

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M.Ing.

PAR
Glen PHILIPPOT

CONSÉQUENCES ÉNERGÉTIQUES ET ENVIRONNEMENTALES DE
L'UTILISATION DES ENROBÉS TIÈDES LORS DE LA CONSTRUCTION DES
ROUTES

MONTREAL, LE 9 SEPTEMBRE 2010

© Tous droits réservés, Glen Philippot, 2010

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Michèle St-Jacques, directrice de mémoire
Département de génie de la construction
École de technologie supérieure

M. Edmond T. Miresco, président du jury
Département de génie de la construction
École de technologie supérieure

M. Yannic Ethier, membre du jury
Département de génie de la construction
École de technologie supérieure

M. Yvan Paquin, membre du jury
Entreprise DJL

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY

LE 20 AOÛT 2010

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Afin de mener à bien cette étude, j'ai bénéficié de l'aide et des conseils de plusieurs personnes, que j'aimerais remercier.

Tout d'abord, je tiens à remercier ma directrice de mémoire, Mme Michèle St-Jacques qui m'a soutenu et conseillé tout au long du processus de recherche.

Je souhaiterais remercier également l'équipe d'Eurovia Canada qui m'a permis de mener à bien cette étude en partageant ses données et en me donnant l'opportunité de procéder aux essais dans son laboratoire. Plus particulièrement, mes remerciements vont à M. Marc Proteau, le directeur technique de la délégation Amérique du Nord et directeur du Centre Technique Nord Américain et à M. Yvan Paquin, le directeur technique de Construction DJL pour l'intérêt et le suivi permanent qu'ils ont porté à mon travail. Je tiens à remercier également Mme Sabine Lebec, la responsable du secteur liants et procédés à froid au CTNA, M. Pierre Richard, responsable du secteur granulats et enrobés bitumineux au CTNA, ainsi que l'équipe des techniciens du CTNA pour leur soutien lors de la réalisation des essais. Et enfin, MM. Ivan Drouadaine et Frédéric Delfosse du laboratoire de recherche d'Eurovia de Mérignac en France, pour l'information qu'ils ont bien voulu partager dans le cadre de cette étude.

Enfin, j'aimerais exprimer mes remerciements à Mme Anne Dony, professeure à l'ESTP de Paris et M. Yves Brosseau du LCPC de Nantes, dont les conseils prodigués lors de ma visite dans leur laboratoire respectif m'ont mis le pied à l'étrier au tout début de ma recherche.

CONSÉQUENCES ÉNERGÉTIQUES ET ENVIRONNEMENTALES DE L'UTILISATION DES ENROBÉS TIÈDES LORS DE LA CONSTRUCTION DES ROUTES

Glen PHILIPPOT

RÉSUMÉ

Le but de l'étude présentée dans ce mémoire est d'évaluer l'impact environnemental et énergétique de la fabrication d'enrobés tièdes à base d'un additif utilisé aujourd'hui au Québec, l'Evotherm® DAT H5. Les gains réels apportés par ces technologies tièdes étant mal connus, cette étude se propose de les évaluer de façon plus claire. La recherche s'articule d'une part sur une évaluation comparative des performances techniques en laboratoire de formules d'enrobés actuellement utilisées par l'entreprise DJL, partenaire de cette étude, et d'autre part sur des simulations énergétiques effectuées avec un logiciel éco-comparateur développé par la firme Eurovia en France, dont DJL est une des filiales. Les résultats des simulations sont comparés à des mesures de consommation de ressources énergétiques et d'émissions de gaz effectuées par Eurovia lors d'un chantier en 2009.

Les essais en laboratoire ont porté sur quatre formules d'enrobé de type ESG-10 faisant intervenir trois types de bitume différents. La baisse de température appliquée était de 50°C par rapport à la température nominale de fabrication à chaud. Cette dernière dépend du grade de bitume utilisé. Les simulations informatiques reprennent les données de fabrication recueillies en centrale afin de pouvoir mener une comparaison des résultats.

Il est apparu au final que l'utilisation d'enrobés tièdes à l'Evotherm® est bénéfique pour l'environnement, et permet une réduction globale du recours aux ressources énergétiques non renouvelables. Les résultats de performances en laboratoire, propriété de l'entreprise et non divulguables permettront de juger si malgré ces gains, les enrobés tièdes ont un avenir au Québec.

Mots clés : Enrobé, tiède, Evotherm, réduction, consommation, énergie, environnement.

TABLE DES MATIERES

	Page
INTRODUCTION	12
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTERATURE	14
1.1 Bitume	14
1.1.1 Origine	14
1.1.2 Chimie du bitume	15
1.1.3 Propriétés physiques	18
1.2 Enrobés bitumineux	22
1.2.1 Constituants	22
1.2.2 Propriétés	23
1.2.3 Méthode de fabrication	24
1.3 Méthode de formulation	27
1.3.1 Méthode Française	27
1.3.2 Méthode Superpave	28
1.3.3 Méthode LC	29
1.4 Logiciels d'analyse de cycle de vie – Eco-comparateurs	30
1.5 Utilisation en chantier	34
1.5.1 Types d'enrobés utilisés	34
1.5.2 Application et compactage	35
1.6 Enrobés tièdes	36
1.6.1 Historique et genèse	36
1.6.2 Technologies existantes	38
1.6.3 Intérêts	46
1.7 Problématique	54
CHAPITRE 2 ESSAIS DE LABORATOIRE	56
2.1. Objectifs	56
2.2. Matériaux	56
2.2.1. Saint-Bruno de Montarville # 1	58
2.2.2. Saint-Bruno de Montarville # 2	58
2.2.3. Bromont	59
2.2.4. Saint-André Avellin	60
2.3. Méthode de préparation	60
2.3.1. Préparation des combinés granulaires	60
2.3.2. Chauffage des matériaux	60
2.3.3. Dosage	61
2.3.4. Malaxage	63
2.4. Essais	63
2.4.1. Compaction PCG	63
2.4.2. Tenue à l'eau	65
2.4.3. TSR AASHTO	67
2.4.4. Désenrobage	69
2.4.5. Orniérage	70
2.5. Résultats	71

