlées:
 - Instrumentation avec capteurs de déformations et températures ;
 - Relevé régulier de l'état des dégradations de surface et d'orniérage ;
 - Relevé régulier de la portance de la chaussée ;
 - Analyse du comportement lors de cycles à hautes et basses températures.
- Mesures lors de la construction des planches d'essai selon les méthodes préalablement sélectionnées et analysées.

- Essais en laboratoire de contrôle de fabrication et de pose des produits.
- Procédures de vérification de ces exigences en particulier maniabilité et compactibilité.
- Comparaison avec outils existants et élaboration de recommandations pour l'établissement de dossier de qualification et aptitude.
- Elaboration d'un "manuel" d'aide pour une utilisation optimale et rapide des techniques in-situ.

➤ Insertion dans le projet

Cette recherche est étroitement liée à la RS-7 : Hygiène au travail, ceci car les deux recherches vont bénéficier de la planche d'essai. Un lien existe également avec la RS-3 : Formulation et optimisation des performances pour ce qui est du contrôle qualité des matières premières notamment.

➤ Budget et planning

Le budget de cette recherche spécifique est estimé à SFr. 370'000, soit SFr. 240'000 pour exigences et contrôle qualité et SFr. 130'000 pour les planches d'essai (construction, instrumentation et mesures), ce qui constitue 20% du total. Il est également prévu une participation privée additionnelle dans la construction des planches d'essai d'environ SFr. 30'000.

Le planning prévoit une exécution sur 24 mois, à partir du mois 12. Il est prévu de construire les planches d'essai au mois 24 du projet. Cette construction de ces planches d'essai nécessite une importante coordination avec la RS-7.

Recherche spécifique RS-7: Hygiène au travail

➤ Objectifs

L'hygiène au travail constitue une des motivations de la recherche, et également un des aspects prioritaires relevés par le DETEC lors du workshop. En effet, le recours à des enrobés tièdes, aux températures (et donc fumées) réduites semble positif du point de vue de l'hygiène au travail. On peut donc se demander dans quelles mesures ces émissions se trouveront réduites et si des émissions réduites signifient nécessairement un impact moins important sur la santé des travailleurs (volume des émissions ≠ nocivité). Ces aspects seront considérés ici.

➤ Résultats attendus

- Recherche bibliographique – mise à jour des connaissances.
- Procédés considérés: Fil rouge (fabrication en centrale).
- Analyse de la législation suisse et internationale dans le domaine, valeurs limites.
- Considérations sanitaires.
- Etablissement d'une méthode de mesure des émissions in-situ.
- Mesures in situ :
 - o Planche d'essai (voir RS-6) ;
 - o Comparaison des différents enrobés tièdes avec la formule de référence à chaud.
- Recueil de données relatives aux mesures in-situ des émissions d'enrobés : chauds, tièdes, froids, ainsi que asphalte coulé.
- Analyse des impacts selon les conditions de pose (confiné, ouvert, aéré,...).
- Analyse globale et recommandations pour l'hygiène au travail, ceci selon le type de procédé et les conditions de pose.

➤ Insertion dans le projet

De par les mesures sur la planche d'essai, cette recherche spécifique comporte un fort lien avec la RS-6 : Exigences et contrôle qualité. Une coopération est également nécessaire avec la RS2 : Bilan énergétique et écologiques et RS-1 : Centrales d'enrobage en ce qui concerne les aspects environnementaux pour lesquels une analyse comparative des mesures pourra être effectuée. Cette recherche spécifique constitue également un input au modèle global d'évaluation.

➤ Budget et planning

Le budget de cette recherche spécifique est estimé à SFr. 230'000 ce qui constitue 12% du total.

Le planning prévoit le début de cette recherche spécifique au mois 12, avec une construction de la planche d'essai au mois 24 du projet. Cette construction de la planche d'essai nécessite une importante coordination avec la RS-7. La durée de cette recherche spécifique est de 24 mois.

8.3 Programme du paquet de recherches

La Figure 8-3 représente de manière schématique les différentes mesures qui seront effectuées dans le cadre de ce paquet de recherches. Nous pouvons distinguer ici les données prises en laboratoire, en centrale d'enrobage ainsi que sur les planches d'essais. Les différentes relations et analyses spécifiques sont également marquées à l'aide de flèches de couleur. Cette figure permet également de faire le lien entre la Figure 8-2 et le planning (Figure 8-4) proposé plus loin.

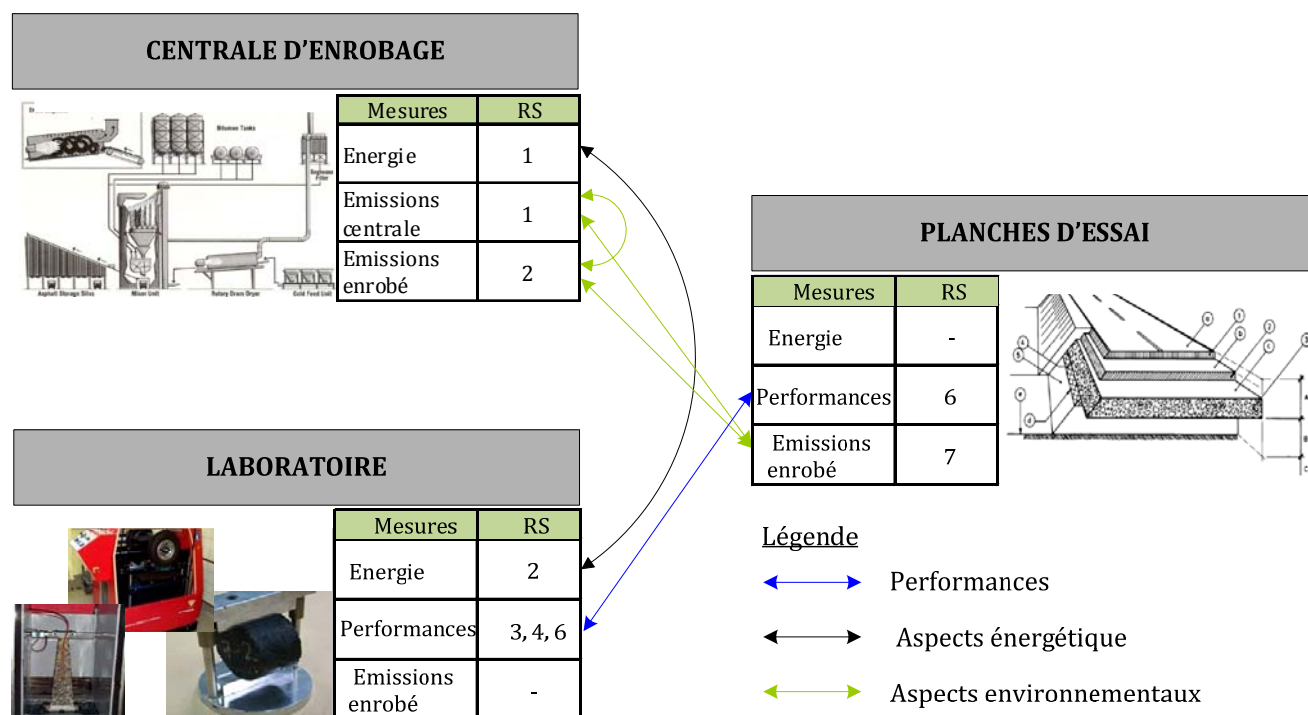


Figure 8-3 : Schéma des mesures et interactions entre recherches spécifiques

Le planning proposé pour le paquet de recherches est représenté en Figure 8-4. Les échéances principales sont également indiquées. L'ordonnancement des différentes étapes a été expliqué auparavant. Dans ce planning des recherches spécifiques, deux éléments important sont à mettre en évidence: la fabrication en centrales des enrobés tièdes et de l'enrobé de référence (mois 9), ainsi que la construction des planches d'essai (mois 24).

		Durée depuis début du projet [mois]											Total	
		3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	
RS-0	Pilotage et synthèse		●	●					●					36
RS-1	Impacts sur les centrales d'enrobage			●										24
RS-2	Bilan énergétique et écologique			●										24
RS-3	Formulation et optimisation des performances		●	●										24
RS-4	Durabilité et vieillissement													24
RS-5	Modèle global d'évaluation													24
RS-6	Exigences et contrôle qualité								●					24
RS-7	Hygiène au travail								●					24
ETAPES CLES DE LA RECHERCHE														
	Décision pour fabrications en centrale		◆											
	Fabrication en centrale des enrobés			◆										
	Construction des planches d'essai								◆					
ECHEANCHES ORGANISATIONNELLES														
	Bilan intermédiaire						◆							
	Acceptation des rapports finaux											◆		
	Acceptation du rapport de synthèse											◆		
	Publication												◆	
	Séances commission de suivi	◆	◆		◆			◆			◆		◆	

Figure 8-4 : Planning du paquet de recherches PLANET

Une estimation des coûts associés au projet est effectuée dans la Figure 8-5. Cette figure indique également les éléments principaux du paquet de recherches, indiqués en vert pour les recherches spécifiques auxquelles ils sont alloués. Ces éléments clés sont d'une part les mesures (en laboratoire ou in situ), le nombre de procédés considérés (fil rouge et procédés additionnels), la construction de la planche d'essai, les fabrications en centrale ainsi que le développement du modèle. La participation envisagée par les entreprises est également indiquée.

Le budget total estimé du projet est de SFr. 1'886'000.

				Procédés testés					Budget [CHF]	Proportion
		Essais labo	Mesures in-situ	Fil rouge	Procédés additionnels	Dvpt modèle	Constr. planche	Fabri. centrale		
RS-0	Pilotage et synthèse								SFr. 136'000	7%
RS-1	Impacts sur les centrales d'enrobage								SFr. 140'000	7%
RS-2	Bilan énergétique et écologique								SFr. 250'000	13%
RS-3	Formulation et optimisation des performances								SFr. 260'000	14%
RS-4	Durabilité et vieillissement								SFr. 280'000	15%
RS-5	Modèle global d'évaluation								SFr. 120'000	6%
RS-6	Exigences et contrôle qualité								SFr. 370'000	20%
RS-7	Hygiène au travail								SFr. 230'000	12%
	Divers et imprévus								SFr. 100'000	5%
									SFr. 1'886'000	100%
<u>Part fournie par les entreprises:</u>										
		Modifications de la centrale (RS2)		SFr. 50'000						
		Construction planche d'essai (RS6)		SFr. 30'000						

Figure 8-5 : Budget estimé du paquet de recherches PLANET

Les textes pour la mise en soumission des différentes recherches spécifiques sont par ailleurs disponibles en Annexe. Ils sont directement issus du présent chapitre.

9. Conclusions et recommandations

Dans ce projet initial, une analyse approfondie des différents procédés d'enrobés tièdes et semi-tièdes et de leur potentiel a été effectuée. La nécessité d'une recherche sur ce thème a été démontrée et le potentiel de gain en termes d'environnement et d'économie d'énergie a été mis en évidence. Les expériences et recommandations de professionnels de la route ont également été recueillies par l'organisation d'un workshop.

Ces éléments consolidés par l'apport de discussions avec la commission de suivi ont permis de constituer les bases afin de mener à bien un paquet de recherches. Un descriptif complet du paquet de recherches comprenant les recherches spécifiques, leur planning et budget approximatif ont été libellés.

La recherche spécifique RS-1 a pour objectif l'analyse de l'impact de la fabrication des enrobés tièdes sur les centrales d'enrobage. Ceci concerne les modifications nécessaires à la centrale, mais également les incidences sur la cadence de production, la calibration du brûleur ou encore les émissions de la centrale lors de la production d'enrobés.

La seconde recherche spécifique (RS-2) est également une des principales motivations du paquet de recherches, le bilan énergétique et écologique lors de la fabrication. Ces aspects sont prépondérants et ils seront analysés en laboratoire mais également au-travers d'informations obtenues en centrale d'enrobage.

La recherche spécifique RS-3 a pour objectif principal d'analyser les incidences des procédés d'enrobés tièdes au niveau de la formulation et de la montée en performance, ceci comparativement aux enrobés traditionnels à chaud. Ainsi, les paramètres critiques à considérer lors de la formulation et son optimisation seront détaillés dans cette recherche spécifique.

Les enrobés tièdes sont fabriqués selon des procédés différents aux enrobés à chaud. Ceci n'est pas sans incidence sur les performances. La RS-4 a pour objectif majeur l'investigation et la variation de ces propriétés à long terme des enrobés tièdes. La durabilité et le comportement de l'enrobé au vieillissement seront étudiés dans cette recherche spécifique.

La RS-5 permet de répondre à l'un des principaux objectifs du paquet de recherches qui est le développement d'un modèle d'évaluation des enrobés tièdes, prenant en considération les aspects énergétiques, environnementaux et économiques, mais également les performances. Ce modèle a notamment pour but de fournir une aide et un support aux administrations et entreprises dans leurs processus de décision.

La RS-6 traite des méthodes de contrôle qualité ainsi que leurs exigences. C'est également dans cette recherche que la réalisation de planches d'essais est effectuée.

La dernière recherche spécifique, RS-7, a pour thématique l'investigation des aspects liés à l'hygiène au travail. Il a pour objectifs d'évaluer si le recours à des enrobés tièdes est nécessairement favorable sur les émissions et leur nocivité.

Ainsi, ce paquet de recherches considère les différents aspects liés aux technologies tièdes et il en découlera notamment :

- Une large diffusion des procédés favorables à l'environnement ;
- Une démarche de suivi des gains en énergie et émissions de CO₂ ;
- Une méthode d'évaluation globale des techniques (impacts, performances, vieillissement, hygiène,...).

10. Annexes

10.1 Principaux procédés tièdes et froids

10.1.1 Enrobés tièdes et semi-tièdes

Comme mentionné, le principe des enrobés tièdes consiste à diffuser le bitume dans le squelette minéral tout en conservant une bonne maniabilité et compactibilité. Nous décrivons par la suite certaines techniques dans le détail, tout en distinguant les principes généraux appliqués. La Figure 4-2 récapitulative permet de les comparer. Dans cette figure, bon nombre de données répertoriées (voir sources) sont proposées par les fournisseurs et applicateurs et ne sont donc pas vérifiées.

Catégorie A: Procédés basés sur une modification de la séquence d'enrobage

L'origine de ces procédés d'enrobage séquentiel se trouve dans la méthode KGO (Karl Gunnar Ohlson), développée dès 1976 pour les premiers essais. Elle repose sur la théorie de la suspension du liant, à la place d'un liant liquide comme utilisé jusqu'alors. Le principe consiste tout d'abord à enrober les gros granulats (diamètre supérieur à 2 mm environ) avec la totalité du liant. Ensuite seulement, le reste des granulats, le sable et le filler sont ajoutés. Des variantes à ce procédé (KGO-II) dans lesquelles le filler est ajouté en même temps que le liant ont également été développées. Le développement de la méthode KGO a notamment permis de diminuer la température de production de 20-30 °C ainsi que diminuer la teneur en liant pour un taux de vides comparable à un enrobé traditionnel. Le mélange bitumineux s'avère ainsi financièrement plus intéressant. Les expériences rapportent également que l'enrobé apparaît plus homogène, avec une maniabilité et compactibilité améliorée. Avec cette technique d'enrobage, les problèmes de ségrégation fréquemment rencontrés ont pu être améliorés de même qu'une meilleure cohésion, tout en maintenant les propriétés mécaniques équivalentes voir meilleures (module, résistance à la traction) [53, 54].

Cette méthode KGO a donc été par la suite développée et modifiée notamment par l'utilisation de deux liants différents afin de produire des enrobés tièdes par enrobage séquentiel. Le principe général utilisé actuellement consiste à utiliser deux types de bitumes selon la viscosité finale désirée, un premier de viscosité faible, puis un second de viscosité plus élevée. En règle générale, le ratio volumique entre le bitume de faible viscosité et celui de haute viscosité est de 1/3 : 2/3 [33].

Procédés 3E – Enrobés Environnementaux Economes en Energie

Ces procédés ont été développés au début des années 2000 par le groupe Colas dans le but de diminuer sensiblement la température de production et de pose, tout en utilisant les différents types de centrales et sans devoir y effectuer d'importantes modifications. Un accent spécifique a été mis sur l'utilisation de granulats secs, ne nécessitant pas de séchage. Ce choix très important découle du fait qu'à ces températures, une teneur en eau résiduelle ne peut être que transitoire avant de diminuer voire disparaître (vaporisation). Cependant, le laps de temps entre la fabrication et le compactage est sujet à de nombreux impondérables ne permettant pas de le délimiter de façon certaine, ce qui constitue un risque élevé. De plus, la réduction de la qualité de l'enrobage affectée par l'introduction d'eau voulait également être évitée avec le développement de ces procédés [10]. Finalement trois produits ont été développés afin de répondre aux exigences fixées:

- 3E-DB: Enrobage séquentiel avec granulats chauffés et déshydratés vers 125 °C, puis enrobés avec deux types de liants (bitume mou puis bitume dur).

- 3E-DM³⁸: Enrobage séquentiel avec granulats chauffés et déshydratés vers 125 °C, puis enrobés par un premier bitume mou, puis un second malaxage avec de la mousse de bitume dur et ajout de dope d'adhésivité. Ce procédé nécessite un système de dosage de mousse de bitume et deux citernes de stockage pour le liant.
- 3E-LT³⁹: Enrobage traditionnel mais à 125 °C. Le liant "LT" est un liant modifié par des additifs spécifiques et pulvérisé sur les granulats.

Des expériences sur section test effectuées en France en 2006 sur la RN 157 entre Le Mans et Orléans (fort trafic et agressivité) ont permis de montrer le bon comportement des enrobés 3E. Ils ont montré une bonne adhérence et de bonnes qualités d'uni et de résistance à l'orniérage en comparaison avec une section témoin ; avec cependant des performances (module) légèrement plus faible pour la section 3E-DM en raison de sa teneur en vide plus élevée suite au compactage [10].

Catégorie B: Procédés basés sur l'introduction d'eau

L'introduction d'eau est reconnue depuis longtemps comme un élément permettant de diminuer la viscosité de l'enrobé. Historiquement, le bitume Trinidad (constitué sous sa forme naturelle d'une émulsion complexe d'eau, de gaz, de bitume et de fractions minérales) est un premier exemple de bitume permettant d'améliorer la maniabilité, ceci par un effet de mousse.

Les procédés utilisés actuellement reposent sur l'addition ou la maîtrise de la teneur en eau, par contrôle de l'humidité des matériaux utilisés. Cette eau va produire une mousse au contact du bitume chaud. Ceci repose sur le principe que, à pression atmosphérique, un volume donné d'eau va augmenter d'un facteur 1.673 lors de son passage en vapeur [5].