2.5.1.	Compaction PCG.....	71
2.5.2.	Tenue à l'eau.....	72
2.5.3.	TSR AASHTO.....	76
2.5.4.	Désenrobage.....	78
2.5.5.	Orniérage.....	79
CHAPITRE 3 IMPACT ENVIRONNEMENTAL		82
3.1.	Présentation des méthodes de calcul.....	82
3.1.1.	Calcul avec le logiciel Gaïa	82
3.1.2.	Calcul théorique.....	86
3.2.	Évaluation des gains bruts de production.....	86
3.2.1.	Première évaluation : production de 1000 tonnes	86
3.2.2.	Calage sur une production réelle.....	91
3.3	Évaluation des gains nets en production.....	98
3.3.1	Simulation Gaïa	100
3.3.2	Mesures réelles	101
3.3.3	Calcul théorique.....	103
3.4	Exploitation des résultats.....	104
3.5	Activités de DJL au Québec	108
3.6	Autres gains environnementaux.....	109
CHAPITRE 4 DISCUSSION		112
4.1	Essais en laboratoire	112
4.1.1	PCG.....	112
4.1.2	Désenrobage	113
4.1.3	Tenue à l'eau.....	113
4.1.4	TSR	115
4.1.5	Orniérage.....	115
4.2	Simulations énergétiques	116
4.3	Impact environnemental	118
4.4	Observations diverses	119
CONCLUSION		120
ANNEXE I	Mesure du point de ramollissement bille-anneau.....	123
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		124

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Indicateurs de la norme française NF P01-010..... 31
Tableau 1.2	Indicateurs internes 32
Tableau 2.1	Températures de chauffage du bitume..... 58
Tableau 2.2	Granulats de la formule Saint-Bruno # 1 58
Tableau 2.3	Granulats de la formule Saint-Bruno # 2 59
Tableau 2.4	Granulats de la formule Bromont..... 59
Tableau 2.5	Granulats de la formule Saint-André Avellin..... 60
Tableau 2.6	Températures des enrobés tièdes..... 61
Tableau 2.7	Résultats de compaction PCG 72
Tableau 2.8	Résultats tenue à l'eau 74
Tableau 2.9	Contraintes à la rupture (essai TSR)..... 77
Tableau 2.10	Résultats du test de désenrobage..... 79
Tableau 2.11	Résultats d'orniérage..... 80
Tableau 3.1	Description de l'interface de Gaïa 83
Tableau 3.2	Bilan environnemental simulé sur 1000 tonnes..... 87
Tableau 3.3	Résultats théoriques 1000 tonnes d'enrobé 90
Tableau 3.4	Teneurs en eau des granulats..... 92
Tableau 3.5	Consommation d'énergie..... 93
Tableau 3.6	Résultats mesurés de consommation d'énergie..... 94
Tableau 3.7	Résultats de simulation informatique du cas réel..... 95
Tableau 3.8	Résultats du calcul théorique cas réel..... 96
Tableau 3.9	Résumé des gains bruts dans le cas réel..... 97

Tableau 3.10	Energies de fabrication de l'additif.....	100
Tableau 3.11	Consommation d'énergie totale d'après Gaïa	101
Tableau 3.12	Consommation d'énergie totale d'après les mesures réelles	102
Tableau 3.13	Consommation d'énergie totale d'après les mesures à long terme.....	103
Tableau 3.14	Consommation d'énergie totale d'après les mesures réelles	104
Tableau 3.15	Emissions mesurées lors du chantier pilote	109
Tableau 3.16	Emissions calculées par le logiciel Gaïa	110

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Composition du bitume. 15
Figure 1.2	Schéma bitume type « sol ». 16
Figure 1.3	Schéma bitume type « gel ». 17
Figure 1.4	Chronologie du vieillissement du bitume 20
Figure 1.5	Centrale discontinue à séchage à contre-courant. 25
Figure 1.6	Centrale continue type TSE à séchage co-courant. 26
Figure 1.7	Méthode de formulation française. 28
Figure 1.8	Détermination de la teneur optimale en bitume. 29
Figure 1.9	Cycle de vie de l'enrobé bitumineux 33
Figure 1.10	Application de l'enrobé. 35
Figure 1.11	Illustration du changement de viscosité du bitume avec l'additif Sasobit. 39
Figure 1.12	Installation pour production à l'Evotherm® DAT, Saint-André Avellin. 44
Figure 1.13	Rampe d'injection d'additif dans le bitume avant enrobage. 45
Figure 1.14	Consommation de carburant en fonction du type d'enrobé. 47
Figure 1.15	Composés cycliques. 49
Figure 1.16	Émission de COV et température 50
Figure 1.17	Émissions des enrobés. 51
Figure 2.1	Localisation des centrales d'enrobage. 57
Figure 2.2	Schéma du dosage du bitume pour le procédé tiède. 62
Figure 2.3	Dosage du bitume et de l'Evotherm® 62
Figure 2.4	Schéma de fonctionnement d'une PCG. 64
Figure 2.5	PCG. 64

Figure 2.6	Presse dynamométrique équipée de mâchoires pour stabilité Marshall.....	66
Figure 2.7	Chronologie du test "TSR".	67
Figure 2.8	Mâchoires TSR.	68
Figure 2.9	Table agitatrice et béciers pour désenrobage	69
Figure 2.10	Orniéreur.....	70
Figure 2.11	Résultats des essais de compaction.....	71
Figure 2.12	Ratios de tenue à l'eau.	73
Figure 2.13	Contraintes maximales de tenue à l'eau.	74
Figure 2.14	Ratios des tests de tenue à l'eau AASHTO (TSR).	76
Figure 2.15	Contraintes à la rupture (essai TSR).	77
Figure 2.16	Évolution de l'orniérage.	80
Figure 3.1	Interface de Gaïa.	83
Figure 3.2	Saisie des machines de chantier.	84
Figure 3.3	Informations sur la centrale d'enrobage.....	84
Figure 3.4	Informations concernant l'enrobé.....	85
Figure 3.5	Répartition de l'eau pour le calcul théorique.	88
Figure 3.6	Paramètres de calcul.	89
Figure 3.7	Comparaison des résultats (1000 tonnes).	91
Figure 3.8	Paramètres du calcul théorique.	96
Figure 3.9	Comparaison des résultats obtenus de l'étude du cas réel.	97
Figure 3.10	Résumé des résultats - Procédé d'enrobage complet.	105
Figure 3.11	Répartition des consommations d'énergie - Brûleur seul.....	107
Figure 3.12	Répartition des consommations d'énergie brûleur + parc à liant.	107
Figure 3.13	Répartition des consommations d'énergie procédé complet.	108
Figure 3.14	Chargement d'enrobé - Saint-André Avellin, QC 15 octobre 2009	111

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ACV	Analyse du Cycle de Vie
ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
BBR	Bending Beam Rheometer
CONV	Composés Organiques Non Volatils
COSV	Composés Organiques Semi-Volatils
COT	Composés Organiques Totaux
COV	Composés Organiques Volatils
CTNA	Centre Technique Nord-Américain
DAT	Dispersed Asphalt Technology
DSR	Dynamic Shear Rheometer
EAPA	European Asphalt Pavement Association
EPA	Environmental Protection Agency
ÉTS	École de Technologie Supérieure
FHWA	Federal Highway Administration
HAP	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
IP	Indice de Pénétrabilité
LC	Laboratoire des Chaussées
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
MTQ	Ministère des Transports du Québec
NCAT	National Center for Asphalt Technology
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
PCG	Presse à Cisaillement Giratoire
PG	Performance Grade
RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test
SHRP	Strategic Highway Research Program
TSR	Tensile Strength Ratio
USIRF	Union des Syndicats de l'industrie Routière Française

INTRODUCTION

Au jour d'aujourd'hui, les coûts de l'énergie présentent une tendance haussière inexorable. En effet, du fait de la raréfaction des produits d'origine pétrolière, l'utilisation de l'énergie fossile est de plus en plus onéreuse, bien qu'elle soit encore l'une des principales sources d'approvisionnement. Aussi, la sensibilisation des populations et de leurs dirigeants au changement climatique tend à réclamer une consommation raisonnée et le recours à des procédés de développement durable. Cette prise de conscience, incarnée par le protocole de Kyoto par exemple, se traduit entre autres par une volonté de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

La combinaison de ces deux facteurs, économique et sociopolitique, fait que de plus en plus d'entreprises se tournent aujourd'hui vers ces procédés novateurs et écologiquement responsables, que ce soit par conviction, par obligation ou par intérêt financier. Les acteurs du domaine du génie routier ne font pas exception à la règle. Leurs activités sont fortes consommatrices de produits pétroliers, que ce soit en tant que matière première (bitume) qu'en tant qu'énergie (fioul de chauffage). Ils sont donc en première ligne dans cette course à l'innovation. Les technologies d'enrobés tièdes sont nées de ce changement de mentalité en Europe il y a 10 à 15 ans (EAPA, 2009).

Les enrobés tièdes sont des enrobés qui, au lieu d'être produits à température normale (entre 150 et 170°C), le sont à des températures moindres, pouvant atteindre 50°C de moins. Ces techniques font appel à diverses méthodes permettant de conserver les propriétés des enrobés lors de la pose malgré une température bien inférieure à la normale. Le défi principal étant de conserver la maniabilité du produit malgré qu'il soit plus froid.

Cette diminution de température permet en toute logique une réduction de la consommation d'énergie (fioul ou gaz) en centrale d'enrobage et, par conséquent, une réduction des émissions polluantes, en particulier des gaz à effet de serre. Les professionnels du secteur ont à l'heure actuelle un peu plus de recul sur ces technologies, en particulier concernant leur pose. Mais malgré la multiplication des chantiers ces dernières années, le recours aux enrobés tièdes reste marginal à cause du manque de données sur leurs performances dans le temps. Les donneurs d'ouvrage attendent en effet d'être certains que les enrobés tièdes

sont aussi performants que les produits classiques. Beaucoup d'entreprises ont développé des techniques qui leur sont propres et annoncent des chiffres de baisse de température, de diminution de consommation d'énergie et d'émissions dans leurs brochures technico-commerciales. Mais du fait de la nouveauté de ces procédés, trop peu d'études indépendantes permettent de s'assurer de ce qui est avancé par ces publicités (Brosseaud et St-Jacques, 2007).

L'entreprise de travaux publics DJL, en collaboration avec sa maison-mère Eurovia en France développe différents produits de ce type au Québec. Après les enrobés à base d'Asphamin® (Zéolite), l'entreprise se lance depuis peu dans la fabrication et la pose d'enrobés tièdes à base d'Evothem® (gamme d'additifs développée par la firme américaine Meadwestvaco Inc.) qui permet une réduction de température plus importante encore lors de la fabrication.

Cependant, ces produits présentés comme propres, en s'appuyant sur leur image écologique le sont-ils vraiment ? Ils présentent divers composants dont l'impact pourrait être moins bénéfique pour l'environnement que le gain de rejet de gaz à effet de serre qui en découle. Les divers produits ajoutés pour maintenir une maniabilité correcte à 100°C sont-ils si inoffensifs que cela pour l'environnement et les travailleurs ? Les gains en énergie avancés sont ils vraiment vérifiés en pratique si l'on prend en compte la chaîne de fabrication dans sa globalité et le cycle de vie total de la chaussée ? Au-delà des questions de performance de la chaussée, quelques incertitudes planent encore au dessus de ces techniques prometteuses, qu'il serait judicieux d'éclaircir. Afin de mieux connaître l'impact de ces produits, DJL a accepté de participer à cette recherche.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Bitume

1.1.1 Origine

Le bitume est un produit d'origine pétrolière constitué des éléments les plus lourds que l'on trouve dans le pétrole. Il est utilisé par l'homme depuis au moins 3000 ans avant J.C. pour des raisons diverses : scellement de maçonnerie, étanchéisation, conservation de corps embaumés, etc. (Bitume Info, 2005). A l'époque, les sources principales étaient des affleurements naturels de pétrole dont les éléments les plus légers s'étaient évaporés à l'air libre, mettant à disposition des hommes la matière visqueuse brune-noirâtre : le bitume.

Aujourd'hui, les sources naturelles sont négligeables dans le circuit d'approvisionnement de l'industrie en bitume. Il est en grande partie issu de la distillation du pétrole brut en raffinerie, la quantité de bitume obtenue variant selon le type de brut exploité. Étant un produit lourd récolté dans le fond des colonnes de distillation, plus le pétrole est dit « lourd », du type que l'on trouve au Venezuela ou au Moyen Orient, plus il donnera de bitume. Au contraire, un pétrole « léger » comme le Brent de la mer du Nord par exemple, en donnera très peu (Dorchies, 2003).