Enrobé à base de zéolithe – Aspha-min

Eurovia a développé depuis le milieu des années '90 le procédé à base d'un additif synthétique de la famille des zéolithes (ou zéolites), l'Aspha-min⁴⁰. La zéolithe est un minéral de la famille des aluminosilicates hydratés de métaux présentant une certaine porosité. En effet, ces silicates présentent de larges espaces dans leur structure autorisant ainsi la présence de cations, tels que le sodium ou le calcium, ou alors de groupes comme les molécules d'eau. Les zéolithes présentent donc la particularité de pouvoir perdre et absorber de l'eau, ceci sans dommage à leur structure cristalline. D'un point de vue chimique, leur composition est proche de celle des argiles. La zéolithe existe sous forme naturelle (48 sortes connues) ou synthétique (plus de 150 sortes développées). La zéolithe naturelle se forme par la réaction entre les roches et cendres volcaniques avec les eaux souterraines alcalines, formation qui prend plusieurs centaines ou milliers d'années. Comme elles ne sont que rarement pures et stables à l'état naturel, les zéolithes synthétiques leurs sont généralement préférées pour les applications industrielles. Ces zéolithes synthétiques présentent l'avantage d'être pures et uniformes. De plus leur potentiel de production est presque illimité étant donné qu'elles ne font appel qu'à la silice et l'alumine ; présents en abondance sur terre.

L'Aspha-min est donc une poudre composée de cristaux de silicate d'alumine hydratés qui va libérer son eau en présence des granulats chauffés à 130-150 °C. Cette libération d'eau à température élevée va d'une part diminuer la viscosité du bitume, mais également favoriser l'enrobage et la maniabilité en produisant de la vapeur et une mousse de bitume chaud. Les fines bulles de vapeur vont créer des micropores stables dans le temps, augmentant la compactibilité et maniabilité de l'enrobé. Ainsi, un

³⁸ Ce procédé 3E-DM applique en réalité une combinaison de procédés (D) avec un enrobage séquentiel et l'introduction d'eau pour un moussage.

³⁹ Ce procédé fait appel à l'ajout d'un plastifiant sous la forme d'un liant modifié (C)

⁴⁰ Commercialisé aux Etats-Unis par Hubbard Construction Company, Orlando

enrobage à température inférieure aux enrobés à chaud est rendu possible par ce procédé. Il présente également la particularité d'être applicable à tous les types d'enrobés et de liants, avec possibilité d'ajouter de l'enrobé recyclé.

Le dosage de zéolithe est d'environ 0.3% de la masse de granulats secs, et le taux d'eau cristalline contenue par la zéolithe est d'environ 20%. Cette eau cristalline est justement libérée dans le malaxeur lors de l'injection du liant et permet d'avoir une bonne maniabilité du mélange final. Cet effet est conservé tant que le mélange est à une température supérieure à 100 °C, c'est-à-dire jusqu'à 6-7 heures après fabrication, selon les producteurs.

L'expérience acquise est maintenant relativement importante puisque les prémisses des enrobés à l'Aspha-min datent de 1995 en Europe, 2004 pour les Etats-Unis et 2005 pour le Canada. Concernant les centrales, les modifications nécessaires sont minimales et la durée de malaxage est identique aux enrobés traditionnels. Dans le cas de centrale discontinue, l'introduction est faite dans le malaxeur par un silo et doseur pondéral ainsi que par l'utilisation de sacs thermofusibles. Dans le cas de centrale continue, l'adjonction du bitume se fait par un doseur spécialement adapté et placé sur la ligne de bitume juste avant l'enrobage. Il est recommandé d'ajouter la zéolithe en même temps que le liant, manuellement ou à l'aide d'un pré-doseur. La zéolithe peut également être insérée par l'anneau de recyclage (type TSE) ou par le circuit du filler de récupération.



Figure 10-1 : Zéolithe pour enrobé à l'Aspha-min (gauche) et sacs thermofusibles pour centrale discontinue (droite) [55]

Une analyse en laboratoire ainsi qu'une application in-situ effectués par le NCAT (National Center for Asphalt Technology, Université Auburn) [15] a mis en évidence entre autre l'amélioration de la compactibilité, la réduction générale de la teneur en vides de 0.65% ainsi que de la sensibilité à l'orniérage par l'utilisation d'Aspha-min. La mise en service peut également se faire sans observer de période de cure. D'un point de vue environnemental, des mesures effectuées lors d'essais sur chantier ont permis d'établir qu'une diminution de 26 °C de la température de pose permettait de diminuer de 74% les émissions de particules ultra-fines (diamètre inférieur à 0.1 µm) [16].

Cette technologie bien qu'une des plus prometteuses présente cependant le désavantage d'avoir un coût relativement élevé.

Enrobé à base de zéolithe - Advera

D'autres procédés à base de zéolithe synthétique existent comme par exemple l'Advera, développé aux Etats-Unis par la société PQ Corporation⁴¹. Ici aussi, la nature synthétique du produit permet d'en assurer la stabilité. Ce procédé poursuit le même principe que l'Aspha-min avec une zéolithe

⁴¹ Société spécialisée dans les silicates, zéolithes et autres matériaux inorganiques à hautes performances. Elle appartient au groupe Carlyle (Washington) et est présente dans 19 pays (état déc. 2007).

synthétique libérant 18 à 21% d'eau en masse (contenue dans sa structure cristalline) à une température au-delà de 100 °C. Ceci permet de favoriser l'enrobage et la maniabilité du produit fini. La zéolithe libère son eau lors du contact avec le liant chaud (environ 0.05% en masse du mélange) sous la forme de micro-moussage contrôlé et améliore la maniabilité avec une augmentation mineure du volume de liant. Les caractéristiques intrinsèques du liant de base ne sont pas changées par l'Advera et ainsi la formulation ne nécessite pas d'être modifiée. L'Advera est ajoutée à un taux de 0.25% de la masse totale.

Ce procédé peut être utilisé sans autre avec des enrobés fermés ou ouverts, ainsi qu'avec des enrobés contenant un fort taux de RAP.

L'insertion en centrale peut se faire de différentes façons selon les quantités à produire. La poudre peut être insérée dans le malaxeur par une trappe qui sera contrôlée manuellement ou automatiquement. Il est également possible de mélanger l'Advera avec le liant avant passage dans le malaxeur. Toujours selon les quantités, le matériau peut être stocké dans des sacs (thermo-fusibles) ou dans des silos spécifiques.

Low Temperature Asphalt (LT Asphalt)

Procédé développé principalement dès 2004 par Nynas avec la coopération de quatre constructeurs de routes réunis au sein du regroupement LT-Asphalt vof (Pays-Bas) et le soutien de l'ITC (centre de test d'innovation). L'ITC est partie du DWW (actuel DVS), service de construction routière et hydraulique localisé à Delft.

Le procédé repose sur une adaptation et maîtrise du processus de séchage et de mélange. Le principe général consiste à combiner deux phénomènes [41] : dans un premier temps, un moussage du bitume est effectué par injection d'air et d'eau dans le bitume chaud. Ceci provoque une expansion du volume du bitume ainsi qu'une diminution de sa viscosité. Ce bitume-mousse peut être ensuite mélangé dans une seconde phase avec des agrégats humides à une température plus basse. De par ses propriétés thermodynamiques, le bitume va enrober en premier les fractions fines, le filler et le sable. Ainsi, en augmentant la température des agrégats à 90 °C, un enrobage complet de toutes les fractions granulaires peut être atteint. En travaillant à une température inférieure à 100 °C, les granulats ne seront alors pas totalement secs mais les gains énergétiques seront considérablement augmentés. L'humidité résiduelle sera présente sous la forme de pression de vapeur dans les vides et va ainsi "pousser" les granulats et favoriser sa maniabilité, sa mise en place ainsi que le compactage ultérieur. Par la suite, lors de la phase de compactage, la température va diminuer et l'humidité s'évaporer ou se condenser par l'intermédiaire de vides d'air connectés. L'humidité résiduelle dans les fractions minérales devra cependant être retenue à l'aide d'un filler hygroscopique (0.5 à 1% du mélange). Notons encore que le bitume utilisé est un bitume classique pour enrobés à chaud.

Concernant la centrale d'enrobage, certaines adaptations sont nécessaires, notamment au niveau du processus de séchage et d'enrobage des granulats ainsi que dans le mode d'injection du bitume (pompes volumétriques). En particulier, le développement de ce procédé a nécessité le développement d'embout résistant aux sollicitations du mélangeur à chaud. De plus, un dispositif de contrôle et modification (douches) de l'humidité du mélange est également requis. Ces modifications peuvent sans autre se faire sur tous les types de centrales à chaud.

Enrobé à Basse Energie – EBE

Procédé également appelé Low Energy Asphalt (LEA⁴²) pour l'export et qui constitue le premier procédé semi-tiède dont le brevet a été délivré début 2006. Son principe général consiste à introduire du sable humide (contenant les éléments fins du squelette minéral) après enrobage des gravillons secs (130 °C) avec le bitume chauffé à 140-180 °C. Ainsi, les fractions granulométriques sont dans un premier temps séparées en deux groupes avec d'un côté les granulats avec sable sans les fines et de l'autre le sable contenant des fines. Les granulats avec le sable ne contenant pas les fractions fines sont alors séchés et chauffés à environ 150-160 °C. Le liant est quant à lui maintenu à température "traditionnelle", selon le type de bitume. Avant injection dans la centrale, un additif est ajouté à un taux d'environ 0.2-0.5% du poids du liant (par pompe volumétrique). Les granulats chauds sont ensuite mélangés avec le liant. Notons que la part de granulats avec sable sans les fines doit constituer environ 60% du mélange. Les 40% restants sont donc constitués de sable mouillé et de fines à un taux d'humidité d'environ 3% qui est alors ajouté au mélange liant-granulats. Finalement le mélange bitumineux se forme par contact entre les granulats chauds et le mélange humide de sable et fines. Les éléments de granulométrie fine se trouvent alors enrobés et chauffés au contact avec le mélange. Le mélange final obtenu est un enrobé semi-tiède à une température inférieure à 100 °C. Le compactage est effectué entre 60 et 90 °C, les performances étant suffisantes dès que la température est inférieure à 50 °C. La maniabilité du mélange est maintenue par la présence d'humidité résiduelle (condensation).

Le choix de l'additif dont le rôle est notamment de réguler l'expansion de la mousse et favoriser l'adhésion va dépendre du type d'agrégat utilisé. Le dopage va permettre d'avoir un meilleur contact entre l'eau et le bitume chaud et éviter le déplacement par l'eau du bitume fixé aux gravillons. Cet additif peut ainsi être un dope de masse, un agent moussant, un fluxant végétal ou alors une résine végétale. Le plus souvent des mélanges d'additifs spécialement développés sont utilisés (environ 0.5% de la masse de liant)⁴³.

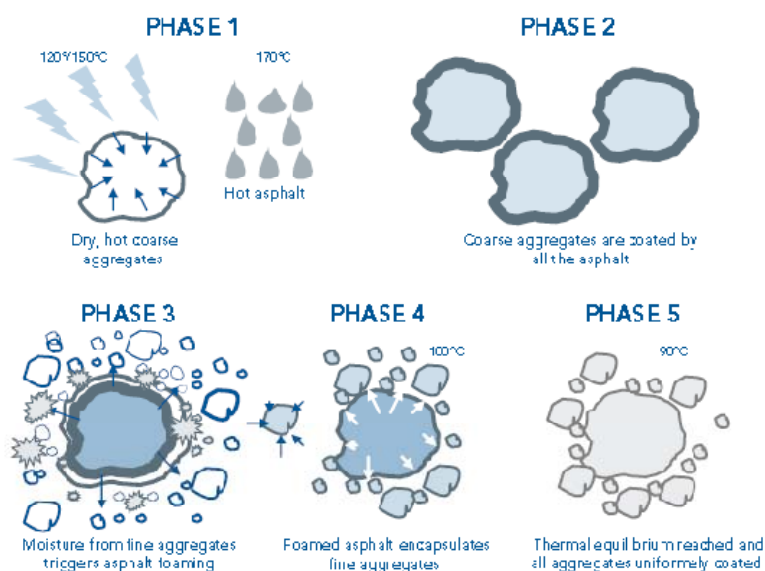


Figure 10-2 : Schéma des différentes phases de l'enrobage LEA [17]

⁴² LEA (société Lea-Co) est volontiers utilisée comme dénomination commune des EBE et EBT. Dans ce document les deux dénominations sont distinguées. Depuis 2007, LEA est commercialisé aux Etats-Unis par Mc Connaughay Technology.

⁴³ Selon email du 06.01.2009 de M. François Olard, Eiffage Travaux Publics.

La clef de ce procédé consiste donc à maîtriser le teneur en eau finale aux environs de 0.5% à 95 °C afin de garantir une bonne maniabilité durant la période de pose. Notons que le séchage "partiel" constitue également l'élément clef de l'autre procédé semi-tiède, l'EBT. Les propriétés du bitume à chaud (faible viscosité) sont donc utilisées pour l'enrobage des gravillons déshydratés, mais également le moussage du bitume lors du contact avec l'eau résiduelle du sable.

Ce procédé est applicable à tous les types de postes continus et discontinus, mais il nécessite cependant quelques équipements complémentaires. Par exemple, le sable humide est ajouté au mélange par l'intermédiaire d'un système séparé. Dans le cas où le sable est trop sec, ce dernier devra également être humidifié au moyen d'un système dédié. Une pompe volumétrique spéciale est également nécessaire pour l'ajout de l'additif LEA. Une introduction de matériaux recyclés est fréquemment effectuée à des taux pouvant atteindre 50% sur poste ASTEC "Double Barrel" et jusqu'à 25% environ dans le cas de postes continus et discontinus classiques. Ce procédé par ailleurs très répandu en France, Espagne et Amérique du Nord notamment n'a pas encore été appliqué en Suisse à ce jour.

Enrobé à Basse Température – EBT (LTA)

Ce procédé mis au point par l'entreprise Eiffage Travaux Publics est également appelé Low Temperature Asphalt (LTA) pour l'export. Le principe général consiste en un séchage partiel du squelette granulaire afin de tirer parti de l'humidité restante pour un meilleur moussage du bitume lors de l'enrobage. Ainsi, la viscosité est assurée par la teneur en eau résiduelle, mais également le recours à un additif si nécessaire. Deux procédés de séchage partiel ont été développés:

- Procédé α (1): Tous les granulats sont chauffés à 95 °C
- Procédé β (2): Une partie des granulats secs (70 à 85%) est chauffée à 130 °C et l'autre est insérée à température ambiante, avec une humidité contrôlée. Cette seconde fraction est alors introduite par un circuit spécifique.

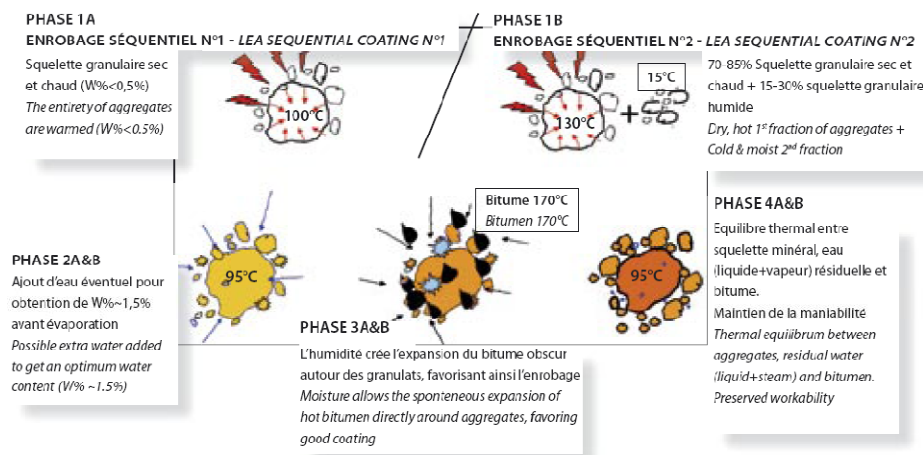


Figure 10-3: Séquences d'enrobage procédé EBT (Source: [40])

Ensuite, l'eau est ajoutée afin d'avoir une teneur totale d'environ 1.5% avant l'injection du bitume et évaporation de l'eau. Le contact entre l'eau résiduelle et le bitume va ainsi créer une mousse de bitume et son auto-expansion va favoriser l'enrobage. Un additif peut éventuellement être ajouté afin d'améliorer la qualité de l'adhésion. Le type et choix de l'additif se fait de manière analogue à celle des EBE (LEA). L'enrobé semi-tiède est ainsi préparé à environ 90 °C et le compactage se fait entre 70 et 90 °C.

Ces procédés peuvent être adaptés à tous les types de centrales (poste continu et discontinu). Selon le procédé alpha de séchage, tous les granulats sont séchés. Par contre, dans le cas du procédé beta, seule

une partie des granulats est séchée. Par conséquent, les autres granulats doivent être insérés via l'anneau de recyclage généralement présent dans le cas de postes continus. Pour des postes à séchage avec flux parallèles un système de contrôle et d'ajout d'eau peut s'avérer nécessaire. Pour postes discontinus, le procédé peut également être fabriqué avec d'éventuelles modifications mineures. Une introduction de matériaux recyclés est fréquemment effectuée à des taux pouvant atteindre 50% sur poste ASTEC "Double Barrel" et jusqu'à 25% environ dans le cas de postes continus et discontinus classiques. Ce procédé très répandu en France, Espagne et Amérique du Nord notamment n'a pas encore été appliqué en Suisse à ce jour.

Il est à relever que l'énergie de compactage peut être légèrement supérieure aux procédés traditionnels à chaud, ce qui peut nécessiter davantage de passages de compacteurs [39]

Concernant le prix des deux procédés développés entre autre par Eiffage Travaux Publics, le montant final de la tonne d'enrobé est comparable à celui d'un enrobé à chaud⁴⁴. En effet le fabricant annonce une économie de l'ordre de grandeur de 1 dollar par tonne produite, cette économie étant compensée par les dépenses nécessaires à la modification de la centrale d'enrobage ainsi que les frais d'additifs.

Procédé LEAB

LEAB (Low Energy Asphalt Concrete) est un procédé semi-tiède développé par BAM (Pays-Bas). Dans ce procédé, l'eau n'est pas ajoutée aux granulats. Le moussage se fait à l'aide d'un système spécial d'embouts rétractables. Dans chacun de ces embouts (six au total), un moussage du bitume est effectué par ajout d'eau froide au liant chaud avant mélange avec les granulats. Juste avant moussage, un additif (0.1% masse liant) est ajouté afin d'améliorer la stabilité du bitume mousse et favoriser l'adhésion. Ce procédé permet d'incorporer de l'enrobé recyclé, jusqu'à un taux de 50%. Le RAP est alors chauffé séparément jusqu'à une température de 110-115 °C. Les granulats d'origine sont quant à eux chauffés à environ 95 °C.

Ce procédé qui en est encore à ses prémises avec des expérimentations aux Pays-Bas est pour l'instant appliqué uniquement en centrales discontinues.

Procédé Double Barrel Green

Système de multi-embouts permettant de faire un moussage, développé dès 2007 par Astec Inc. Un embout consiste en une vanne pour le bitume, au-dessous de laquelle une chambre pour le mélange et réalisation du moussage sont disposés. Ainsi, l'eau entre dans le système (vanne ouverte), et est sprayée dans le bitume par quatre points dans la zone d'ébullition. Ceci va créer le moussage du bitume avant son injection sur les granulats dans le malaxeur. L'ajout d'eau est effectué par un embout spécifique à la cadence adaptée à celle de la pompe à bitume et dimensionné pour une production d'environ 50 tonnes/heure d'enrobé tiède. Une des particularités de ce système est son addition en une seule phase du bitume (moussage de tout le bitume), contrairement par exemple au procédé WAM-Foam. Ainsi, ce procédé permet de baisser significativement la viscosité de l'enrobé entre 100 et 135 °C.

La formulation des enrobés effectués avec le système Double Barrel Green est analogue à celle d'enrobés à chaud classiques. Ce système a été développé spécifiquement pour les centrale Double Barrel et il permet de s'affranchir de l'utilisation de liant modifié, additif ou dope d'adhésivité. Cependant, il nécessite l'installation du système sur la ligne d'injection du bitume existante, ainsi que l'installation de l'alimentation en bitume et en eau. Actuellement environ 130 centrales ont été équipées

⁴⁴ Selon email du 06.01.2009 de M. François Olard, Eiffage Travaux Publics.

partout dans le monde, mais principalement aux Etats-Unis. Elles ont également été vendues en Europe (Suède, Russie), Australie, Canada et Afrique du Sud⁴⁵.

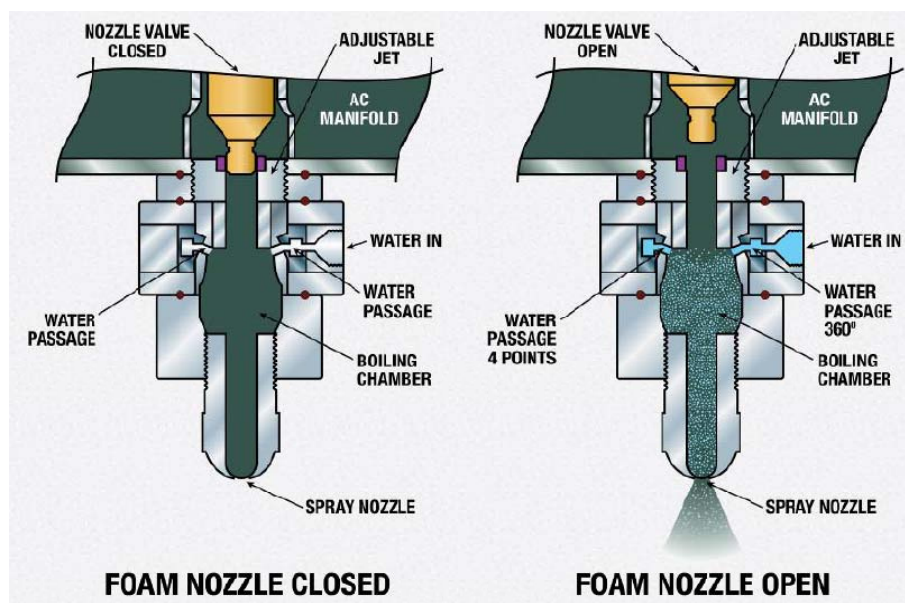


Figure 10-4 : Schéma des embouts Astec fermé (gauche) et ouvert (droite) [5]

D'autres procédés utilisant le même principe d'ajout d'eau pour un moussage existent. Nous pouvons par exemple mentionner le système « Ultrafoam GX Green Machine » développé par Gencor Industries (USA). Le principe consiste ici en un générateur de mousse de bitume, ajouté à la centrale directement sur la ligne d'injection du bitume avant arrivée dans le malaxeur. Le procédé est basé sur un système d'addition d'eau (1 à 2% en masse) et de liant afin d'obtenir de la vapeur et un moussage du bitume. Différents orifices sont utilisés pour l'eau et le bitume, le mélange se faisant juste avant entrée dans le malaxeur [56]

Un autre procédé utilisant les mêmes principes est le « Warm Mix Asphalt System », développé en 2007 par Terex Roadbuilding (USA). Cette méthode pouvant être utilisée avec toutes les formulations consiste également à ajouter à la centrale existante un système permettant de créer de la mousse de bitume, juste avant entrée dans le malaxeur. L'ajout recommandé d'eau est de 2% en masse, ce dernier pouvant cependant être varié et contrôlé. Un système de valve permet également au producteur de choisir entre une production d'enrobé à chaud traditionnel ou d'enrobé tiède par moussage du bitume. Avec ce procédé une réduction de 30 °C environ de la température de production peut être atteinte [57].

Catégorie C: Procédés basés sur la chimie

Une première catégorie de procédés est basée sur l'addition de substances organiques à l'enrobé, permettant d'en abaisser la viscosité. La plupart des polymères et hydrocarbures reposent sur un squelette d'atomes de carbones généralement noté C_x , le « x » correspondant à la longueur de la chaîne. Les additifs organiques dont il est question ici reposent en général sur des chaînes moléculaires de taille supérieure à C_{45} . On peut, par exemple, ajouter des paraffines constituées de longues chaînes d'hydrocarbures saturés constituées d'alcanes linéaires. Elles n'affectent en général pas les propriétés du bitume de base et elles peuvent être obtenues soit en raffinerie à partir du pétrole (distillation fractionnée en-dessus de 460 °C) ou alors comme sous-produit du procédé Fischer-Tropsch (ex. Sasobit). Les paraffines cristallisent de manière générale entre 80 °C et 120 °C, modifiant ainsi le comportement du bitume de base. En-dessous de la limite de 80 °C, le comportement du bitume est

⁴⁵ Selon email du 06.01.2009 de M. Swanson, Astec Industrie Inc.

modifié avec une rigidification. La température de fusion de la cire sera régie par la longueur de la chaîne de carbones, où des chaînes longues vont augmenter la température de fusion. Le choix du type de cire et de sa température de fusion sont des éléments primordiaux notamment afin d'éviter des déformations ultérieures permanentes de l'enrobé aux températures de service.

L'utilisation de cire et de liant modifié a été développée depuis la fin des années 1980. Les premières applications pratiques d'enrobés tièdes avec liants modifiés à la cire datent quant à elles de 1996 [33]. Nous présentons ici quelques exemples de cires artificielle, partiellement artificielle et naturelle modifiée ; tout en étant conscient que de nombreuses variantes existent selon les spécificités locales.

Sasobit

Procédé développé par Sasol Wax (Afrique du Sud), spécialiste des cires de paraffines (formule générale C_nH_{2n+2}) naturelles et synthétiques. Sasobit est un additif plastifiant (cire) constitué d'un mélange d'hydrocarbures à chaîne longue, obtenus par une synthèse de Fischer-Tropsch⁴⁶ (cire paraffine FT). Il ne s'agit donc pas d'un produit pétrolier et les chaînes longues sont constituées d'alcanes dont la chaîne comporte 40 à 115 atomes de carbone ce qui permet d'élever la température de fusion de la cire à environ 100 °C. Par rapport aux cires obtenues à partir du pétrole, la majeure différence réside en la structure (22 à 45 atomes de carbone pour cires obtenus à partir du pétrole) et les propriétés physiques qui en découlent. Ceci confère aux cires telles que la Sasobit une température de fusion plus élevée.

De par sa composition chimique, Sasobit présente la particularité de résister au vieillissement et à l'oxydation. Le procédé Sasobit consiste donc à ramollir le liant par fusion de paraffines (70 à 110 °C selon la cire) et solubilisation au bitume (115 °C), ce qui réduit la viscosité du bitume de base. En effet, la viscosité de la cire Sasobit est très basse à haute température (viscosité dynamique de 12 mPas à 135 °C). A la température de service, la cire va ainsi former une fine structure cristalline élastique améliorant la stabilité de l'enrobé. Aux basses températures, les caractéristiques de l'enrobé seront alors définies par le bitume de base, la cire n'intervenant quasiment pas.

Pour la production, un ajout de 3 à 5% de Sasobit par rapport à la masse du liant (2.5-3% recommandé en Allemagne, 0.8-4% aux Etats-Unis), dans un mélangeur en ligne est suffisant et ne nécessite aucune modification de la centrale. Par exemple, un ajout de 3% à un bitume 50/70 permettra d'en relever la température Anneau & Bille à un niveau supérieur à celui d'un bitume 10/20. Avec 3% de cire, la viscosité va ainsi diminuer de 15 à 20% en moyenne. Cet ajout de 3% environ va de plus permettre d'atteindre deux objectifs qui sont la réduction de la température, mais également l'amélioration de la résistance aux déformations⁴⁷. Dans le cas où l'objectif est uniquement de réduire la température et la viscosité, comme effectué fréquemment aux Etats-Unis, alors la quantité ajoutée de Sasobit peut être sensiblement réduite. Selon le type d'enrobé et le choix du liant, des effets significatifs peuvent être obtenus avec une addition de 1.5-2% déjà. L'ajout de Sasobit devra également être adapté selon la teneur en liant du fraisat dans le cas d'enrobés avec matériaux recyclés. Notons encore qu'un ajout trop important en masse pourrait avoir un impact sur le comportement à basse température du liant [13].

Comme indiqué, la Sasobit fond à environ 100 °C, une température de production de 115 °C au minimum est donc recommandée afin d'avoir une dissolution parfaitement homogène. Le compactage peut s'effectuer jusqu'à 80 °C.

⁴⁶ Réaction chimique de catalyse de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène (H₂), provenant de charbon ou gaz (depuis 2003), à 180 -280 °C et sous haute pression afin de les convertir en hydrocarbure. L'intérêt de ce procédé assez coûteux est de produire un carburant liquide synthétique.

⁴⁷ Selon email du 07.01.2009 de M. Matthias Nölting, Sasol Wax GmbH.

Sasobit peut être pré-mélangée avec le liant, mélangée en ligne à l'état fondu ou alors ajoutée durant la phase de malaxage. Il peut également être ajouté par l'intermédiaire du système d'insertion des matériaux recyclés mais il est généralement préféré d'utiliser un système spécifique afin de mieux contrôler le dosage. Le produit se présente sous la forme de sacs, de granules ou de poudre (diamètre 5 mm ou 1 mm). Une fois ajouté au liant, ce dernier reste homogène et peut être stocké plusieurs semaines en l'état. En règle générale, aucun dope d'adhésivité ne sera nécessaire et bien souvent l'ajout de Sasobit permet d'améliorer l'adhésion, élément propre aux cires FT qui n'ont pas d'impact négatif sur l'adhésion entre granulats et liant. Il a également été démontré en laboratoire avec l'utilisation de trois types de granulats (gneiss, rhyolithe, diabas) que l'utilisation de Sasobit améliore l'enrobage de l'ordre de 30% après 36 h., comparativement à un liant 50/70.

L'ajout de Sasobit permet de notablement améliorer les propriétés du matériau fini comme par exemple un bon comportement aux basses températures et une meilleure résistance à l'orniérage [21]. De plus la compactibilité est améliorée jusqu'à des températures inférieures à 90 °C, ceci en parallèle à une réduction de la teneur en vides (mesures en laboratoire). Ces mêmes études ont également relevé que des procédés tièdes comme par exemple le Sasobit pourraient augmenter la sensibilité à l'humidité du matériau. Ceci sera plus abondamment discuté lors du projet de recherche. Ce produit est en outre le plus utilisé aux Etats-Unis avec près de 250'000 tonnes posées (état 2007).

Procédé Asphaltan B

Un autre procédé industriel fonctionnant sur le même principe est l'Asphaltan B, développé par la compagnie Romonta GmbH (Allemagne). Romonta GmbH représente un marché global de 80% des cires brutes (en 2008). Ce procédé utilise une cire Montan mélangée avec des acides amides gras. La cire Montan est une cire d'hydrocarbures de haut poids moléculaire disponible et commercialisée à peu d'endroits dans le monde. En effet, la cire brute se trouve en Allemagne (Amsdorf), Europe de l'Est et quelques régions des Etats-Unis (Californie par exemple). On la trouvera dans certains types de lignite ou de charbon brun, dépôts formés au cours de millions d'années par la transformation de végétation sub-tropicale fossilisée (période tertiaire). La cire qui protégeait alors les feuilles des plantes des climats extrêmes ne se décomposa pas, mais enrichi le charbon. Après exploitation minière, la cire Montan est extraite du charbon (solvant au toluène) [13]. Contrairement à la cire Fischer-Tropsch qui est totalement artificielle, cette cire Montan utilisée dans le cas de l'Asphaltan est une cire naturelle qui sera par la suite modifiée. Les domaines d'utilisation de la cire Montan sont principalement les "polish" pour voitures (1/3 de la production mondiale), cirage pour chaussures ou encore des peintures ou lubrifiants. La cire utilisée ici diffère donc de la Sasobit principalement par le fait qu'elle est naturelle et non pas fabriquée industriellement. Son point de fusion se situe entre 82 et 95 °C.

Il est recommandé d'ajouter entre 2 à 4% en masse totale d'Asphaltan B, dans la centrale de production ou alors directement au liant de base. Elle peut également être ajoutée aux PmB (bitume modifié par des polymères).

Procédé Licomont BS 100 / Sübit

Cire d'acide amide gras développée par le spécialiste Suisse en chimie Clariant. Les acides gras sont constitués de la répétition de groupes méthylènes $-CH_2$ formant une longue chaîne d'atomes de carbone. Cette classe des acides gras contient la sous classe des amides dans laquelle le groupe $-COOH$ a été remplacé par le groupement amide $CONH_2$. La cire utilisée est donc une cire partiellement artificielle. En général les acides amides gras sont utilisés comme lubrifiants pour résines synthétiques, agent anti-bloquant,... Licomont BS 100 a l'allure d'une poudre blanche qui s'incorpore directement dans le bitume chaud avant malaxage à un taux d'environ 3% (pour un bitume 70/100) de la masse de

bitume (0.15% environ de la masse du mélange). Un dosage supérieur à 3% ne permettra pas d'améliorer les propriétés alors qu'un dosage trop faible n'aura que très peu d'effet sur le mélange. Son point de fusion est plus élevé que pour la cire Montan ou les cires FT; il se situe entre 141 et 146 °C. L'ajout de 3% de Licomont BS à un bitume 50/70 permet de passer la température Anneau & Bille d'environ 57 °C à 103 °C (améliore la stabilité thermique de l'enrobé), d'augmenter l'indice de plasticité IP de 70 à 115 et diminuer la viscosité de 1550 à 1200 mPa·s à 120 °C comparativement à ce même liant 50/70 sans ajout de cire. Ces modifications des propriétés seront bien entendu intimement liées aux propriétés du bitume de base. Selon le fabricant, il apparaît entre autres avantages une amélioration de l'adhésion entre granulats et liant ce qui rend le recours à des dopes inutile. De plus, les expériences effectuées ont montré un bon comportement à l'orniérage, ainsi qu'un bon comportement à hautes et basses températures (risque de fissuration) tout en réduisant la durée de malaxage. Les enrobés au liant modifié avec ajout de Licomont seront donc particulièrement adaptés en couche de base pour surfaces fortement sollicitées telles que arrêt de bus, pistes aéroportuaires, zone de containers,... [24].

Licomont BS 100 est livrable en sac de granules (Licomont BS 100 G), ou sous forme de poudre allant de 25 à 500 kg selon les besoins. L'addition de Licomont BS 100 peut s'effectuer directement dans le liant ou alors lors du mélange avec les granulats.

Le procédé connu sous le nom de Sübit correspond à l'utilisation d'un liant modifié avec Licomont BS 100. Il existe d'ailleurs de nombreux produits similaires utilisant les acides amides gras et Licomont BS 100 en est une des formes commercialisée.

D'autres procédés basés sur la chimie font recours à un liant spécial ou alors à un additif (émulsion) particulier. Ces types d'enrobés ne sont pas des "procédés" spécifiques fondamentalement différents des enrobés à chaud, mais ils font intervenir des éléments différents (liant, additif), dans le but de diminuer la température de production et de pose. C'est pourquoi nous les considérons ici.

Procédé Végécol (Végéclair)

Enrobé au liant de synthèse d'origine végétale, sans dérivé pétrochimique ni bitume, développé par Colas (France). Le liant d'aspect transparent (permet de produire des enrobés colorés selon le choix des granulats) a pour propriété d'avoir une viscosité plus faible que celle d'un bitume traditionnel, ce qui réduit la température d'enrobage. Il peut être appliqué à tous les types d'enrobés. La notice technique met également en évidence que les essais classiques utilisés pour l'identification des liants bitumineux ne sont pas applicables à ce liant.

Le principe général d'application est relativement simple puisque le liant de synthèse est ajouté aux granulats chauds dans une centrale d'enrobage classique. Cependant, une ligne spécifique d'introduction et de dosage du liant de synthèse doit être aménagée. La problématique de stockage du liant doit également être résolue. De plus, la réalisation d'enrobés de type Végécol dont les teintes peuvent être multiples va nécessiter un nettoyage du matériel avant utilisation.

D'un point de vue environnemental, ce procédé est très intéressant puisque d'une part il essaie de s'affranchir d'un liant bitumineux, et d'autre part il cherche à diminuer les températures de fabrication et de pose.

Au niveau des performances mécaniques, une résistance élevée à l'orniérage, à la fatigue (20% de mieux que les enrobés bitumineux classiques) et à l'action des hydrocarbures ont été observées [25].

Le développement de liants à base d'huile végétale est également une préoccupation d'autres sociétés. Par exemple, Shell Bitumen a expérimenté en 2008 des liants à base d'huile végétale de grade V10000 ainsi qu'un second liant pour la réalisation d'enduits superficiels à chaud désigné BL9000R. Ces deux

liants dont une partie du liant est remplacée par des liants d'origine végétale, ont été testés en Norvège avec des résultats prometteurs. Par exemple, il a été identifié que le liant à base d'huile végétale était moins susceptible aux variations de températures et présentait de meilleures propriétés à froid comparativement au liant de référence [58]. Ces résultats sont donc encourageants, mais le contexte particulier est également à relever. En effet, les pays scandinaves utilisent traditionnellement des liants mous de grade V (i.e. très mous) afin de pouvoir répondre aux sollicitations climatiques.

Procédé Compogreen

Développé par Screg, ce procédé utilise un liant végétal translucide. La fabrication s'effectue en centrale à chaud classique, avec cependant une ligne spécifique de dosage et introduction du liant. Ainsi, les centrales discontinues sont en général plus adaptées. Trois types de liant V existent selon l'utilisation envisagée, avec des valeurs de pénétration allant de 90-110 à 315-385 [1/10] mm.

La famille de produits Compogreen s'applique en couche mince (2 à 4 cm) pour un trafic faible. Il est principalement utilisé pour ses les zones de voirie urbaine. Relevons encore la relativement longue période de mûrissement (7 à 15 jours) avant remise sous trafic lourd et charges poinçonnantes.