La production de bitume est de nos jours en grande partie (environ 90%) destinée à l'industrie routière. En effet, depuis le début du 20^e siècle, le bitume est utilisé comme matériau dans la fabrication des chaussées. Si, au départ, le but était simplement d'éliminer les nuages de poussière que laissaient derrière eux les premiers véhicules motorisés, son fort pouvoir de cohésion inter-granulaire ainsi que ses propriétés physiques en ont rapidement fait un constituant indispensable des routes. Ainsi, de la simple couche d'émulsion enduite en surface des granulats compactés utilisée au début des années 1900, il s'est rapidement avéré que son utilisation comme liant entre les granulats permettait en outre d'éliminer les problèmes de dislocation des empierrements. C'est alors, vers le milieu des années 1920, que débute l'ère du béton/enrobé bitumineux, parallèlement à l'essor des ventes de véhicules particuliers dans les pays développés. La route est ainsi devenue plus sûre et moins coûteuse à entretenir (Billard, site internet LCPC).

1.1.2 Chimie du bitume

Le bitume est un matériau d'origine fossile, composé d'un mélange de molécules hydrocarbonées plus ou moins longues, donc plus ou moins lourdes. Il est constitué de deux familles principales de molécules : les asphaltènes et les maltènes. La distinction entre les deux familles se fait par dissolution du bitume dans un hydrocarbure léger, le n-heptane (figure 1.1). La première famille, les asphaltènes, y est insoluble. Elle se distingue ainsi des maltènes (Witier et al.).

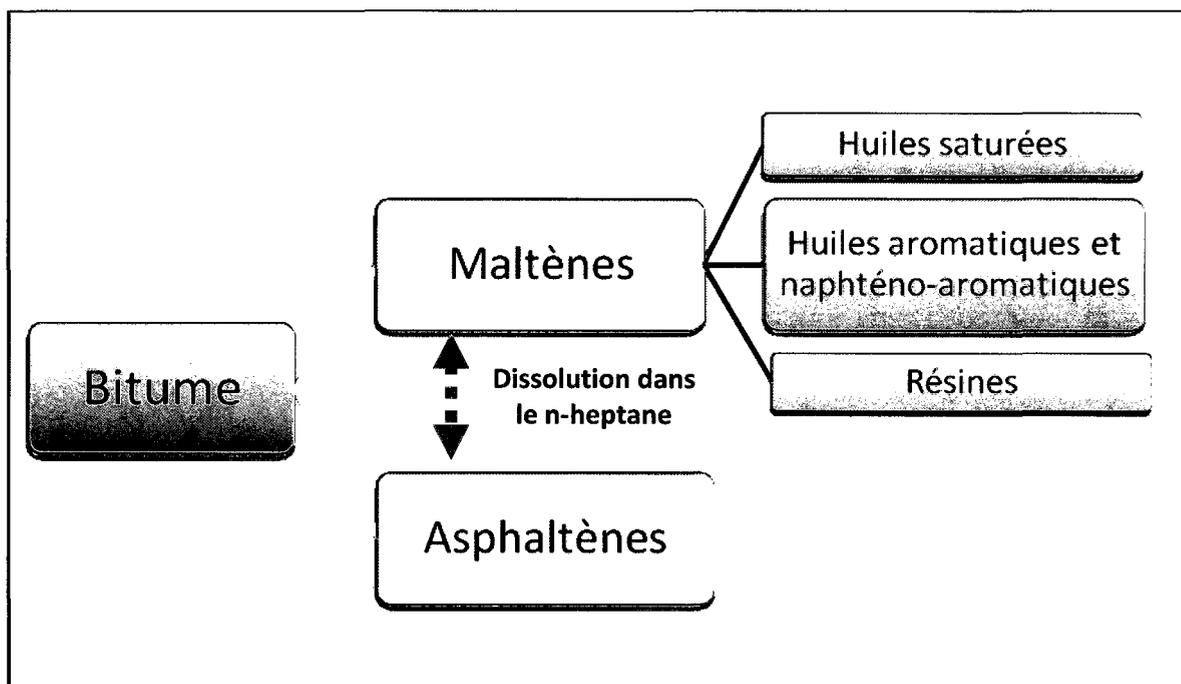


Figure 1.1 Composition du bitume.

A température ambiante, les asphaltènes se présentent comme un corps solide, noir et cassant. Ce sont les constituants des bitumes présentant les plus importantes masses moléculaires (de 10^3 à 10^6 g/mol). Les bitumes auront tendance à être d'autant plus durs qu'ils présenteront un pourcentage élevé de ces molécules (Bitume Info, 2005).

Les maltènes elles, sont un mélange d'huiles et de résines, solubles dans l'hydrocarbure précité. L'aspect global d'un mélange de maltènes est celui d'une huile visqueuse, car contrairement aux asphaltènes cette famille est constituée de molécules plus légères. Ce

sont ces molécules qui vont avoir tendance à s'évaporer en premier lorsque l'on chauffe les bitumes, notamment les composés aromatiques, nocifs pour la santé. Ces huiles présentent généralement un caractère de fluide newtonien (Lombardi, 2007).

Un bitume est donc un système colloïdal qui selon les concentrations des ses constituants va présenter un type gel ou sol (cf. figures 1.2 et 1.3). Si la teneur en résines est faible et qu'il y a beaucoup d'asphaltènes, alors ces derniers ne peuvent pas être peptisés par les résines de manière optimale, et se mettent à former un réseau de particules solides entre lesquelles on retrouve les huiles malténiques. Le bitume présente alors un type « gel ». Au contraire, si les asphaltènes sont correctement peptisés, ils deviennent alors la phase dispersée de la solution colloïdale, les huiles formant la phase continue de la solution. Le bitume a dans ce cas un type « sol ». Il existe évidemment toute une gamme de variations possibles entre ces deux types de comportements. En fonction du type de la solution étudiée, le bitume présentera par conséquent des caractéristiques physiques différentes, en particulier concernant sa rhéologie (Bitume Info, 2005).