Procédé Rediset WMX

Additif développé par AKZO-Nobel Surfactants dont le but, au-delà de l'abaissement de la température avec gains énergétique et environnementaux, est de répondre à la sensibilité accrue à l'humidité de bon nombre de procédés, ceci par l'utilisation d'agrégats totalement secs. En effet, la présence d'humidité empêche une bonne adhésion granulat-liant et entraîne par la suite des ruptures. Cette réflexion est au cœur du procédé Rediset qui a donc pour rôle d'améliorer cette adhésion entre les granulats et le bitume. Rediset va agir comme un pont entre le liant et le granulat, avec une modification du liant lui conférant une plus grande affinité pour le granulat comparativement à l'eau. Le produit combine des agents cationiques de surface (agent tensioactifs ou surfactif⁴⁸) permettant notamment de favoriser le mouillage des granulats par le liant, et des additifs organiques permettant de modifier le comportement rhéologique par réduction de la viscosité à la température de mélange. Il ne contient donc pas d'eau et aucune humidité n'est introduite dans le mélange. Rediset se présente sous la forme de petites "pastilles", ajoutées au liant avant le malaxage, ou alors directement dans le malaxeur. Le dosage conseillé est de 1.5-2.5% de la masse de bitume et le produit se trouve sous la forme de sacs de taille différente selon la production. De par ses propriétés d'agent tensioactif, Rediset WMX favorise également l'adhésion liant-granulat et permet de s'affranchir de dopes.

Ce procédé présente comme avantages majeurs la possibilité d'utiliser une formulation classique ainsi que l'application, sans modifications, aux différents types de centrales. La seule modification inhérente à ce type d'enrobé est la température de mélange et de compactage. Dans la majorité des cas, Rediset WMX sera pré-mélangé avec le liant, mais il peut également être ajouté au mélange, juste après addition du liant.

⁴⁸ Les agents tensioactifs ("surfactants" en anglais) ou agents de surface sont des molécules présentant deux parties de polarité différente et modifiant la tension superficielle entre deux surfaces.



Figure 10-5 : Rediset WMX [4]

Procédés de liants Classe-S

Classe de liant, appelée liant Classe-S, développée par la société pétrolière Shell. Cette technique n'est pas un procédé à proprement parler, puisque qu'elle consiste simplement à utiliser un additif particulier. Deux variantes existent de liants Classe-S. La première s'applique à températures conventionnelles dans le but de faciliter la maniabilité, d'utiliser des liants durs ou mélanges très rigides ou alors dans le cas de conditions climatiques défavorables. La seconde variante est utilisée dans le but de diminuer la température de production et de pose. C'est cette dernière qui nous intéresse dans le cadre de la présente recherche. Les propriétés physiques des liants Classe-S sont telles que la viscosité est diminuée à haute température et augmentée à basse température. Ainsi, cette diminution de viscosité aux températures de production et de compactage peut être pleinement exploitée. Ce comportement crée une courbe en "S" pour la variation de viscosité dynamique en fonction de la température, courbe à l'origine de la dénomination.

Cet additif présente notamment pour avantages de pouvoir être combiné à tous les types de liants (PmB, traditionnel...) et couches de la chaussée ainsi que de permettre une remise en service rapide. De plus, selon le fabricant, une économie de coûts de l'ordre de 10 à 30% peut être envisagée.

Procédé Mexphalte RM

Bitume spécial développé par Shell en 2007, basé sur un mélange de bitume et de caoutchouc, avec en plus une réduction des émissions de CO₂ obtenue par une diminution des températures de production et de pose. Le liant Mexphalte RM est en réalité un mélange de liant traditionnel avec un granulat spécial de caoutchouc.

Procédé Ecoflex

Procédé développé par Screg et utilisant un liant modifié breveté (liant LT) et abaissant la viscosité. Ce liant est en réalité le mélange d'un bitume pur et d'un additif, avec une teneur en liant de l'ordre de 5.1 – 5.5%. La procédure d'enrobage se déroule donc de manière identique aux enrobés à chaud, mais avec une pulvérisation du liant modifié par des additifs lors de la phase d'enrobage.

Les enrobés Ecoflex sont en outre destinés aux couches de roulement (parfois couches de base) et ceci pour tous les types de trafic. Ils s'appliquent en épaisseur de 3 à 7 cm.

Procédé Ecolastic

Procédé de Screg analogue à l'Ecoflex mais utilisant un bitume modifié.

Procédé Evotherm

Additif (émulsion) développé par MeadWestvaco Asphalt Innovations (Etats-Unis) pouvant être utilisé dans les mélanges tièdes. De manière générale, une émulsion consiste en la dispersion colloïdale du bitume (phase dispersée) dans l'eau (phase continue). La teneur en bitume varie de 40 à 80% en masse et la température d'application peut atteindre environ 90 °C. Certaines émulsions de bitume peuvent contenir un agent fluxant ou un bitume à base de polymère ou dope d'adhésivité.

L'émulsion Evotherm (appelé initialement "Emulsion Technology – ET") est un package chimique permettant d'améliorer la maniabilité avec des agents d'adhésion et émulsifiants, et utilisé lors de la production en lieu et place du liant traditionnel. Différents types existent selon les granulats utilisés, leur différence principale résidant dans les agents d'adhésion. La part de liant de l'émulsion Evotherm est de 70% en masse et la température de stockage de l'Evotherm est de 80 °C. Le principe consiste à libérer l'eau contenue dans l'émulsion sous forme de vapeur lors du mélange avec les agrégats chauds ce qui va lui procurer un aspect identique à celui de mélanges à chaud classiques. L'émulsion contenant l'Evotherm est donc par la suite mélangée avec les granulats dans la centrale de production à un taux d'environ 5% de la masse de liant.

Une recherche de laboratoire effectuée par le NCAT⁴⁹ a notamment obtenu pour résultat une amélioration de la compactibilité ainsi qu'une réduction de la teneur en vides à des températures inférieures à 90 °C. Cependant, tout comme pour les enrobés à l'Aspha-min et à la cire Sasobit, une sensibilité accrue à l'humidité a été observée lors de ces recherches, ce qui est probablement lié à un séchage incomplet. De plus, la sensibilité à l'orniérage augmente avec la diminution de température de fabrication et compacité, ce qui peut être lié au vieillissement moins important du liant. Cependant, cet effet s'est trouvé moins marqué que dans le cas de mélanges à chaud classiques [27].

L'Evotherm à l'émulsion est aujourd'hui encore utilisé, même si de nouveaux développements ont été effectués par MeadWestvaco. Par exemple, un nouveau type permettant d'injecter directement le "package chimique" avec de l'eau juste avant l'entrée dans le malaxeur a été développé dès 2005 et introduit en 2007. Ce procédé appelé DAT (Dispersed Asphalt Technology) utilise donc le même package chimique que l'Evotherm ET mais la part de liant de l'émulsion est beaucoup plus élevée que pour l'Evotherm ET. Ce procédé remplace peu à peu l'Evotherm ET.

Ainsi, les modifications en centrale sont faibles hormis l'installation de valves si elles ne sont pas déjà existantes. Les modifications seront différentes selon que le système à l'émulsion (ET) ou DAT est utilisé. Par exemple, l'émulsion doit être stockée à une température d'environ 80 °C et peut être pompée directement de la cuve qui lui est allouée. Le procédé DAT nécessitera quant à lui un point d'injection dans la ligne de production, avec pompe volumétrique. Il peut également être directement pompé depuis un camion ou une cuve et inséré dans la filière de production. Cependant, de manière générale ces modifications restent relativement faibles.

Procédé Revix

Ce procédé d'additif chimique a été développé conjointement par Paragon Technical Services at Inc. & Mathy Technology and Engineering Service. Le développement se fait selon une approche différente ne reposant pas sur un principe de moussage du liant ou de diminution de la viscosité. Le principe consiste ici à montrer que l'additif apporte une réduction de la friction interne entre les granulats et le mince film de liant mobilisé pour la production d'enrobé lorsque le mélange subi d'importants taux de cisaillement durant le malaxage et de fortes contraintes de cisaillement durant le compactage [13]. Des

⁴⁹ NCAT: National Center for Asphalt Technology, Auburn (USA)

essais rhéologiques sont ensuite utilisés afin de déterminer la température de production du mélange et la température de compaction. Des gains allant de 33 à 45 °C sont annoncés.

Des modifications en centrales ne sont pas nécessairement requises afin d'utiliser la technologie Revix, l'additif pouvant être ajouté au liant à l'aide d'une pompe.

Procédé Cecabase RT

Additif chimique à base d'agents tensio-actifs développé et testé industriellement dès 2004 par le spécialiste CECA (groupe Arkema), un leader européen des émulsifiants et dopes d'adhésivité pour bitume. Le dosage recommandé de l'additif est de 0.2 à 0.5% par tonne i.e. 2 à 5 kg/t. de bitume, à insérer directement dans le bitume de base, ceci sans effet sur le grade du bitume (même pénétration et température A&B, pas de modification de la viscosité). L'insertion d'additif dans le bitume peut d'ailleurs s'effectuer manuellement, avant injection dans le mélangeur. Ainsi, ce procédé présente entre autre l'avantage de ne pas nécessiter de modification de la procédure de fabrication, excepté une température de chauffage réduite pour les granulats (120 °C environ), le liant étant inséré à environ 160 °C. De plus, il est adaptable à tous les types de bitumes et présente une stabilité nécessaire également lors du stockage dans le bitume. Des combinaisons avec matériaux recyclés sont également possibles. L'utilisation de cet additif permet d'atteindre une maniabilité et teneur en vide proches de celle des enrobés à chaud, ceci avec une diminution de température de 40 à 50 °C.

Concernant les performances, une étude effectuée par CECA [31] a montré entre autre le très bon comportement à basse température ainsi qu'à l'orniérage en ce qui concerne les performances mécaniques. Nous pouvons également mentionner le futur potentiel de développement en combinaison avec l'utilisation de sables humide [59].

Certains procédés appliquant des bitumes fluxés⁵⁰ sont présentés ci-après, même s'ils ne sont pas des enrobés tièdes ou semi-tièdes au sens propre du terme. En effet, leur température de production est supérieure à 140 °C, comme par exemple le Bioflux R.

De manière générale, les bitumes fluxés sont une première alternative en vue de la réduction de la température. Cependant, les fluxants d'origine pétrolière ou du charbon ont un bilan environnemental très défavorable notamment en raison des composés (semi) volatils et des solvants mettant en danger la santé. Ainsi, les fluxants d'origine végétale sont une alternative prometteuse aux produits utilisés traditionnellement. Nous pouvons encore relever que le domaine général d'application de ces bitumes fluxés est plutôt celui des enrobés et enduits superficiels. Même si ces produits ne seront pas développés par la suite, il semble important de les mentionner car ils constituent une alternative intéressante de par leur recours à des fluxants d'origine végétale.

Procédé Bioflux R

Procédé de bitume fluxé développé par Eiffage Travaux Publics utilisant un liant vert anhydre dans lequel le fluxant traditionnel est remplacé par un ester d'huile végétale non volatil. Bioflux R est composé de bitume pur 70/100 et d'un ester d'huile végétale issue de l'agro-ressource. Le choix de l'huile a notamment été dicté par la viscosité finale désirée, l'adhésivité vis-à-vis des granulats et la consistance du liant à long terme. Son domaine d'application est les enduits superficiels de chaussées à trafic faibles et moyens et la pose s'effectue avec du matériel classique. La température de répandage se situe entre 150 et 175 °C.

⁵⁰ Un fluxant a pour fonction de "fluidifier" le bitume, c'est-à-dire le ramollir pendant la phase de stockage et de mise en œuvre tout en permettant une bonne montée en consistance du produit fini.

Procédé Bioflex

Enrobé développé par Eiffage Travaux Publics et utilisant un bitume fluxé modifié. Ce liant est composé d'un mélange de bitume pur, de polymère de type SBS, de dope d'adhésivité et d'un ester d'huile végétale issue de l'agro-ressource. La mise en œuvre s'effectue de façon analogue à celle d'un bitume fluxé classique et il est destiné principalement aux enduits superficiels monocouches. Ici aussi, la température de pose se situe entre 150 et 175 °C ce qui n'en fait pas à proprement parler un enrobé tiède.

Procédé Végéflux

Fluxant d'origine végétale (bio-fluxant), développé par le groupe Colas et fournissant ainsi une autre alternative intéressante aux agents fluxant traditionnels dérivés du charbon ou pétrole. Son principe est identique aux fluxants traditionnels, mais avec un souci particulier de respect de l'environnement. Un gain de près de 40% peut être envisagé pour la consommation énergétique et environ 30% pour les émissions de GES, pour un gain en température d'environ 20 °C par rapport aux enrobés à chaud traditionnels.

Catégorie D: Combinaison de différents procédés

Comme expliqué, les différents enrobés tièdes développés appliquent au moins un des principes généraux. Ainsi, certains procédés appliquent une combinaison de principes afin d'atteindre la diminution de la température de fabrication et de pose. C'est le cas par exemple du WAM-Foam. C'est également le cas, mais dans une moindre mesure, des enrobés 3E-LT et 3E-DM décrits précédemment.

Procédé WAM-Foam

Développé en 1996 conjointement par la société pétrolière néerlandaise Shell et l'entreprise norvégienne Kolo-Veidekke, WAM-Foam est commercialisé par BP Bitumen aux Etats-Unis seulement et par Shell Bitumen dans le reste du monde. Shell Bitumen a en effet racheté les droits de patente à Kolo-Veidekke et est actuellement responsable du marketing et de la vente du produit. Les premiers développements en laboratoire ont été effectués dès 1995, avec les premières applications in situ dès 2000.

Cet enrobé tiède à la mousse repose sur un enrobage séquentiel avec un bitume mou de faible viscosité (grade de type V10000⁵¹, viscosité inférieure à 0.3Pa·s à 100 °C) introduit à une température intermédiaire de 100-120 °C, puis un bitume dur (de type pen 10/20, 20/30... 70/100) introduit sous la forme de mousse ou d'émulsion. La particularité de ce procédé à la mousse réside donc en sa procédure de double enrobage dans lequel la part de bitume mou est de 20-30% de la teneur totale en bitume. La pénétration finale souhaitée va dicter le choix des bitumes mous et durs. Notons que le choix des bitumes est crucial, ceci déterminant notamment le taux de "dissolution" du bitume dur dans le bitume mou.

Les granulats sont donc tout d'abord séchés et chauffés à 110-120 °C avant d'être pré-enrobés avec un bitume mou. Ceci permet de favoriser le mouillage et l'adhésion des différentes fractions minérales. Ensuite, un second enrobage est fait avec de la mousse de bitume dur (mélange entre eau et bitume chaud à 160-170 °C) ainsi que l'ajout de dope d'adhésivité. Cette eau froide injectée à raison de 1 à 5% de la masse de bitume dur va alors s'évaporer rapidement et provoquer une expansion sous forme de mousse pouvant atteindre un volume de 10 à 20 fois supérieur à celui du bitume seul. La température finale du mélange se situe alors entre 100 et 120 °C. Un paramètre important de fabrication est le mode d'injection de l'eau (embout) ainsi que la pression d'injection, cruciaux afin d'avoir une bonne taille de

⁵¹ Les bitumes de grade mou (au delà 650/900) sont caractérisés par leur viscosité à 60 °C (EN 12591)

gouttelettes d'eau sprayées en contact avec le bitume chaud. Cette technique de mousse est très sensible et de nombreux autres paramètres tels que la température du bitume et l'expansion sont cruciaux [36]. Finalement, le malaxage de la mousse de bitume dur avec les granulats pré-enrobés avec le bitume mou permet de favoriser le mélange du tout. Comparativement à bon nombre d'autres procédés tièdes, un dope d'adhésivité ou additif quelconque n'est pas utilisé de manière systématique. En règle générale, un additif (dope d'adhésivité de type amine) est donc utilisé ceci de manière identique qu'il le serait fait pour des enrobés à chaud. Dans ce cas, le dope est ajouté au bitume mou⁵².

La Figure 10-6 illustre une variante de séquence effectuée en centrale discontinue lors de la fabrication d'une gâchée de 3.5 tonnes. Dans cette variante, les granulats de diamètre supérieur à 4 mm et le bitume mou sont donc mélangés ensemble 10 s. avant l'ajout des granulats 0-4 mm et le début du moussage.

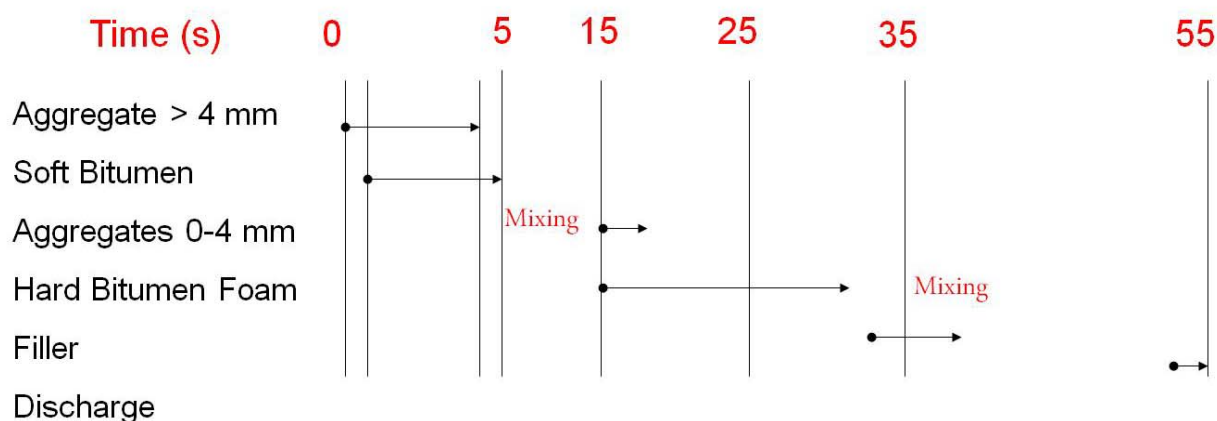


Figure 10-6 : Séquence d'enrobage type pour WAM Foam [4]

Tous les types de centrales peuvent être utilisés avec ces procédés, avec plus ou moins d'aménagements. Par exemple, une ligne spéciale pour addition du bitume dur doit être ajoutée avec un système de pesage et de contrôle, le système existant étant utilisé pour l'addition du bitume mou dans une centrale discontinue. L'eau doit également être injectée juste avant l'entrée du bitume dur dans le malaxeur avec un embout approprié. De plus, une bonne extraction d'air et un dispositif de nettoyage des buses placés dans le malaxeur doivent également être installés afin d'éviter l'encrassement entre différentes gâchées. Ces modifications sont légèrement plus aisées dans le cas de centrale continue ou par exemple il n'est pas nécessaire de nettoyer la mousse au moyen d'air comprimé étant donné que le processus se fait en continu.

Une section test effectuée à Florence [34] a notamment permis d'obtenir in situ une baisse de consommation énergétique et d'émissions de CO₂ de 35 %, et jusqu'à 60 % pour le NO_x pour une température de production de 120-125 °C. Le bon comportement mécanique du procédé WAM-Foam a également été mis en évidence lors d'essais en laboratoire avec des performances comparables aux enrobés à chaud [35].

10.1.2 Enrobés froids

Les enrobés à froid sont utilisés depuis bon nombre d'années. Le processus de fabrication, l'évolution des performances ainsi que le recul sur expérience avec ces technologies est très important. Etant

⁵² Informations complémentaires fournies par M. Eivind Olav Andersen, Technical Manager KoLo Veidekke a.s, selon email du 07.01.2009.

donné leur long passé elles font donc moins l'objet de recherches actuellement. Les technologies d'enrobés à froid ne seront pas spécifiquement détaillées dans le présent rapport, mais leur considération est nécessaire pour que nous puissions procéder à une sélection des technologies.

Nous présentons ici certains procédés afin d'illustrer les principes généraux, mais cette description ne se veut pas exhaustive au niveau des procédés. On peut définir un enrobé à froid comme *"un mélange granulaire pour lequel est utilisée au moins une émulsion de bitume, dont la préparation finale s'effectue sans chauffage, ni séchage..."* [60]. On distingue principalement deux natures spécifiques: émulsion (bitume émulsionné avec de l'eau) et mousse. Nous pouvons encore mentionner les enrobés issus de bitumes fluidifiés (au kérosène par exemple) ou fluxés (huile de charbon ou de pétrole) appelés également cut back. Ce type d'enrobé est généralement proscrit en raison de la pollution notamment [9].

Une caractéristique importante inhérente aux émulsions est la présence d'eau. Cette eau joue un rôle de lubrifiant et de dispersion du liant au jeune âge. Par injection d'eau, le volume de liant va alors augmenter d'un facteur 12 à 20 et favoriser l'adhésion du bitume aux granulats. La quantité d'eau injectée va jouer un rôle primordial dans la qualité de la mousse. Cette eau va également rendre la montée en cohésion plus lente.

Dans le cas de procédés à froid, un des problèmes principaux réside dans la "rigidité" du liant à de telles températures ce qui rend la pose et la maniabilité très difficiles. Ces techniques ne sont pas applicables aux couches fortement sollicitées.

Procédé Ecomac

Ce procédé d'enrobé à l'émulsion a été développé par l'entreprise Screg dès 1999 et les premières poses effectuées dès 2003. Environ 30'000 t. ont été posées par Screg entre 2004 et 2008. Il consiste à réchauffer de l'enrobé froid préalablement fabriqué à l'émulsion à une température finale de 50-60 °C afin de faciliter sa mise en œuvre. Ceci est effectué par le passage des matériaux dans un tube "tiédisseur" spécifique.

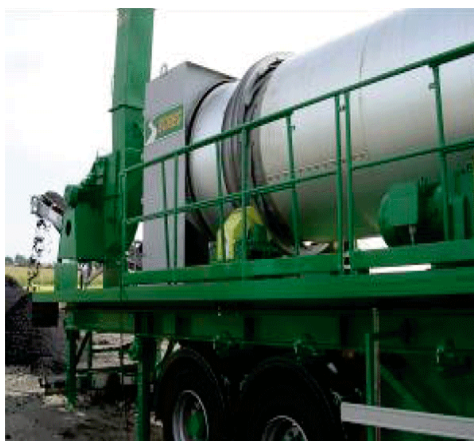


Figure 10-7 : Tube tiédisseur spécifique pour enrobé ECOMAC [11]

Une particularité commune des différents enrobés à l'émulsion réchauffés est la conservation de la température durant toute la période de mise en œuvre en raison de sa très faible inertie thermique (chute de 10 °C en 3 heures avec température extérieure de 15 °C).

Outre la maniabilité et l'homogénéité du produit fini, le procédé présente comme avantage principal l'absence de fumées et d'émissions de poussières ainsi qu'une très forte diminution de la facture énergétique par rapport aux enrobés à chaud. Il permet de plus d'optimiser certains paramètres caractéristiques de enrobés à froid tels que conditions de mise en œuvre, maniabilité, et une meilleure

maîtrise de l'eau et de la rupture de l'émulsion. Les premières expérimentations sur chantier (couches de roulement d'épaisseur inférieure à 5 cm) ont montré une bonne tenue à l'eau pour des teneurs en vide inférieures à 12% [45]. Les gains annoncés sont d'environ 34% pour ce qui est de l'énergie et 36% de diminution des gaz à effet de serre.

En ce qui concerne les centrales, des postes classiques continus et discontinus d'enrobage à froid peuvent être utilisés. L'enrobé est ensuite repris pour subir la phase de tiédissement amenant le mélange à une température proche de 80 °C [8, 45, 60].

Procédé Compomac R

Développé par Screg dès 1992, ce procédé de béton bitumineux mince à l'émulsion intègre du sable pré-enrobé à chaud et utilisé à une température telle que le mélange final atteint environ 40 - 50 °C. Il s'agit donc d'un double enrobage lors duquel on neutralise la réactivité de la fraction sableuse en protégeant les fines par une pellicule de bitume. Il s'agit en général d'un pré-enrobage à chaud de la fraction 0/2. Ce constituant prétraité est ensuite incorporé à une composition granulaire de type sable et gravillon (fraction 0/10 continue), qui sera finalement mélangée à l'émulsion d'enrobage. Deux liants distincts sont donc utilisés; un liant anhydre (bitume pur) et un liant en émulsion prépondérant dans le bilan global. La température du mélange final (sable pré-enrobé, gravillons, émulsion de bitume) est aux environs de 50 °C et il est recommandé de l'appliquer juste après fabrication afin de profiter de la bonne maniabilité. Il est cependant envisageable de l'appliquer à froid selon les utilisations spécifiques en couches de roulement.

Ce type d'enrobé n'est cependant applicable qu'aux routes du réseau secondaires (solllicitations faibles à moyenne pour trafic maximal T2⁵³), dans le cadre de reprofilage. Il s'utilise en couches minces de 3 à 4 cm d'épaisseur, minimum 1.5 cm [61].

Procédé Colormac

Enrobé froid (Screg) à l'émulsion de liant clair, destiné principalement à la réalisation de couches de surface de pistes cyclables et autres voies de circulation peu sollicitées. L'enrobé fabriqué est ensuite destiné à être appliqué dans les 24 à 48 heures selon la formulation, en épaisseur nominale de 2 cm environ.

La fabrication s'effectue de manière classique en centrale à froid avec l'utilisation d'un circuit dédié à l'émulsion [62] [63].

Procédé Biochape

Enrobé de surface développé par Eiffage Travaux Publics. Biochape est composé d'enrobés recyclés concassés (jusqu'à 100 %) et criblés afin d'avoir une granulométrie cible 0/10 continue, mélangé avec une émulsion cationique d'enrobage à rupture lente ou surstabilisée. Cette émulsion a donc pour rôle de réactiver le bitume présent dans les granulats recyclés. L'enrobé fabriqué (en centrale ou in-situ) est par la suite destiné à des couches de reprofilage ou de roulement, d'épaisseur entre 2 et 10 cm et pour un trafic faible à moyen.

Procédé Valorcol

Enrobé à froid à base de granulats d'asphalte recyclé, développé par le groupe Colas. Un taux de recyclage jusqu'à 100% peut être atteint selon les cas. Cet enrobé à froid se compose donc de fraisat (RAP), granulats d'asphalte (si nécessaire), émulsion de bitume pur ou modifié, eau ainsi que

⁵³ Selon les normes françaises, T2=150-300 MJA (trafic poids lourd journalier moyen)

d'éventuels ajouts. Le principe est celui d'enrobés à froid classique à l'émulsion, avec cependant un ajout supplémentaire d'eau. Nous pouvons relever ici la teneur en vides relativement importante (<16%).

Ce procédé présente donc différents avantages en plus des gains énergétiques (57%) et environnementaux (58% pour les GES), comme par exemple le stockage possible sur plusieurs jours ainsi que la réouverture rapide au trafic circulant. Cependant, tout comme bon nombre de procédés à froid, il présente une faible résistance au poinçonnement et aux efforts tangentiels au jeune âge ainsi qu'un temps de mûrissement relativement long. Ceci va limiter les domaines d'application et en particulier nécessiter des études spécifiques à chaque cas. Il ne sera par exemple pas utilisé pour des sections au trafic supérieur à la classe T3⁵⁴ [64].

⁵⁴ Selon les normes françaises, T3 = 50 - 150 MJA

10.2 Synthèse des interventions du workshop

Le workshop a été divisée en deux parties traitant respectivement de la situation et des besoins dans le domaine des enrobés à faibles impacts. Chacun des thèmes a été introduit au travers de deux présentations initiatrices de la table-ronde. Les idées exposées et les données avancées ici n'engagent que leurs auteurs.

10.2.1 Thématique 1: Situation dans le domaine

Deux intervenants ont été choisis dans cette première partie, ceci afin d'avoir le point de vue des fabricants de centrale, mais également d'une société pétrolière. Nous indiquons ci-après les éléments clés des présentations, base pour les discussions qui s'ensuivent.

Exposé de C. Jacobi (Ammann SA)

La présentation est principalement axée sur le procédé à froid FOAM Mix et le procédé tiède WAM Foam, ainsi que les résultats obtenus et l'acceptation par le marché.

Les procédés d'enrobage tiède sont une des principales préoccupations pour la maison Ammann, concepteur et fabricant de centrales qui s'est notamment associée dans le domaine avec Shell ainsi qu'une entreprise routière norvégienne.

Le stockage des enrobés à faibles impacts est limité dans les trémies classiques en raison du risque de compactage. Dans le cas d'enrobé à froid, ces derniers peuvent être entreposés à l'extérieur et utilisés jusqu'à 3-4 semaines après la fabrication.

Un aspect important des enrobés tièdes tels que le WAM Foam est la remise en circulation après seulement 1 à 2 heures, aspect particulièrement intéressant dans le cas de chaussées aéroportuaires par exemple. Ceci est lié d'une part à la température réduite, mais également aux caractéristiques de viscosité du produit (grâce notamment à l'emploi d'additifs).

Une expérience considérable a été acquise depuis le début des années 2000, au travers de chantiers en Suisse et à l'étranger. Concernant les postes d'enrobage, des postes classiques existants peuvent être utilisés afin de fabriquer ces technologies, mais de légères adaptations sont nécessaires. Par ailleurs, des machines classiques de pose peuvent être utilisées, aucun matériel particulier n'étant requis. La technique de fabrication en centrale est donc actuellement bien maîtrisée selon Ammann.

Pour ce qui est de la production, un recul dans la demande d'enrobés froids et tièdes est actuellement observé, ceci malgré le contexte de souci environnemental. Une des raisons invoquée est le manque de sécurité pour les clients ainsi que le fait que la technique ne soit pas explicitement demandée par le maître d'ouvrage. Cet aspect sera développé lors de la table-ronde.

Exposé de F. Beer (Shell Bitumen, Allemagne)

L'exposé décrit la situation du développement de technologies innovantes permettant de réduire la température de production et de pose: le liant Classe-S et l'enrobé tiède WAM Foam développés par Shell Bitumen.

La technologie WAM Foam permet une baisse substantielle de la température de pose alors que le bitume Classe-S permet dans une moindre mesure d'abaisser la température (de 25 à 30 °C). La détermination de la diminution de température ne peut cependant pas être déterminée de manière précise en laboratoire, ces valeurs étant relevées lors de chantiers.

Concernant le liant Classe-S, il est relevé qu'une diminution de 20 °C de la température permet de diminuer de moitié les émissions, et ceci sans modification de la centrale. Le liant avec additif est en

effet fourni au producteur d'enrobé sous forme de produit fini et déjà mélangé. Une économie des coûts allant de 10 à 15 % peut également être envisagée selon la variante de liant Classe-S.

Concernant de tels liants modifiés, on peut se demander dans quelle mesure les essais classiques de laboratoire sont adaptés. Par exemple, la température anneau & bille peut augmenter de manière significative durant la fabrication et la pose avec ces produits. En général, un changement de la température anneau & bille fournit des indications concernant un mauvais comportement au vieillissement du liant. Dans le cas de liants modifiés avec additifs cette remarque n'est alors plus valable, et nous pouvons nous interroger quant à l'interprétation de tels résultats d'essais. Une problématique importante mise en évidence consiste à analyser quels sont les essais les plus adaptés à évaluer les liants (et enrobés) à température réduite.

Il est également discuté l'effet de liants modifiés sur la viscosité du mélange. Par exemple, avec l'utilisation du liant Classe-S une diminution substantielle de viscosité peut être obtenue aux températures de production et de pose, ceci comparativement à un liant conventionnel. Par contre, l'effet est inverse aux températures d'utilisation de l'enrobé. La maîtrise de la viscosité est unanimement reconnue comme un élément clef dans la production d'enrobé tiède, ceci a notamment été démontré dans une étude du LAVOC effectuée en 2007 [65].

Commentaires concernant la situation dans le domaine

Ces présentations avaient pour objectif premier d'effectuer une brève revue de la situation dans le domaine, et d'ouvrir la discussion afin de recueillir les expériences et commentaires de chacun. Les principaux éléments abordés lors des discussions sont mentionnés ci-après:

- Concernant les **centrales d'enrobage**, l'implication de la production d'enrobés tièdes, semi-tièdes ou froids sur la cadence de production d'une centrale donnée est également à prendre en considération. En effet, certains procédés peuvent engendrer une réduction de la cadence de production ce qui aura finalement un impact sur les recettes du producteur ainsi que le prix du produit fini. Il semble crucial que le procédé choisi ait un mode de fabrication relativement simple et que l'adaptation des centrales existantes soit aisée. En plus de la cadence, la multiplicité des recettes et les adaptations nécessaires à chacune risquent également d'influer sur les centrales d'enrobé et leur productivité.

Il est mentionné que des économies d'énergie peuvent être également envisagées avec un accouplement force-chaleur et une utilisation des gaz d'échappement. Ceci a par exemple été effectué sur une centrale mobile pour l'autoroute A5 dans laquelle les gaz d'échappement et refroidissement ont été utilisés permettant ainsi d'économiser jusqu'à 20 % d'énergie.

- Un problème soulevé est celui de la **normalisation** des enrobés à faibles impacts (ou des liants modifiés comme le Shell Classe-S ou Végécol de Colas). En effet, il est difficile de comparer des offres lorsque le produit proposé n'est pas normalisé; et il n'existe pour l'instant pas de fiche technique contenant les exigences requises.

Afin de palier à cela, il pourrait être envisagé de faire une norme de produit. Ce point de vue peut cependant être critiqué car il ne semble pas indispensable que chaque produit soit explicitement normalisé, ceci entre autre afin de laisser une certaine liberté pour le développement de techniques innovantes.

Il est à relever que les différents procédés sont brevetés par les entreprises et le domaine est en pleine expansion avec la continue émergence et disparition de différents procédés. Par conséquent, il ne semble pas réaliste de s'orienter vers une normalisation de chaque produit proposé. De plus, nous nous trouvons actuellement à un tournant au niveau de la normalisation avec l'introduction des normes européennes qui procèdent notamment par une approche

performantielle des produits. Ainsi, seules les caractéristiques performantielles seront évaluées et cela donne l'opportunité de développer des produits innovants tout en répondant aux performances requises. Cette responsabilité au niveau des performances est donc un point essentiel bien que délicat à quantifier.

L'approche performantielle peut être illustrée par le système de "charte innovation" introduit en France permettant à l'administration de sélectionner des thématiques prioritaires, et sur la base de ces thèmes les entreprises sont alors interrogées afin de développer des techniques. Par la suite, ces procédés aboutissent à des chantiers expérimentaux suivis par l'administration et les entreprises.

A ce sujet, il faut alors s'interroger si les procédures de contrôle des performances actuellement utilisées (notamment pour le compactage) sont adaptées aux matériaux mis en place.

- Les **brevets** sont également à ne pas négliger dans ce type de recherche. Rappelons ici que le but du projet de recherche n'est pas de développer de nouveaux procédés, mais d'évaluer les procédés existants selon différents aspects. Par expérience les brevets ne devraient pas être un problème prioritaire, les possesseurs de brevets collaborant volontiers. De plus toute une gamme de produits aboutissant à des effets comparables existe ce qui enlève un éventuel "frein" à la diffusion des procédés.
- Il est manifeste que les aspects environnementaux interviennent dans une procédure **d'appel d'offre et adjudication**, mais le poids qui y est accordé reste toujours inférieur aux critères économiques purs. Dans le cas d'appel d'offre, il faut également relever que la longueur des chantiers en Suisse est relativement réduite. Par conséquent, l'utilisation des technologies à faibles impacts est intéressante, mais les coûts engendrés à l'amont (par les modifications en centrale notamment) risquent bien souvent de se trouver prohibitifs et ainsi ne pas permettre l'attribution du mandat. Dans le cas de chantiers de plus grande envergure, ces coûts pourraient par contre être mieux répartis et maîtrisés. Du point de vue des maîtres d'ouvrage, deux possibilités semblent s'offrir avec les procédés tièdes, avec soit une exigence au niveau de la formulation ou alors au niveau des performances du produit fini. Pour l'aspect de la normalisation des procédés et de l'approche performantielle lors d'adjudication, une procédure consistant à définir lors de l'appel d'offre les performances après un certain nombre d'années pourrait être appliquée. Ceci serait alors couplé avec un système de bonus/malus, mais tout en faisant attention à ne pas rendre le système discriminatoire. En effet, des produits ou marques ne peuvent être imposés dans les marchés publics.
- La notion de **responsabilité** en cas de problème à l'utilisation est également soulevée, notamment en regard des conditions climatiques pouvant être très difficiles en Suisse et de leur effet sur la durabilité.

10.2.2 Thématique 2: Besoins dans le domaine des enrobés à faibles impacts

Selon le même procédé que pour la première session, le second thème s'est intéressé aux besoins dans le domaine des enrobés à faibles impacts. Pour cela, il a été demandé à deux intervenants provenant respectivement de l'Office Fédéral des Routes ainsi que d'une société privée française de donner leur point de vue sur la thématique.

Exposé de H.-P. Beyeler (OFROU, Suisse)

Cet exposé a pour but de donner le point de vue du maître d'ouvrage qu'est la Confédération. Considérant qu'une diminution de 10 °C dans la température de production permet de diminuer de 1.2 % les émissions de CO₂, nous pouvons légitimement attendre un gain d'environ 5 % avec les enrobés tièdes; mais cela représente-t-il beaucoup ou peu ? Comment doit-on le considérer? Il faut alors se

demander ce que nous voulons en tant que maître d'œuvre, et ce que nous ne connaissons pas afin d'identifier les futurs thèmes de recherche.

Les problématiques primordiales pour l'OFROU sont le recyclage, la teneur en HAP⁵⁵, le bruit et naturellement les émissions tels que CO₂. Le but principal de l'OFROU est d'avoir des routes qui soient sûres et respectueuses du point de vue du bruit et de l'environnement, le tout à des coûts optimisés. Un autre aspect clé de ce gestionnaire est la mise à disposition continue des chaussées, ceci devant se faire par des chantiers engendrant une gêne minimale aux usagers.