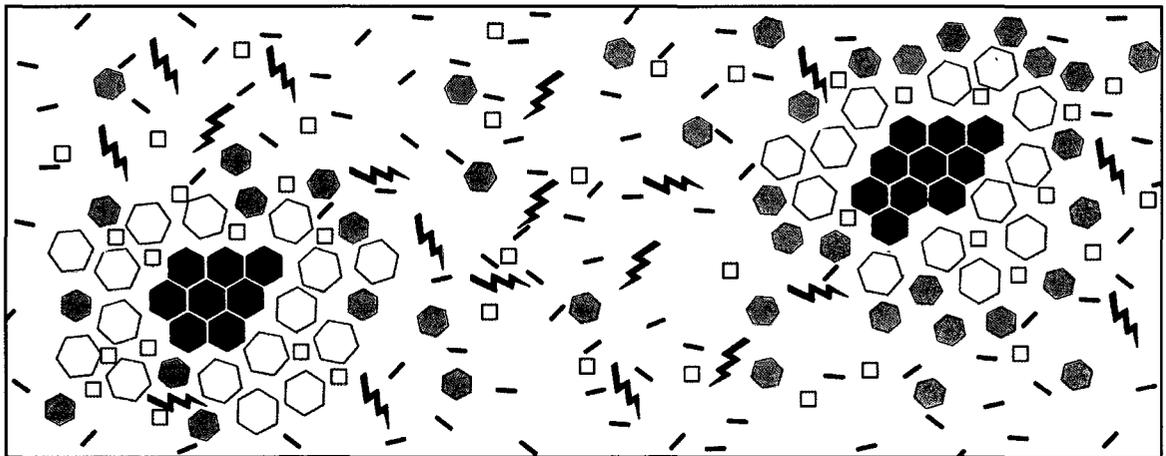


Figure 1.2 Schéma bitume type « sol ».
Adaptée de Lombardi (2007)

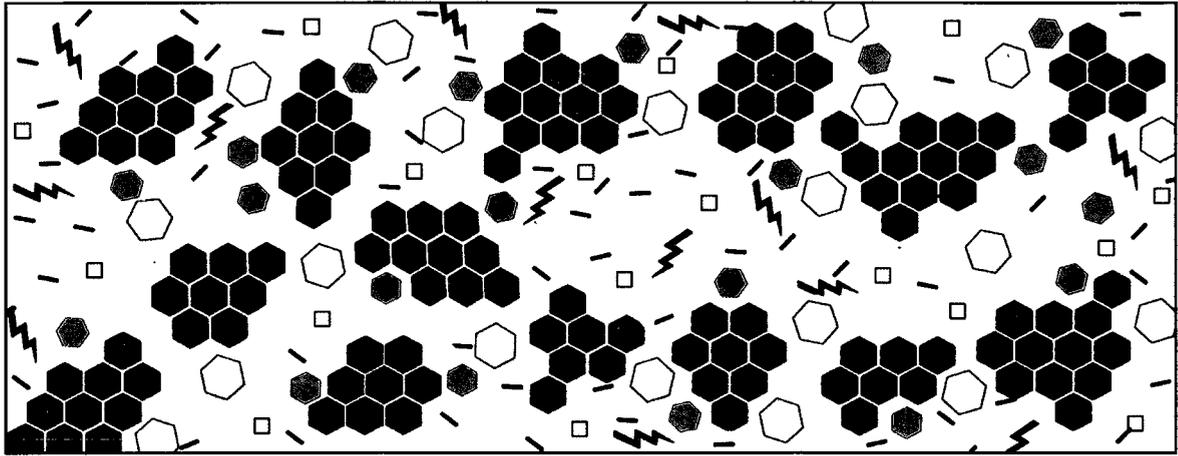


Figure 1.3 Schéma bitume type « gel ».
Adaptée de Lombardi (2007)

Légende :

	Asphaltènes	
	Hydrocarbures aromatiques à haut poids moléculaire	} Résines
	Hydrocarbures aromatiques à bas poids moléculaire	
	Hydrocarbures naphténo-aromatiques	
	Hydrocarbures naphténiques et aliphatiques	
	Huiles saturées	

1.1.3 Propriétés physiques

Rhéologie

Le bitume présente des propriétés rhéologiques intéressantes du point de vue de la construction des routes. D'une part, lorsqu'il est chauffé, il acquiert un comportement fluide et lubrifiant, facilitant le glissement des granulats les uns par rapport aux autres et permettant une maniabilité aisée de l'enrobé lors de la pose. D'autre part, une fois l'enrobé compacté et refroidi, il adopte un comportement plus proche du solide élastique, et permet un collage fort des granulats entre eux (St-Jacques, 2008).

Malheureusement, ces comportements simplifiés à l'extrême ne sont pas idéaux. En effet, le bitume ne se comporte jamais complètement comme un solide élastique parfait répondant à la loi de Hooke, ni comme un fluide newtonien parfait. C'est un matériau viscoélastique dont les caractéristiques varient en fonction de plusieurs paramètres, dont la température, le temps de chargement ou encore l'indice de pénétrabilité (IP) (lié au type gel ou sol). On considère qu'un bitume d'IP faible aura plutôt un comportement de fluide visqueux et newtonien, alors qu'un bitume d'IP élevé se comportera plus de manière élastique et non newtonienne (British Petroleum, Guide du bitume-rhéologie, s.d).

Il en résulte qu'en règle générale, les bitumes de type sol ont un IP faible, résisteront bien aux sollicitations rapides mais présenteront une sensibilité élevée à la température. Les bitumes gel auront eux des IP élevés, seront moins sensibles à la température et résisteront bien aux sollicitations lentes (Bitume Info, 2005).

Sensibilité au vieillissement

Le bitume est un matériau qui est très susceptible au vieillissement (Paranhos, 2007). Le vieillissement du bitume se manifeste dans la pratique par la perte de son élasticité : il durcit et devient fragile. Comme les ouvrages routiers sont censés performer pendant des dizaines d'années (souvent deux, voire trois) c'est une caractéristique importante à prendre en compte lors du choix du bitume et lors du processus d'enrobage, afin de ne pas mettre en péril la longévité de la chaussée.