Les exigences pour des revêtements des routes nationales se situent avant tout au niveau de la portance, de la résistance à long terme (attente jusqu'à 50 ans de durée de vie pour les couches de fondation) mais aussi de l'adhérence qui se doit d'être bonne sur toute la durée de vie, et des émissions. La recyclabilité des différents matériaux est également un élément prioritaire identifié. Ainsi, en travaillant dans le sens d'une réduction de température des enrobés, ceci devrait permettre d'aller en direction des directives de l'OFROU. Il est également mentionné qu'au sens de l'administration une réglementation serait nécessaire sous une forme encore à discuter.

Exposé de F. Olard (Eiffage Travaux Publics, France)

Dans cette présentation, trois grands axes sont abordés: la technique, les besoins au niveau matériel (centrale d'enrobage) et la politique d'innovation routière en France permettant de lancer des nouveaux types de chaussée.

L'entreprise (Eiffage Travaux Publics, LEA-Co pour l'exportation) a fait le choix au niveau des procédés de jouer sur l'humidité naturelle des matériaux pour travailler à des températures inférieures à 100 °C, le tout en conservant des performances identiques aux procédés traditionnels (orniérage, tenue à l'eau, compactibilité, module, fatigue). Dans la procédure de formulation des EBT des tests de maniabilité (maniabilimètre Nynas) et de tenue à l'eau (Duriez) sont faits dans un premier temps. Ensuite seulement, les essais plus classiques (PCG, orniérage, module et parfois fatigue) sont entrepris. Il est mis en évidence qu'un accent particulier doit être mis sur la maniabilité.

Afin de répondre à un besoin au niveau de la formulation, des plans d'expérience ont été établis pour optimiser la quantité d'eau et de fraisat dans les mélanges. En effet l'adjonction d'eau a une incidence sur les performances, et en faisant varier les différents paramètres la formulation "optimale" peut être définie. Cette formulation optimale n'est pas nécessairement celle contenant le plus fort taux de fraisat, ceci étant montré par plan d'expériences factorielles. Ces études faites par outils statistiques montrent également que l'ajout de matériaux recyclés peut permettre d'améliorer les performances de l'enrobé final. Les enrobés à très fort taux de recyclé ainsi que les combinaisons avec recyclage sont également abordées dans le cadre de cette présentation.

Les modifications effectuées en centrale afin d'appliquer les nouveaux procédés sont également décrites. Avec ces enrobés, la fabrication nécessite entre d'autre d'être plus minutieux que dans le cas de procédés à chaud classiques et pour cela il faut une procédure qui soit la plus automatisée possible. Notons que sur certaines centrales, jusqu'à 60 % d'économie d'énergie ont été obtenus pour des enrobés semi-tièdes. Un travail en partenariat a par ailleurs été entrepris avec le LCPC Nantes sur ce thème depuis 2007.

La politique française d'innovation essaie de donner une forte impulsion de la part de l'Etat pour les chantiers innovants. Pour cela des concours annuels de projets innovants sont organisés. Pour le suivi

⁵⁵ Hydrocarbures aromatiques polycycliques

de ces chantiers innovations, l'opération est effectuée par le SETRA (Service d'Etude sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements), mais le risque reste totalement à la charge des entreprises.

Commentaires concernant les besoins dans le domaine des enrobés à faibles impacts

Les deux exposés ont permis d'initier la discussion au niveau des besoins. Les principaux thèmes relevés sont:

- Les **centrales** sont indiscutablement à considérer du point de vue des modifications à effectuer selon le type de procédé (adaptation des tambours, ...). Le paquet de recherche doit se trouver en phase avec le parc de centrales existants actuellement. L'adaptation nécessaire pour les centrales plus anciennes doit également être considérée.
- La mesure des **émanations** en centrale ainsi que lors de la pose ont été débattues. La mesure en continu sur centrale est une procédure très coûteuse et c'est pourquoi en général des mesures ponctuelles sont effectuées. Ceci permettrait notamment d'optimiser le réglage des brûleurs (à fioul notamment) dont le rendement est différent selon la température de production. L'aspect santé sur chantier est également reconnu comme primordial.
- Dans la logique de **développement durable**, il ne peut être envisagé de jeter les matériaux. Ainsi, la combinaison des technologies tièdes avec le recyclage doit être analysée. Ceci est également soutenu par des arguments énergétiques et économiques; 1 tonne d'enrobé contenant actuellement environ 30 CHF de bitume.
- Bon nombre d'articles et papiers de conférence décrivent les différentes technologies respectueuses de l'environnement. Cependant, les **performances** ne sont pas ou peu abordées. Ces aspects dont la sensibilité à l'eau des mélanges, la résistance à la fatigue ainsi que le vieillissement du bitume mériteraient de s'y attarder lors de la recherche. Une étude interne au Lavoc [50] a permis d'obtenir de premiers résultats intéressants, notamment concernant le bitume ne vieillissant pas (ou très peu) avec les procédés tièdes, ce qui a par la suite d'importants impacts sur le comportement mécanique. Il s'avère également que ces techniques sont très exigeantes avec de nombreux paramètres discriminants ce qui nécessite de plus amples études en laboratoire dans un premier temps, mais également in situ. Un outil de **prévision des performances** ainsi que de leur évolution sur le long terme (comparativement à des procédés classiques) est nécessaire. Ce dernier devrait également permettre de mettre en relation les essais de laboratoire avec les performances qui peuvent être attendues in-situ, par exemple au travers de sections test. Comme mis en évidence lors des présentations, l'aspect optimisation des performances est au cœur des besoins avec les enrobés à faibles impacts énergétiques et écologiques. Un bon compromis est également à trouver selon les conditions climatiques tantôt froides ou chaudes.
- L'**acceptation par les maîtres d'œuvre** est un élément clef afin de pouvoir appliquer toujours plus ces technologies innovantes. C'est pourquoi un important aspect est la promotion de la recherche et du produit au travers de conférences, démonstrations, etc. La publication seule d'un rapport de recherche n'est pas suffisante en vue d'une acceptation dans un large spectre. Cette procédure d'acceptation est à très long terme et doit être démarrée dès la phase initiale du projet.
- Les aspects environnementaux des différents procédés ainsi que des additifs sont également soulevés. Il est important d'analyser le **cycle de vie** de manière exhaustive. Un processus de bilan global des produits est reconnu comme nécessaire. Il serait notamment intéressant de tenir compte de la recyclabilité des matériaux dans leur cycle de vie. Par exemple, un enrobé

tiède dont le liant vieillit moins aurait très certainement un potentiel de recyclage plus important en comparaison avec un enrobé bitumineux classique.

- En lien avec les objectifs et besoins de l'OFROU, la **stratégie de maintenance** des chaussées selon UPlaNS ("Conditions à respecter pour la planification de l'entretien des routes nationales", crée afin de diminuer le nombre de chantier sur les routes nationales en planifiant un entretien au maximum tous les 10 ans ainsi que la longueur et l'espacement entre chantiers) est discutée. Une variante proposée est d'augmenter la fréquence des travaux de maintenance, mais effectuer ceci pour des tronçons moins étendus et durant la nuit en lieu et place de grandes sections fermées pendant plusieurs semaines (technique de "chantiers furtifs" appliquée en France). Ce concept serait alors à développer en prenant en considération le temps de cure des procédés.

10.3 Liste des participants au workshop



Workshop "Enrobés à faibles impacts énergétiques et écologiques"

Liste des orateurs et invités

ORATEURS

Frank	Beer	Shell Bitumen	Hambourg (All)
Hanspeter	Beyeler	Office Fédéral des Routes	Berne
Nicolas	Bueche	EPFL-LAVOC	Lausanne
André-Gilles	Dumont	EPFL-LAVOC	Lausanne
Christian	Jacobi	Ammann SA	Langenthal
François	Olard	Eiffage travaux publics	Corbas (FR)

INVITES

Christian	Angst	IMP Bautest SA	Oberbuchsitzen
Jean	Beauverd	COLAS Suisse SA	Lausanne
Jacques	Béguin	Prebit SA	Fleurier
Philippe	Bessire	Ammann SA	Langenthal
Dieter	Bosshardt		Aquila
Pierre-Alain	Bueche	Bieri & Grisoni SA	La Chaux-de-Fonds
Tony	Bühler	Infralab SA	Romanel s/Lausanne
Michel	Buro	INFRA	Sierre
Jean-Luc	Gaultier	COLAS France	Magny les Hameaux (FR)
Martin	Hugener	EMPA	Dübendorf
Alain	Jacot	SACR SA	Zürich
Carlo	Mariotta	Président commission fédérale de recherche	Brione sopra Minusio
Jacques	Perret	NibuXs	Renens
Michel	Pittet	EPFL-LAVOC	Lausanne
Sibylle	Ruprecht	International Road Federation (IRF)	Genève
Eric	Simond	Service des routes	Lausanne
Frank	Steiner	Hans Weibel AG	Berne
Marguerite	Trocme	Office Fédéral des Routes	Berne
Adrian	Zippo	Nynas Bitumen	Zug

Figure 10-8: Orateurs et invités au workshop

10.4 Appel d'offre du paquet de recherches

DONNEES GENERALES

Titre du paquet de recherches

Projet VSS 2010/XXX : Potentiel et analyse des enrobés tièdes (PLANET)

Nécessité de la recherche

La technique routière peut contribuer notablement à la réduction des gaz à effet de serre en produisant des revêtements bitumineux à plus faible température. Plusieurs procédés apparus récemment présentent des bilans favorables de réduction de la consommation d'énergie et des émissions de polluants.

Avant de promouvoir ces techniques et avant de pouvoir les appliquer largement, il est nécessaire d'évaluer les performances. Ce paquet de recherches va fournir aux administrations et aux entreprises un outil d'évaluation, sous de multiples aspects, des technologies innovantes existantes. Une décomposition de la recherche en projets spécifiques traitant chacun d'une problématique particulière est proposée, qui considère l'ensemble de la durée de vie de la chaussée.

Objectif du paquet de recherches

L'objectif général du paquet de recherche consiste à fournir aux acteurs de la construction routière des bases scientifiques et techniques pour la mise en œuvre des enrobés à faibles impacts énergétiques et écologiques en Suisse.

Structure du paquet de recherches

L'analyse détaillée effectuée dans le cadre du projet de recherche VSS 2008/502 « Projet initial – Enrobés à faibles impacts énergétiques et écologiques » a conduit à l'organisation explicitée ici. Les recherches spécifiques suivantes sont proposées:

- RS-0 : Pilotage et synthèse (attribué)
- RS-1 : Impacts sur les centrales d'enrobage
- RS-2 : Bilan énergétique et écologique lors de la fabrication
- RS-3 : Formulation et optimisation des performances
- RS-4 : Durabilité et vieillissement
- RS-5 : Modèle global d'évaluation
- RS-6 : Exigences et contrôle qualité
- RS-7 : Hygiène au travail

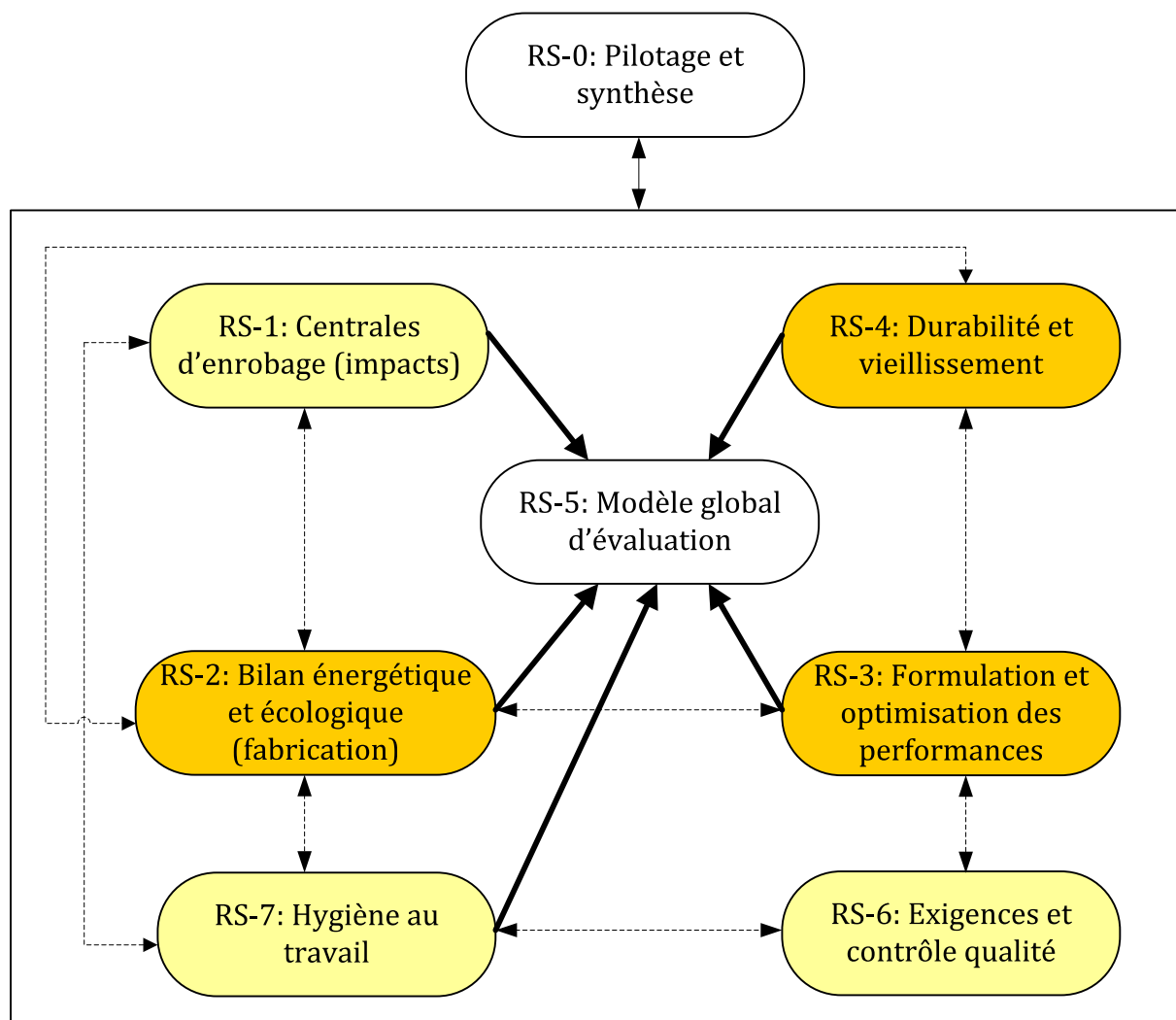
Les recherches spécifiques RS-1 à RS-7 font l'objet d'un appel d'offre.

Dans le cadre de ce paquet de recherches, différents procédés seront testés:

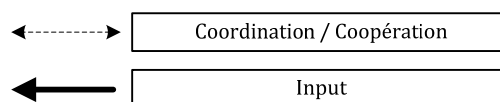
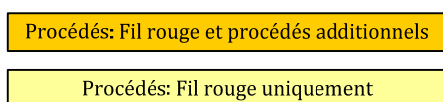
- Fil rouge : 4 procédés différents tièdes (enrobage séquentiel, introduction d'eau, cire, combinaison de principes)
- Procédés additionnels : 3 procédés différents tièdes (semi-tiède, liant vert, package chimique)
- Mélange de référence à chaud

Ces différents procédés ont été sélectionnés dans le cadre du projet initial. Ils seront fabriqués en centrale ou en laboratoire selon les recherches spécifiques concernées. Le choix final des produits ainsi que de la centrale d'enrobage sera effectué par la commission d'accompagnement sur la base des propositions du projet initial.

L'organisation générale se présente ainsi :



Légende:



Délais

Publication dans « Routes et Trafic » : XXX

Délai pour remise des offres : XXX+2 mois

Début probable des travaux : YYY

Publications probable du rapport final : YYY+36 mois

Instance d'évaluation des offres

L'évaluation des offres et l'adjudication est effectuée par la commission d'accompagnement du projet initial VSS 2008/502.

Bénéficiaires des résultats de la recherche

Ce paquet de recherches a pour bénéficiaires l'ensemble des acteurs du domaine (maître d'ouvrage, entrepreneurs, bureaux d'ingénieurs, chercheurs, administrations...). Les résultats permettront en outre d'être utilisés au profit de la normalisation VSS.

Critères d'évaluation

L'évaluation des offres est effectuée en accord avec les recommandations VSS 641 001-3, VSS 641 001-4 et VSS 641 001-5. En outre, l'instance d'évaluation considère les critères suivants :

- Respect des conditions de base de l'appel d'offre et du projet initial
- Respect des objectifs fixés
- But et objectifs de la recherche spécifique
- Analyse bibliographique pour la recherche
- Nécessité de la recherche
- Justification de la méthodologie
- Programme de travail proposé
- Atteinte des résultats attendus
- Expérience du soumissionnaire
- Montant de l'offre et respect de l'estimation du budget

Informations complémentaires pour les offres

Des informations détaillées relatives au paquet de recherches peuvent être obtenues dans le rapport de recherche VSS 2008/502 « Projet initial – Enrobés à faibles impacts énergétiques et écologiques » qui constitue la base de la recherche.

Par ailleurs, un candidat à une recherche spécifique doit seul réaliser au moins 70% des travaux (moins de 30% en sous-traitance).

RS-1 : IMPACT SUR LES CENTRALES D'ENROBAGE

Contexte et thème

La fabrication d'enrobés tièdes en centrale d'enrobage peut nécessiter d'importantes modifications non seulement au niveau de son infrastructure et de son organisation, mais également dans sa calibration. Ces modifications et par conséquent leurs coûts associés sont différents selon le type de centrale et les procédés tièdes considérés. Ces aspects seront analysés dans cette recherche spécifique.

Objectifs

Cette recherche spécifique a pour objectif d'analyser l'impact de la fabrication des enrobés tièdes sur les centrales d'enrobage. Ceci concerne tant les modifications nécessaires selon les différents types de procédés que les conséquences sur la cadence de production. Une analyse des effets sur les émissions de la centrale est également attendue. Finalement, une analyse coût-bénéfice pour quelques situations typique du marché suisse sera conduite.

Méthodologie

Dans cette recherche spécifique, un recueil et une analyse de données auprès de centrales de production seront conduits. Des mesures d'émissions de la centrale seront également effectuées lors de la production d'enrobés tièdes et de l'enrobé de référence utilisés dans le cadre de cette recherche.

Résultats attendus

- Analyse critique de l'état des connaissances.
- Analyse du parc de centrales existantes en Suisse et de son évolution.
- Prise de contact avec des centrales de production (deux à trois centrales) représentatives du marché suisse et recueil de données pour une analyse des impacts sur la production, la consommation énergétiques et les émissions de la centrale.
- Mesures et analyse des émissions à la centrale lors de la production d'enrobés tièdes (un procédé fil rouge) ainsi que lors de la production d'un enrobé de référence.
- Analyse des possibilités techniques de modifications et adaptations d'une centrale pour application des procédés tièdes. Prise en considération de l'ajout de matériaux recyclés (à chaud – à froid).
- Evaluation des incidences de la production tiède sur la cadence de production (notamment calibration du brûleur).
- Méthodologie d'analyse coûts-bénéfices pour une centrale d'enrobage et exemple de calcul.
- Méthodes de suivi et de contrôle des centrales d'enrobage d'un point de vue énergétique et écologique.
- Recommandations énergétiques et écologiques pour une production efficace en centrale. Considérations des aspects liés à l'ajout de matériaux recyclés.
- Bases de la normalisation dans le domaine
- Orientation de la commission de suivi, rédaction d'un rapport intermédiaire et d'un rapport final.