Le vieillissement se produit de trois façons principales (Paranhos, 2007):

- Par oxydation : L'oxydation du bitume est le mécanisme qui va affecter le plus durablement et de la façon la plus importante le durcissement du bitume. Ce mécanisme fait intervenir l'oxygène de l'air qui interagit avec les molécules du bitume lors de réactions chimiques complexes. Il en résulte une déshydrogénation massive menant à la formation de molécules oxydées (carbonyles) et une accumulation des asphaltènes, soit un bitume de type gel. Cela change donc à la fois la composition du bitume mais aussi sa rhéologie. L'oxydation est favorisée par les températures élevées et la grande surface d'interface air/bitume lors du processus d'enrobage.
- Par évaporation : Le phénomène d'évaporation concerne les molécules les plus légères de la fraction malténique. En se volatilisant, ces molécules font perdre au bitume sa composition originale et donc ses propriétés. La solution colloïdale du bitume en perdant une partie de ses huiles va durcir progressivement. Bien sûr le processus d'enrobage avec sa température élevée favorise le phénomène, mais il a lieu tout au long de la vie de la chaussée, et particulièrement à la surface de la chaussée.
- Par réarrangement de sa structure : Le réarrangement de la structure du bitume afin qu'il retrouve sa structure d'équilibre en tant que colloïde en passant de sa température d'enrobage à la température ambiante peut prendre plusieurs mois. Au cours du temps il va augmenter sa viscosité et gagner en dureté. Ce processus est comparable au gain de résistance du béton de ciment, qui croit tout au long de sa vie. Contrairement aux deux autres phénomènes, il est réversible par chauffage.

Le vieillissement du bitume s'étudie grâce au test RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) qui soumet le bitume à un vieillissement accéléré. Le test, normalisé aux États-Unis par la norme ASTM D 2872 et en Europe par la norme EN 12607-1, consiste à faire passer des bouteilles de verre remplies d'un mince film de bitume devant un jet d'air à 163 °C pendant 75 min, l'exposant ainsi à l'oxydation et à l'évaporation de ses constituants les plus volatils. On détermine ensuite la perte de masse par évaporation. On mène également une analyse comparative de la viscosité dynamique du bitume avant et après vieillissement. L'indice de vieillissement est le rapport entre la viscosité du bitume vieilli et celle du bitume d'origine. Le graphique de la figure 1.4 illustre l'évolution de cet indice dans le temps.

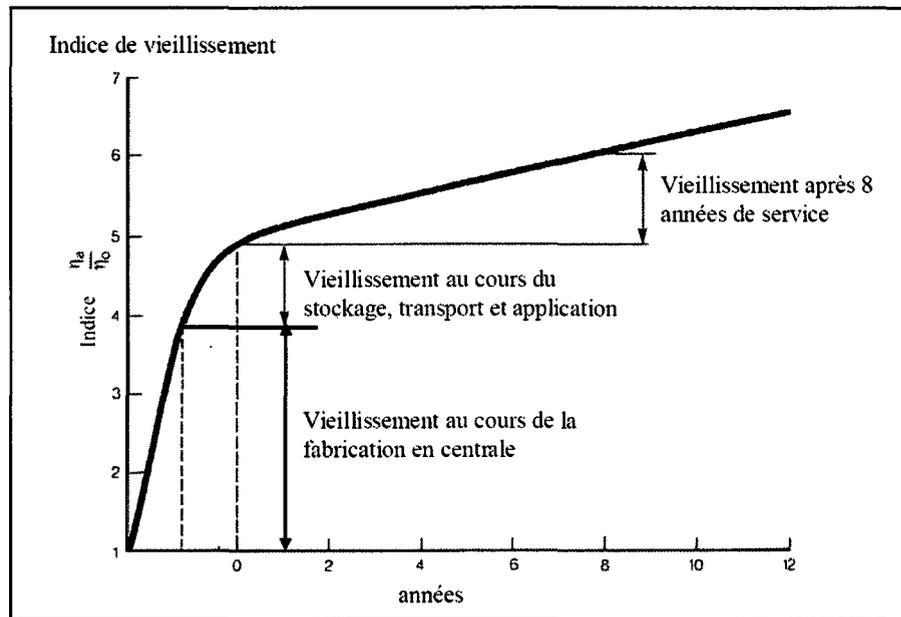


Figure 1.4 Chronologie du vieillissement du bitume.
Witheoak (1990) tirée de Paranhos (2007)

Connaissant le processus de vieillissement du bitume, il apparaît donc que le recours aux enrobés tièdes, en limitant la température du malaxage doit permettre de réduire les effets de la phase vieillissement en centrale, la plus importante. C'est à cette conclusion qu'arrivent Hurley et Prowell (2006 et 2005 a et b) concernant la majorité des additifs testés. Cet avis est partagé par l'European Asphalt Pavement Association (EAPA) dans sa prise de position vis-à-vis des enrobés tièdes (2009). Davidson (2005 a, b et c) note dans ses rapports concernant des chantiers à l'Evotherm®, que les essais sur le liant ont résulté à une perte de pénétrabilité moins importante entre le procédé tiède et le procédé chaud, montrant que le processus de vieillissement semblait moins agressif.

Sensibilité à la température

Comme cela a été évoqué concernant la rhéologie, les propriétés viscoélastiques des bitumes sont étroitement liées à la température. Les bitumes étant en fait un mélange de molécules principalement hydrocarbonées, il n'est pas possible de leur déterminer un point de fusion contrairement aux corps purs (Lombardi, 2007). Ainsi la caractérisation des bitumes est basée sur des résultats d'essais dont les caractéristiques ont été fixées de

façon arbitraire. Ces essais servent à déterminer comment va varier leur comportement en fonction de la température.

En Europe, les bitumes sont classés selon leur pénétrabilité. L'essai qui sert à déterminer la pénétrabilité est l'essai de pénétrabilité à l'aiguille. Il consiste à laisser une aiguille s'enfoncer dans un échantillon de bitume à 25°C sous une charge de cent grammes pendant cinq secondes. De la lecture, en dixième de millimètre on déduit la classe du bitume parmi celles normalisées. Plus la pénétrabilité est faible, plus le bitume est dur. Cet essai est complété par la mesure du point de ramollissement bille-anneau (cf. annexe 1).

On détermine ce que l'on appelle l'indice de pénétrabilité (IP) par une deuxième mesure de pénétrabilité à une température différente. En faisant intervenir deux mesures à des températures différentes, l'IP permet de mettre en relation l'évolution de la consistance du bitume avec la température : sa susceptibilité thermique (Guide du bitume BP).

En Amérique du Nord, on utilise d'autres essais pour classer les bitumes. Ils sont basés sur les recommandations du Strategic Highway Research Program (SHRP). On s'intéresse à la plage de température dans laquelle le bitume peut servir sans risque de déformation par fluage (température maximale) et sans fissuration (température minimale). La valeur supérieure de la plage est déterminée par essai dans un rhéomètre à cisaillement dynamique, en anglais Dynamic Shear Rheometer (DSR), et la valeur basse à l'aide d'un rhéomètre à flexion de poutre, en anglais Bending Beam Rheometer (BBR).

Les sensibilités à la température des bitumes étant ce qu'elles sont, il est nécessaire de les chauffer suffisamment afin de les rendre assez fluides pour pouvoir les pomper et les transférer dans des tuyaux lors de leur utilisation industrielle. Au cours de la fabrication d'enrobés tièdes, il n'y a pas de dérogation à cette règle. Ainsi, à moins d'avoir recours à des additifs modifiant la viscosité du bitume ou à une émulsion, dans la plupart des cas, le bitume est autant chauffé que l'enrobé soit fabriqué tiède ou chaud. Sinon, son transfert du lieu de stockage au lieu d'utilisation ne serait pas possible.

Systèmes de classification

Des essais précédents, on tire une classification des bitumes.

En France, il existe donc des classes de bitumes faisant intervenir les pénétrabilités, comme la classe 20/30 correspondant à un bitume dur par exemple (Brosseau et St-Jacques, 2007). Cela signifie que lors de l'essai de pénétrabilité, l'aiguille s'est enfoncée de 20 à 30 dixièmes de millimètres dans le bitume à 25°C.

En Amérique du Nord, on classe les bitumes par leur grade de performance PG (Performance Grade), caractérisant leur plage d'utilisation recommandée. Tous les bitumes sont ainsi identifiés par un nom du type PG T_H-T_B , où T_H est la température maximale et $-T_B$ la température minimale d'utilisation. Par exemple, on peut avoir des bitumes de classe PG 58-28 ou PG 70-22. Plus T_H est élevée plus le bitume sera dur.

Il n'existe pas de correspondance exacte entre les deux systèmes. L'évaluation peut malgré tout se faire d'après l'expérience des entrepreneurs.

1.2 Enrobés bitumineux

1.2.1 Constituants

L'enrobé bitumineux, ou béton bitumineux en France, est un matériau utilisé dans la construction des chaussées. Il s'agit, selon les formulations, d'un mélange de différentes fractions de granulats concassés, de sable, de filler et de bitume. Ce dernier généralement présent à hauteur de 5 % fait office de liant hydrocarboné pour maintenir la cohésion des granulats (St-Jacques, 2008).

Appliqué en plusieurs couches compactées les unes après les autres, il forme toute ou partie de la structure de la plupart des chaussées des pays développés. En fonction des utilisations et des conditions de service, la granulométrie, le type de bitume ou encore le pourcentage de bitume peuvent varier. On trouve ainsi toute une gamme d'enrobés normalisés dépendamment de leur usage, sans compter les produits spécifiques développés par les entrepreneurs du secteur.

- Graves-bitumes,
- Enrobés de liaison,
- Enrobés de surface.

La plupart des enrobés sont fabriqués à chaud, à cause des propriétés du bitume présentées précédemment. Dans la majorité des cas la température de fabrication oscille entre 160°C et 180°C. Cependant, il existe aussi des enrobés dits « à froid » dont le liant est une émulsion de bitume, permettant de maintenir la maniabilité à température ambiante. Ces enrobés sont utilisés pour des travaux spécifiques tels que le rebouchage des nids de poule ou des petits travaux de réparation. Ils ne sont pas destinés à supporter les mêmes contraintes de service que les enrobés chauds.

1.2.2 Propriétés

Les raisons pour lesquelles la plupart des chaussées sont construites en enrobé bitumineux sont multiples. D'une part, c'est un matériau financièrement intéressant dans la plupart des cas comparativement aux chaussées en béton de ciment, et indéniablement comparativement aux chaussées recouvertes de pavés. Le rendement en terme de rapidité de construction est élevé de par sa facilité de mise en œuvre. D'autre part, il permet une remise en service rapide des routes après son application, le matériau n'ayant besoin que d'un temps de cure limité.

La plupart des chaussées sont conçues pour durer entre 20 et 30 ans. Cela est rendu possible grâce aux performances en terme de résistance des enrobés soumis au trafic. Ils font preuve d'une durabilité importante et doivent résister entre autres à (St-Jacques, 2008) :

- L'orniérage : déformation par fluage due au passage répété des véhicules lourds,
- L'arrachement : c'est le rôle du bitume d'assurer la cohésion du squelette granulaire,
- La fissuration : les couches inférieures de la chaussée, soumises à des contraintes de traction peuvent à terme fissurer par fatigue, et ces amorces peuvent remonter à la surface, détériorant la qualité de la route.

En plus de cela, les enrobés doivent apporter et conserver :

- Rugosité : c'est un élément primordial de sécurité permettant une bonne adhérence des pneumatiques sur la route. Elle est apportée par les granulats et le bitume fait en sorte de la conserver en maintenant ceux-ci en place.
- Étanchéité : L'usage de matériaux bitumineux permet grâce à l'hydrophobie du bitume d'étanchéifier l'ouvrage, protégeant ainsi les fondations des dégâts que peut causer l'eau d'infiltration.
- Uni : l'uni représente la régularité de la chaussée. C'est en fonction de sa qualité que l'utilisateur ressentira ou non du confort lors de la conduite. Une dégradation d'uni se traduit par des vibrations, des secousses ou toute autre forme de chocs.

1.2.3 Méthode de fabrication

La fabrication des enrobés se fait en centrale dédiée. Il existe plusieurs types de centrales, adaptées en fonction du type de produit que l'on fabrique. Deux familles se distinguent malgré tout : les centrales continues et les centrales discontinues. Dans chaque centrale on retrouve les éléments suivants (Paranhos, 2007) :

- Un système de dosage des granulats, constitué de trémies que l'on remplit de granulats, et de tapis roulants qui permettent le transfert et le dosage en fonction de la formule de l'enrobé.
- Un système de séchage des granulats, constitué d'un tambour rotatif et d'un brûleur au fioul ou au gaz. La flamme créée nécessite un grand flux d'air.
- Un système de dépoussiérage, utilisé afin de récupérer les particules fines qui s'envolent lors du séchage. Ces particules sont généralement réintroduites dans le circuit d'alimentation en granulats. C'est par ce système filtrant que transitent les émissions gazeuses dues à la combustion avant de s'échapper par une cheminée.
- Un parc à liant, permettant de stocker le bitume et de le porter à température d'enrobage.
- Un système de malaxage granulats/bitume.
- Un système de stockage de l'enrobé avant transfert aux camions.