Estimation des coûts

Début probable des travaux : mois 0

Durée de la recherche spécifique : 24 mois

Estimation du budget : 140'000 CHF

RS-2 : BILAN ENERGETIQUE ET ECOLOGIQUE LORS DE LA FABRICATION

Contexte et thème

Un des principaux avantages liés aux enrobés tièdes réside dans leurs gains énergétiques et écologiques annoncés par les différents fabricants. Ces aspects énergétiques et écologiques sont un élément clé dans le processus de décision et se doivent d'être évalués en regard des enrobés traditionnels à chaud.

Objectifs

L'objectif de cette recherche spécifique consiste à effectuer un bilan énergétique et écologique global des technologies tièdes par des mesures ainsi que l'analyse critique de modèles théoriques adaptés. Un bilan écologique et énergétique global des différentes familles de procédés est finalement attendu.

Méthodologie

La méthodologie générale proposée consiste à effectuer une analyse et comparaison des différents procédés d'enrobés tièdes, mais également la comparaison avec le mélange de référence à chaud.

Le bilan énergétique sera conduit par des mesures en laboratoire de l'énergie nécessaire à la fabrication, malaxage et compactage. Les données relatives au bilan énergétique obtenues seront également analysées et critiquées en regard des éléments fournis par la « RS-1 : Impact sur les centrales d'enrobage ».

Le bilan écologique des enrobés tièdes sera principalement effectué par des mesures d'émissions de l'enrobé bitumineux après fabrication en centrale d'enrobage. Dans la mesure du possible, des mesures d'émissions en laboratoire peuvent également être proposées.

Les procédés suivants sont considérés pour cette recherche spécifique :

- Fil rouge: fabrications en centrale et en laboratoire
- Procédés additionnels: fabrications en laboratoire

Résultats attendus

- Analyse critique de l'état des connaissances.
- Bilan énergétique (fabrications en laboratoire):
 - Définition et analyse de sensibilité des paramètres à mesurer ;
 - Mesure de l'énergie de production en laboratoire et analyse de la représentativité par rapport à la production en centrale ;
 - Mesure par une méthode de laboratoire appropriée de l'énergie de compactage ;
 - Analyse critique des méthodes de mesures et leurs incertitudes ;
 - Optimisation énergétique de la fabrication et mise en œuvre ;
 - Analyse et critique de modèles énergétiques existants ;
 - Bilan énergétique des procédés et recommandations.
- Bilan écologique (fabrications en centrale):
 - Définition et analyse de sensibilité des paramètres à mesurer;
 - Analyse des valeurs limites au niveau national et international (collaboration RS-1);
 - Mesure des émissions du mélange lors de la production en centrale directement à la sortie du malaxeur;
 - Evolution des émissions du mélange à différentes températures lors de la production en centrale;
 - Analyse critique des méthodes de mesures et de leurs incertitudes ;
 - Optimisation écologique de la production en centrale;

- Analyse et critique de modèles de calcul d'émissions existants ;
- Modèle de calcul écologique et analyse selon les données mesurées en centrale ;
- Bilan écologique des procédés et recommandations.
- Considérations générales concernant l'effet d'un ajout de matériaux recyclé sur les bilans énergétiques et écologiques.
- Analyse coût-bénéfice relative aux émissions et consommation énergétique.
- Orientation de la commission de suivi, rédaction d'un rapport intermédiaire et d'un rapport final.

Estimation des coûts

Début probable des travaux : mois 0

Durée de la recherche spécifique : 24 mois

Estimation du budget : 250'000 CHF

RS-3: FORMULATION ET OPTIMISATION DES PERFORMANCES

Contexte et thème

La fabrication d'enrobés tièdes nécessite une très grande maîtrise de la viscosité aux températures de production et de pose. Pour cela, l'utilisation de différents additifs chimique, cires ou encore l'ajout d'eau sont nécessaires. Ceci n'est pas sans incidence sur la formulation qui se doit d'être analysée et le cas échéant optimisée.

Objectifs

Cette recherche spécifique a pour objectif principal d'analyser les incidences d'un procédé d'enrobé tiède au niveau de la formulation et des performances mécaniques à court terme, lors de la montée en performance, ceci comparativement aux enrobés traditionnels à chaud. Le but est donc de répondre aux questions suivantes :

- Quels seront les paramètres à considérer lors de la formulation ?
- Comment optimiser les performances ?
- Les outils de formulation classiques peuvent-ils sans autre être adaptés aux enrobés tièdes ?

Cette recherche spécifique sera également en charge de l'organisation des fabrications en centrales avec le support de la RS-0 : Pilotage et synthèse.

Méthodologie

Suite à une analyse complète des expériences de poses d'enrobés tièdes, la formulation et optimisation des performances sera effectuée par des essais de laboratoire. Un accent particulier sera mis sur les propriétés non validées ou potentiellement critiques.

Pour les différents essais de cette recherche spécifique, les procédés suivants sont considérés :

- Fil rouge: fabrications en centrale et en laboratoire
- Procédés additionnels: fabrications en laboratoire

Cette recherche spécifique est également en charge de la fabrication en centrale des enrobés du fil rouge. Ceci comprend :

- Libellé de la fabrication en centrale.
- Coordination avec RS-1 et RS-2 pour les mesures lors de la production.
- Organisation et acheminement des mélanges aux différents laboratoires partenaires.

Cette recherche spécifique fournira également des résultats et analyses concernant l'ajout de matériaux recyclés dans la formulation. Pour deux mélanges du fil rouge, le recyclage (à chaud) à des taux de 20% et 50% (en masse de granulats) sera considéré.

Résultats attendus

- Analyse critique de l'état des connaissances.
- Inventaire et analyse critique de l'état structurel et fonctionnel des chantiers réalisés à ce jour en Suisse avec des enrobés tièdes. Recommandations préliminaires pour l'optimisation des performances.
- Détermination des caractéristiques mécaniques critiques de l'enrobé tiède notamment au-travers de recherches bibliographiques et expériences diverses.
- Analyse en laboratoire et quantification de l'impact sur la formulation et les performances à court terme (montée en performance) des caractéristiques mécaniques critiques de l'enrobé.

- Analyse détaillée des méthodes d'évaluation en laboratoire des performances mécaniques déterminantes relevées précédemment. Evaluation de la compatibilité des méthodes traditionnelles avec les enrobés tièdes.
- Analyse des caractéristiques des liants utilisés et de la maîtrise de la viscosité.
- Optimisation de la formulation d'enrobés à faibles impacts:
 - Formulation et optimisation selon au moins une méthode traditionnelle sélectionnée.
 - Mesure et analyse des performances mécaniques sélectionnées pour les différents mélanges.
 - Analyse des gains en températures (coordination avec RS-2) en regard des performances mécaniques.
 - Considérations sur l'évolution des propriétés au jeune âge et montée en performance.
 - Impacts sur la formulation – intégration dans un outil de formulation.
- Recommandations relatives à la formulation et l'optimisation des performances
- Bases de la normalisation dans le domaine
- Orientation de la commission de suivi, rédaction d'un rapport intermédiaire et d'un rapport final.

Estimation des coûts

Début probable des travaux : mois 3

Durée de la recherche spécifique : 24 mois

Estimation du budget : 260'000 CHF dont 40'000 CHF pour les fabrications en centrale.

RS-4 : DURABILITE ET VIEILLISSEMENT

Contexte et thème

Les enrobés tièdes ne sont appliqués que depuis une dizaine d'année pour les plus anciennes technologies. Ils sont de plus en continuel développement. Ainsi, une analyse approfondie de la durabilité et du vieillissement est indispensable avant une application à large échelle.

Objectifs

Cette recherche spécifique a pour objectif majeur l'investigation des propriétés à long terme des enrobés tièdes. La durabilité et le comportement de l'enrobé au vieillissement seront notamment analysés.

Méthodologie

La méthodologie se base sur une analyse approfondie en laboratoire des caractéristiques mécaniques. Comparativement à la recherche spécifique précédente (RS-3) dont l'objet est les propriétés à court terme, les essais se focaliseront ici sur la durabilité et le vieillissement.

Dans cette recherche spécifique, les procédés suivants sont considérés :

- Fil rouge: fabrications en centrale et en laboratoire
- Procédés additionnels: fabrications en laboratoire

Des comparaisons pourront être effectuées avec la RS-3. Les essais de fatigue étant particulièrement longs, des options avec essais de fatigue uniquement sur les procédés du fil rouge peuvent être envisagées.

Résultats attendus

- Analyse critique de l'état des connaissances.
- Analyse de la durabilité des enrobés tièdes :
 - Analyse critique des modèles de comportement des enrobés bitumineux à la fatigue ;
 - Analyse critique des modèles d'orniérage des enrobés bitumineux ;
 - Essais de fatigue pour les différents enrobés tièdes ;
 - Recommandations concernant un modèle d'évolution des enrobés tièdes testés à la fatigue ainsi qu'à l'orniérage ;
 - Evaluation des résultats du comportement à la fatigue sur des calculs de durée de vie d'une chaussée.
- Analyse du comportement au vieillissement des liants et enrobés tièdes :
 - Sélection d'une méthode de vieillissement du liant normalisée, adaptée aux procédés tièdes et semi-tièdes (<100 °C) ;
 - Vieillissement en laboratoire du liant des différents procédés ainsi que du mélange de référence ;
 - Evaluation des paramètres caractéristiques du liant (coordination RS-3) ;
 - Considérations sur l'évolution des propriétés du liant au cours du processus de production et de pose ainsi qu'à long terme ;
 - Analyse critique des méthodes de prédiction de l'évolution des caractéristiques testées en laboratoire ;
 - Etablissement de recommandations concernant un modèle d'évolution du vieillissement des liants utilisés.

- Sélection d'une méthode de vieillissement d'enrobé bitumineux tièdes fabriqués en laboratoire par une méthode ne générant par une excitation des molécules d'eau ;
 - Vieillissement en laboratoire des échantillons d'enrobé ainsi que du mélange de référence ;
 - Essais de durabilité sur matériau vieilli ;
 - Considérations sur l'évolution des propriétés du mélange au cours du processus de production et de pose ainsi qu'à long terme ;
 - Analyse critique des méthodes de prédiction de l'évolution des caractéristiques testées en laboratoire ;
 - Etablissement de recommandations concernant un modèle d'évolution du vieillissement des enrobés utilisés.
- Analyse du potentiel de recyclabilité des enrobés tièdes – multi-recyclage. Considérations particulières relatives à l'ajout de matériaux recyclés ainsi que le multi-recyclage.
 - Bases de la normalisation dans le domaine
 - Orientation de la commission de suivi, rédaction d'un rapport intermédiaire et d'un rapport final.

Estimation des coûts

Début probable des travaux : mois 12

Durée de la recherche spécifique : 24 mois

Estimation du budget : 280'000 CHF

RS-5 : MODELE GLOBAL D'EVALUATION

Contexte et thème

Les enrobés tièdes font apparaître différents gains par exemple énergétique ou écologiques. Cependant, leurs performances mécaniques ou encore les modifications en centrale nécessaires se doivent d'être considérées dans un bilan global. L'outil permettant une évaluation globale de ces technologies innovantes afin d'en faciliter la procédure d'évaluation n'existe pas encore.

Objectifs

L'objectif de cette recherche spécifique est de fournir un modèle d'évaluation de procédés tièdes ainsi qu'une validation au travers des résultats obtenus dans les autres recherches spécifiques. Ce modèle global d'évaluation a pour but de fournir une aide et un support aux administrations et entreprises afin que cette démarche puisse être adaptée et insérée dans leurs processus décisionnel.

Méthodologie

La méthodologie se base sur une analyse de modèles et méthodes existants, puis le développement d'un modèle global d'évaluation adapté aux technologies tièdes. Dans le cadre de ce modèle, l'ensemble du cycle de vie des enrobés sera considéré ; du matériau granulaire de base à l'enrobé final qui sera détruit et éventuellement recyclé.

Le modèle sera par finalement calibré et évalué à l'aide des données d'entrées fournies par les autres recherches spécifiques.

Résultats attendus

- Analyse critique de l'état des connaissances.
- Analyse des procédures d'appel d'offre dans le cas d'enrobés écologiques. Méthodes de valorisation du point de vue du développement durable.
- Evaluation et analyse de calculateurs partiels existants.
- Caractérisation des techniques du point de vue du développement durable :
 - Développement d'une analyse multicritère des technologies comprenant notamment : consommation énergétique, émissions, utilisation de ressources naturelles, performances mécaniques, pose, économie, potentiel de recyclage...
 - Mise au point d'une systématique de pondération et établissement de recommandations notamment concernant les critères discriminants et valeurs limites.
 - Intégration des différents éléments et mise au point d'un programme démonstrateur (outils d'aide à la décision) convivial permettant d'effectuer cette analyse. Cet outil (modèle global d'évaluation) devra entre autre permettre à son utilisateur d'entrer les critères souhaités ainsi que leur pondération.
 - Validation du modèle d'évaluation à l'aide des résultats obtenus dans le cadre des autres recherches spécifique RS-1, RS-2, RS-3 et RS-4.
- Orientation de la commission de suivi, rédaction d'un rapport intermédiaire et d'un rapport final.

Estimation des coûts

Début probable des travaux : mois 12

Durée de la recherche spécifique : 24 mois

Estimation du budget : 120'000 CHF

RS-6 : EXIGENCES ET CONTROLE QUALITE

Contexte et thème

Les méthodes actuelles de contrôle (de pose par exemple) utilisées lors de la réception de chantiers d'enrobés à chaud sont limitées et leur validité largement débattue. Une analyse critique de ces méthodes dans le cadre d'enrobés tièdes doit donc être effectuée afin d'analyser la compatibilité des différentes méthodes et les éventuelles adaptations requises.

Objectifs

L'objectif de cette recherche spécifique est de développer les méthodes de contrôle qualité ainsi que leurs exigences. Pour cela, la compatibilité de ces méthodes avec les enrobés tièdes devra être évaluée.

Méthodologie

Cette recherche spécifique comprend d'une part une analyse des méthodes de contrôle de pose et de vérification des exigences utilisées actuellement ainsi que la mesure lors de la construction des planches d'essais.

Les procédés considérés dans cette recherche spécifique sont les procédés du fil rouge, fabriqués en centrale.

Cette recherche spécifique comprend donc la réalisation de trois planches d'essai in situ en enrobés tièdes, en collaboration avec la RS-7. Par ailleurs, les entreprises privées qui commercialisent ou produisent les procédés seront partenaires du projet sous forme de prestations en nature.

- Lieu à définir proche de la centrale. Une proposition de localisation des planches d'essais est à l'étude ;
- Construction de planches pour trois technologies tièdes (fil rouge) à convenir conjointement avec RS-7 (SN 640 434);
- Dimensions minimales 300 m. x 3.5 m avec une épaisseur de couche minimale de 6 cm (1000 m² de surface minimale et 100 t selon norme) ;

Cette recherche spécifique est également en charge de la construction d'une planche d'essai en conditions contrôlées (température, humidité, sollicitations). Ces essais vont notamment permettre d'effectuer des cycles thermiques sévères et d'analyser le comportement à l'orniérage ainsi qu'à la fatigue comparativement à une superstructure référence :

- Halle Fosse ou équivalent ;
- Une planche d'essai pour une technologie tiède du fil rouge, type d'enrobé analogue aux planches d'essais in-situ (technologie du fil rouge) ;
- Sollicitation avec simulateur de trafic lourd. Degré de sollicitation à proposer.

Si la nécessité est démontrée dans le cadre du paquet, une recherche complémentaire de suivi des planches comparatives à long terme pourrait alors être proposée dans une démarche indépendante.

Résultats attendus

- Analyse critique de l'état des connaissances.
- Analyse des différentes méthodes de contrôle qualité et les exigences relatives aux matières premières, processus de fabrication, pose, compactage, maniabilité...
- Critique des méthodes de contrôle qualité existantes et établissement de recommandations pour l'application aux enrobés tièdes.

- Elaboration d'exigences relatives aux procédés tièdes concernant les matières premières, la fabrication, la pose, le compactage et la maniabilité.
- Organisation de la construction de trois planches d'essai in situ en enrobé tiède et mesures sur planches d'essais:
 - Instrumentation avec capteurs de déformation et température ;
 - Relevé régulier de l'état des dégradations de surface et d'orniérage;
 - Relevé régulier de la portance de la chaussée ;
 - Sollicitations avec un simulateur de trafic mobile sur site choisi.
- Organisation de la construction de la planche d'essai en conditions contrôlées et mesures :
 - Instrumentation avec capteurs de déformations et températures ;
 - Relevé régulier de l'état des dégradations de surface et d'orniérage;
 - Relevé régulier de la portance de la chaussée ;
 - Analyse du comportement lors de cycles à hautes et basses températures
- Mesures relatives aux exigences et contrôle qualité lors de la construction des planches d'essai selon les méthodes préalablement sélectionnées et analysées.
- Essais en laboratoire de contrôle de fabrication et de pose des produits.
- Procédures de vérification de ces exigences en particulier maniabilité et compactibilité.
- Comparaison avec outils existants et élaboration de recommandations.
- Elaboration d'un "manuel" d'aide pour une utilisation optimale et rapide des techniques in-situ.
- Recommandations pour l'établissement de dossier de qualification et d'aptitude.
- Bases de la normalisation dans le domaine
- Orientation de la commission de suivi, rédaction d'un rapport intermédiaire et d'un rapport final.

Estimation des coûts

Début probable des travaux : mois 12

Durée de la recherche spécifique : 24 mois

Estimation du budget : 370'000 CHF dont 130'000 CHF pour les planches d'essais

RS-7 : HYGIENE AU TRAVAIL

Contexte et thème

L'hygiène au travail est un des aspects prioritaires du DETEC. Les enrobés bitumineux produisent de nombreuses émissions lors de la pose et du compactage, ce qui n'est pas sans incidence sur les ouvriers. Il est acquis que la production d'enrobés tièdes permet de diminuer les émissions jusqu'à 60% en comparaison avec des enrobés classiques à chaud. Il est donc nécessaire d'évaluer ces émissions et leurs impacts sanitaires sur les ouvriers.

Objectifs

L'objectif de cette recherche spécifique est de se demander dans quelle mesure les émissions réduites des enrobés tièdes sont différentes de celles des enrobés traditionnels à chaud. En effet, des émissions réduites ne signifient pas nécessairement un impact moins important sur la santé des travailleurs, la nocivité étant indépendante du volume des émissions.

Méthodologie

La méthodologie proposée dans cette recherche spécifique consiste à effectuer principalement des mesures d'émissions lors de la construction des planches d'essais et de les comparer avec un enrobé de référence à chaud. Une analyse de ces émissions devra permettre de proposer des recommandations relatives à l'hygiène au travail.

Les procédés considérés dans cette recherche spécifique sont les procédés du fil rouge, fabriqués en centrale d'enrobage.

Résultats attendus

- Analyse critique de l'état des connaissances.
- Analyse de la législation suisse et internationale dans le domaine, valeurs limites.
- Considérations sanitaires.
- Etablissement d'une méthode de mesure des émissions in-situ.
- Mesures in situ sur les planches d'essais et comparaisons avec des enrobés de référence à chaud.
- Recueil de données relatives aux mesures in-situ des émissions d'enrobés : chaud, tièdes, froids, ainsi que asphalte coulé.
- Analyse des impacts selon les conditions de pose (confiné, ouvert, aéré,...).
- Analyse globale et recommandations pour l'hygiène au travail, ceci selon le type de procédé et les conditions de pose.
- Orientation de la commission de suivi, rédaction d'un rapport intermédiaire et d'un rapport final.

Estimation des coûts

Début probable des travaux : mois 12

Durée de la recherche spécifique : 24 mois

Estimation du budget : 230'000 CHF

10.5 Clôture du projet



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

RECHERCHE EN MATIERE DE ROUTES DU DETEC

ARAMIS RPT

Formulaire N° 3 : Clôture du projet

établi / modifié le: 10.12.2009 / 22.03.2010

Données de base

Projet N°: VSS 2008/502

Titre du projet: Projet initial – Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques

Echéance effective: 10 décembre 2009

Textes:

Résumé des résultats du projet: Le projet effectue une analyse détaillée des processus de production d'enrobés à faibles impacts énergétiques et écologiques et met en évidence le potentiel important de ces technologies. Les besoins en termes de recherche sont également identifiés par une solide analyse bibliographique ainsi que par l'organisation d'un workshop sur invitation.
Finalement, le projet abouti à la description détaillée d'un paquet de recherches qui a notamment pour objectif l'établissement d'un modèle global d'évaluation sur l'ensemble du cycle de vie des technologies à faibles impacts. Le libellé complet de l'appel d'offre nécessaire pour le lancement de la recherche est également fourni en annexe au projet initial.

Atteinte des objectifs: L'objectif initial consistant à la justification et l'élaboration d'un paquet de recherches global prenant en compte les différentes problématiques liées aux enrobés à faibles impacts a été atteint. Le second objectif d'élaboration de l'appel d'offre en accord avec la commission de suivi a également été rempli.

Déductions et recommandations: Ce projet initial démontre la nécessité d'une recherche concernant les enrobés à faibles impacts en Suisse, ceci afin d'apporter une contribution significative aux économies d'énergie et limitations des émissions. Le workshop mené avec les principaux acteurs du domaine (administration, entreprises fournisseurs et chercheurs) a conforté le besoin et affiné les objectifs.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Publications:

Le projet fait l'objet d'un rapport de l'Office fédéral des routes VSS 2008/502 " Projet initial – Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques", Prof. A.-G. Dumont (EPFL-LAVOC), N. Bueche (EPFL-LAVOC) et Dr. C. Angst (IMP Bautest)

Appréciation de la commission de suivi:

Cette appréciation de la commission de suivi remplace l'ancienne évaluation technique détachée.

Evaluation:

Les objectifs de la recherche, soit la mise en évidence et la justification des multiples besoins de recherches dans le domaine en plein développement des enrobés à faibles impacts énergétiques et écologiques (principalement les enrobés tièdes et semi-tièdes), ainsi que la formulation des axes de recherches et de la structure d'un paquet de recherche, ont été pleinement atteints.

Le rapport passe en revue de façon détaillée les processus et les techniques de production d'enrobés à faibles impacts énergétiques et écologiques et définit clairement le périmètre du paquet de recherches projeté. Les résultats des 6 recherches spécifiques orientées sur les problèmes pratiques de la formulation, de la fabrication, de la mise en place et de la durabilité des couches devront permettre de mettre au point un modèle global d'évaluation de ces techniques innovantes (7ème module).

Le libellé complet (en français) des appels d'offres pour les 7 recherches spécifiques sont une excellente base pour la mise en soumission (français/allemand) par la direction générale du paquet de recherche.

Mise en oeuvre:

Le projet de paquet de recherches ici défini a été présenté à la Commission fédérale de Recherche en matière de Route (FOKO) en janvier 2010 et accepté par cette dernière. Après la mise en place définitive de la direction générale du projet, les appels d'offres pour les 7 recherches spécifiques seront publiés au printemps 2010 dans la revue VSS « Route et trafic ».

Besoin supplémentaire en matière de recherche :

Les besoins de recherches dans le domaine des enrobés tièdes et semi-tièdes sont définis globalement par les titres des 7 recherches spécifiques retenues pour le paquet de recherche:

- RS 1 : Impacts sur les centrales d'enrobage
- RS 2 : Bilan énergétique et écologique lors de la fabrication
- RS 3 : Formulation et optimisation des performances
- RS 4 : Durabilité et vieillissement
- RS 5 : Modèle global d'évaluation
- RS 6 : Exigences et contrôle qualité
- RS 7 : Hygiène au travail

Influence sur les normes:

Le but de tout paquet de recherche est non seulement de faire avancer de façon coordonnée et efficace l'état des connaissances d'un domaine ciblé, mais également d'en tirer tous les enseignements pouvant contribuer au travail de normalisation correspondant. Les influences de ce paquet de recherches sur la normalisation ne sont pas encore prévisibles dans le détail, mais seront certainement nombreuses et importantes pour la dissémination des connaissances acquises.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Président de la commission de suivi:

Nom:	Jacot	Prénom:	Alain
Service ou entreprise :	SACR S.A.		
Rue et N°:	Berninastrasse 9		
NPA:	8057	Email:	jacot@sacr.ch
Lieu:	Zürich	Téléphone	044 403 44 44
Canton, pays:	ZH, Suisse	Fax:	044 403 44 49

Signature du président de la commission de suivi (et président CT 5):

10.6 Index des rapports de recherche en matière de route

N° rapport	N° projet	Titre	Année
1254	VSS 2006/502	Drains verticaux préfabriqués thermiques pour la consolidation in-situ des sols	2009
1255	VSS 2006/901	Nouvelles méthodes pour reconnaître et faire respecter la vitesse maximale autorisée	2009
1256	VSS 2006/903	Exigences de qualité posées au traitement vidéo numérique pour la surveillance du trafic routier	2009
1258	VSS 2005/802	Arrêt en cap - exigences et effets	2009
1265	VSS 2005/701	Relation entre les propriétés diélectriques des revêtements routiers et leur condition	2009
1267	VSS 2007/902	MDAinSVT - Utilisation des standards d'échange de données basés modélisation pour la télématique des transports routiers à l'exemple des données de trafic	2009
1269	VSS 2005/201	Évaluation de dispositifs de retenue de véhicule sur le terre-plein central des autoroutes	2009
1270	VSS 2005/502	Interaction route - stabilité des versants: Monitoring et calcul à rebours	2010
1271	VSS 2004/201	Entretien des écrans antibruit	2009
1272	VSS 2007/304	Aménagement des feux de signalisation pour les personnes a mobilité réduite ou âgées	2010
1232	ASTRA 2005/008	Réseau de capteurs sans fil pour l'observation de grands ouvrages	2009
1240	ASTRA 2002/010 & 2005/009	L'acceptabilité du péage de congestion: Résultats et analyse de l'enquête réalisée en Suisse	2009
1241	ASTRA 2001/052	Amélioration des informations fournies par l'essai d'orniérage LCPC	2009
1261	ASTRA 2004/018	Étude de pilote pour l'évaluation d'une machine mobile à vrai grandeur qui permet de simuler le trafic sur les routes dans une manière accélérée	2009
1268	ASTRA 2005/007	Facteurs d'émission des particules d'abrasion dues au trafic routier	2009
1275	ASTRA 2006/016	Méthodologie pour l'estimation de matrices origine-destination dynamiques en réseau urbain	2009
1278	ASTRA 2004/016	Influence des systèmes d'information embarqués sur le comportement de conduite et la sécurité routière Rapport partiel d'ingénierie de la circulation	2009

11. Bibliographie

1. VSS, *Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut*, OFROU, Editor. En cours.
2. Energie, B.f., *Aperçu de la consommation d'énergie en suisse au cours de l'année 2007*, C. Suisse, Editor. 2007: Bern. p. 8.
3. Laurent, G., *Evaluation économique des chaussées en béton et classiques sur le réseau routier national français*, ed. L.C.d.P.e.C. (LCPC). 2004, Paris.
4. TWG), W.M.A.T.W.G.W. *WMA TWG Meeting*. 2007. Baltimore (USA).
5. Prowell, B.D. and G.C. Hurley, *Warm-Mix Asphalt: Best Practices*, N.A.P.A. (NAPA), Editor. 2007, NAPA. p. 44.
6. Kuennen, T., *Warm Mixes are a hot topic*. Better Roads Magazine, 2004: p. 8.
7. Brosseaud, Y., *Ecologiques, sécuritaires, confortables, les enrobés de demain se feront autrement: Présentation des enrobés tièdes*. 2006, LCPC. p. 11.
8. Brosseaud, Y. and D. Sicard, *Etat du développement des enrobés tièdes en France*. Revue Générale des Routes et Aérodrômes, 2007. **857**: p. 8.
9. Bonvallet, J., *Les enrobés sont pluriels*. Revue Générale des Routes et Aérodrômes, 2001. **799**: p. 3.
10. Carbonneau, X., J.-P. Henrat, and F. Létaudin, *Enrobé 3E de Colas: Une réponse sûre à la problématique des enrobés dits "tièdes"*. Revue Générale des Routes et Aérodrômes, 2006. **849**: p. 6.
11. Sicard, D. and Y. Brosseaud, *Réalisation à basses températures des enrobés denses et des asphalts: Panorama des filières technologiques*, in *Journée technique LAVOC*. 2006: Lausanne (Switzerland).
12. *Website PQ Corporation*. January 2009]; Available from: <http://www.pqcorp.com/products/AdveraWMA.asp>.
13. *Website Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation*. December 2008]; Available from: <http://www.fhwa.dot.gov>.
14. Middleton, B. and R.W. Forfylo, *An evaluation of warm mix asphalt produced with the double barrel green process*, in *Transport Research Board (TRB)*. 2009: Washington (USA). p. 14.
15. Hurley, G.C. and B.D. Prowell, *Evaluation of aspha-min zeolite for use in warm mix asphalt*, N.R. 05-04, Editor. 2005, NCAT (National Center for Asphalt Technology): Auburn University. p. 30.
16. *Website aspha-min, produit*. October 2008]; Available from: <http://www.aspha-min.com>.
17. D'Angelo, J., et al., *Warm-Mix Asphalt: European Practice*, A. FHWA, NCHRP, Editor. 2008. p. 68.
18. Kristjánssdóttir, O., et al., *Assessing the Potential of Warm Mix Asphalt Technology Adoption*, in *Transport Reserach Board (TRB)*. 2007: Washington (USA). p. 19.
19. Hunt, D., *Double Barrel Green system*. Hot Mix Magazine (www.hotmixmag.com), 2008. **13**, N°1.
20. *Website Sasol Wax*. October 2008]; Available from: <http://www.sasolwax.com>.
21. Hurley, G.C. and B.D. Prowell, *Evaluation of Sasobit for use in warm mix asphalt*, N.R. 05-06, Editor. 2005, NCAT (National Center for Asphalt Technology): Auburn University. p. 27.
22. Alliance, A.P. *Environmental Innovations in Asphalt*. in *Asphalt Pavement Conference 2006* 2006. Orlando (USA).
23. *Website Clariant, Road Construction division*. December 2008]; Available from: <http://www.pa.clariant.com/pa/internet.nsf/vwWebPagesByID/C1256C70004F0C0DC1256E6E004ED63F>.
24. Ltd., C.I., *Road Construction: Licomont BS 100 and Licomont BS 100 G for bitumen modification in road construction*. 2007. p. 16.
25. Marmier, F., *Colas invente Végécol; un substitut du bitume?* Revue Générale des Routes et Aérodrômes, 2004. **833**: p. 2.
26. *Website Screg, Produits et procédés*. November 2008]; Available from: <http://www.screg.fr/>.
27. Hurley, G.C. and B.D. Prowell, *Evaluation of Evotherm for use in warm mix asphalt* N.R. 06-02, Editor. 2006, National Center for Asphalt Technology - NCAT: Auburn. p. 49.
28. *Website MeadWestvaco*. October 2008]; Available from: <http://www.meadwestvaco.com>.
29. *Website AKZO Nobel*. November 2008]; Available from: <http://www.surfactants.akzonobel.com>.

30. Website Ceca, Arkema group. December 2008]; Available from: [http://www.cecachemicals.com/sites/ceca/en/business/bitumen additives/warm coated material/warm coated material.page](http://www.cecachemicals.com/sites/ceca/en/business/bitumen%20additives/warm%20coated%20material/warm%20coated%20material.page).
31. Grampre, L., J.A.G. Leon, and G. Barreto, *Warm Asphalt Mixtures by chemical additivation: Filed tests and laboratory studies*, in *4th Eurasphalt & Eurobitume Congress*. 2008: Copenhagen (Denmark). p. 7.
32. Website Shell Bitumen. December 2008]; Available from: <http://www.shell.com>.
33. Association, E.A.P., *Low Temperature Asphalt*. 2005, EAPA. p. 9.
34. Lecomte, M., F. Deygout, and A. Menetti, *WAM: Environmental benefits of reducing asphalt production and laying temperature*. 2007, Shell Bitumen. p. 11.
35. Koenders, B.-G., et al., *Innovative process in asphalt production and application to obtain lower operating temperatures*, in *2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress*. 2000: Barcelona (Spain). p. 11.
36. Larsen, O.R., et al., *WAM Foam asphalt production at lower operating temperatures as environmental friendly alternative to HMA*, in *3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress*. 2004: Vienna (Austria). p. 10.
37. Koenders, B.G., et al., *WAM-Foam, asphalt production at lower operating temperatures*, in *9th International Conference on Asphalt Pavement (ISAP)*. 2002: Copenhagen (Denmark). p. 8.
38. Website LEA-Co, références. September 2008]; Available from: <http://www.lea-co.com/>.
39. Olard, F., C.L. Noan, and A. Romier, *Les enrobés basse énergie EBE et basse température EBT: Bilan des chantiers réalisés en 2005 et 2006*. Revue Générale des Routes et Aéroports, 2006. **854**.
40. Olard, F. and C.L. Noan, *Les enrobés basse température (Prix AIPCR du développement durable)*, in *Routes*, AIPCR/PIARC, Editor. 2008. p. 14.
41. Landa, P.-A., T. Kneepkens, and J.T.v.d. Zwan, *Low temperature-asphalt, a production process with the possibility to produce and pave hot mix asphalt at temperatures below 100°C or 212°F*, in *3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress*. 2004: Vienna (Austria). p. 8.
42. Harder, G., et al., *Energy and environmental gains of warm and half-warm asphalt mix: quantitative approach*, in *Transport Research Board (TRB)*. 2008: Washington (USA). p. 20.
43. EAPA, *Asphalt in figures: 2007*, E.A. Association, Editor. 2008. p. 5.
44. suisse, A.f.d.l.C., *Loi fédérale sur la réduction des émissions de CO2 (loi sur le CO2)*, in *641.71*. 2007. p. 6.
45. Villeglé, B.M.d.l., B. Pégain, and X. Carbonneau, *Développement des bétons bitumineux à l'émulsion: Ecomac*. Revue Générale des Routes et Aéroports, 2005. **841**: p. 6.
46. Olard, F., et al., *Low energy asphalts for sustainable road construction*, in *4th Eurasphalt & Eurobitume Congress*. 2008: Copenhagen (Denmark). p. 12.
47. Mogawer, W.S., et al., *Incorporating high percentages of recycled asphalt pavement (RAP) and warm mix asphalt (WMA) technology into thin hot mix asphalt overlays to be utilized as a pavement preservation strategy*, in *Transport Research Board (TRB)*. 2009: Washington (USA). p. 21.
48. Jullien, A., et al., *Environmental assessment of a hot mix asphalt process*, in *International Symposium on Asphalt Pavements and Environment*. 2008: Zurich (Switzerland). p. 12.
49. Zammataro, S. *Monitoring and accounting GHG emissions from road infrastructure: The IRF GHG Calculator*. in *2nd Roads & Environment Conference*. 2008. Geneva (Switzerland).
50. Räss, E., A.-G. Dumont, and M. Pittet, *Réduction de la consommation d'énergie dans les enrobés bitumineux*. 2007, EPFL-LAVOC: Lausanne. p. 45.
51. SUVA, m.d.t., *Valeurs limites d'exposition aux postes de travail*, SUVA, Editor. 2009. p. 153.
52. Paranhos, R.S., *Approche multi-échelles des émissions d'un procédé d'élaboration des enrobés à chaud*, in *Physique, énergétique*. 2007, Rouen: Rouen. p. 295.
53. Rode, F., *Das KGO-Verfahren*. Die Asphaltstrasse, 1983. **03/83**: p. 4.
54. Ohlson, K.G., *Demonstration of KGOII asphalt mix production 1988*, Royal Institute of Technology: Stockholm (Sweden).
55. Paquin, Y., *Applications québécoises en enrobés tièdes*. 2007.
56. Website Gencor Industries. January 2009]; Available from: <http://gencorgreenmachine.com/>.

57. Website *Terex Roadbuilding*. January 2009]; Available from: <http://www.terexrb.com/default.aspx?pgID=308>.
58. Andersen, E., et al., *Expérimentation routière en Norvège avec des liants à base d'huile végétale*. Revue Générale des Routes et Aérodrômes, 2008. **866**: p. 5.
59. González-León, J.A., L. Grampre, and G. Barreto, *Warm Mix Asphalts with low dosage chemical additives*, in *Transport Research Board (TRB)*. 2009: Washington (USA). p. 12.
60. Serfass, J.-P., *Enrobés à l'émulsion: Particularités et nouvelle méthode d'étude*. Revue Générale des Routes et Aérodrômes, 2002. **808**: p. 2.
61. Villeglé, B.M.d.l., *Béton bitumineux minces à l'émulsion Compomac R: dix ans de développement*. Revue Générale des Routes et Aérodrômes, 2002. **809**: p. 6.
62. Bertaud, M. and B.M.d.l. Villeglé, *Colormac: Enrobé à l'émulsion de liant clair*. Revue Générale des Routes et Aérodrômes, 2006. **852**: p. 2.
63. Website *SCREG, produits*. January 2009]; Available from: <http://www.screg.fr/>.
64. Cuenoud, J.-L., *Journée développement durable au CeRN de Bursins: Présentation Valorcol et Végécol*. 2007: Bursins (VD).
65. Golaz, B., M. Pittet, and A.-G. Dumont, *Maîtrise de la viscosité des mélanges bitumineux routiers*. 2007, EPFL-LAVOC: Lausanne. p. 46.