On trouve aussi un système qui permet l'incorporation de granulats recyclés dans le malaxeur. Ces fraisats ne sont pas chauffés pour ne pas vieillir davantage le bitume ancien qu'ils contiennent.

Le chauffage des granulats peut se faire à co-courant ou à contre-courant vis-à-vis de la flamme du brûleur, dépendamment de la technologie retenue par le fabricant (figures 1.5 et 1.6).

Centrale discontinue

Les centrales discontinues sont des centrales qui permettent de faire facilement des changements de production. Le plus souvent fixes, elles répondent à des besoins ponctuels et variables de petits à moyens tonnages.

Les granulats sont chauffés puis stockés séparément après avoir été tamisés. En fonction de la formule demandée, on pèse la quantité requise de chaque type de granulats, de bitume et on malaxe la gâchée (figure 1.5).

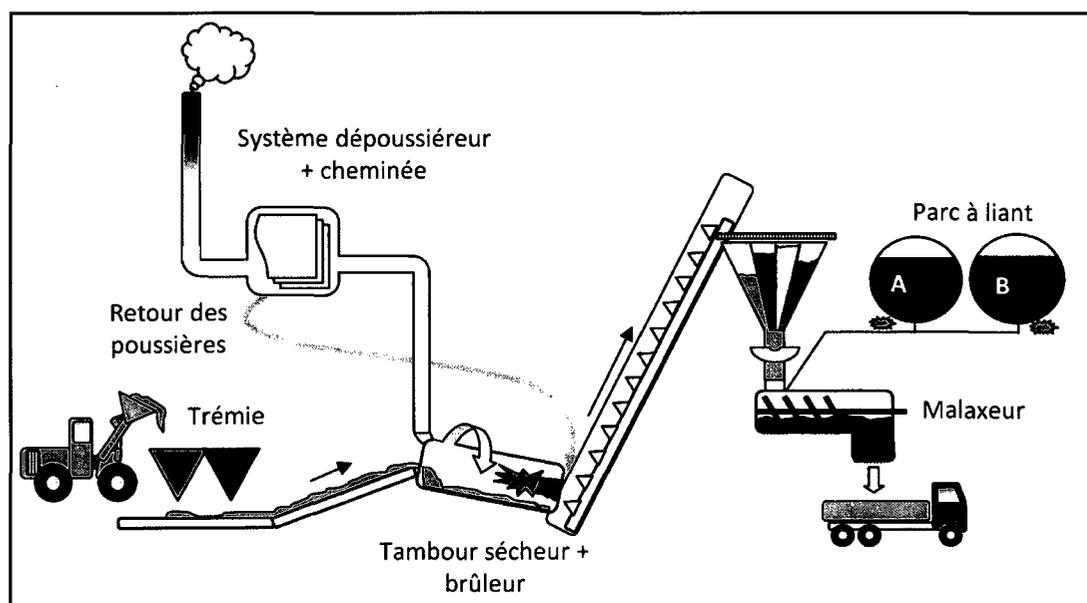


Figure 1.5 Centrale discontinue à séchage à contre-courant.

Centrale continue

Dans ce type de centrale, les matériaux s'écoulent en continu dans l'unité de malaxage, le dosage se faisant de manière volumétrique. Leur fonctionnement est similaire à celui des centrales discontinues, mis à part le système de pesée. Elles sont donc adaptées pour faire de gros volumes d'un seul type de mélange. Généralement mobiles, ces centrales peuvent être déplacées pour suivre la progression des chantiers, comme dans le cas d'une autoroute.

Depuis les années 70, ces centrales ont tendance à être remplacées par des centrales TSE (Tambour Sécheur-Enrobeur) qui permettent d'effectuer le séchage et l'enrobage des granulats dans la même unité (figure 1.6).

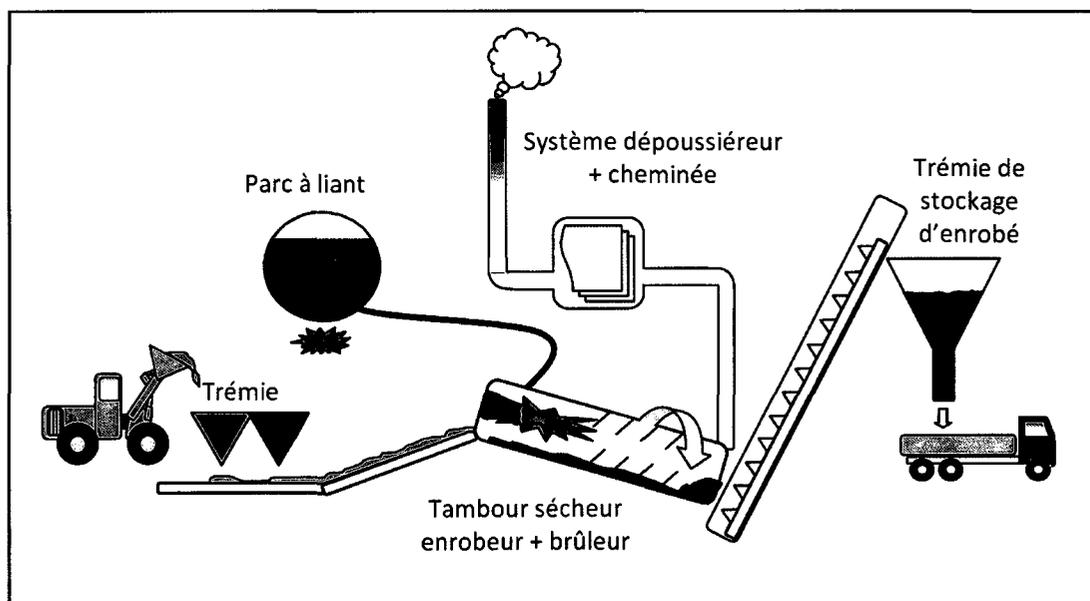


Figure 1.6 Centrale continue type TSE à séchage co-courant.

Dans son document sur l'utilisation des enrobés tièdes en Europe, la Federal Highway Administration (FHWA) américaine rapporte une prévalence de l'utilisation de centrales discontinues contrairement à l'Amérique du Nord (D'Angelo et al, 2008). Le groupe d'experts note, que ce système permet un séchage accru des granulats grâce à leur stockage prolongé à haute température. En outre, ce rapport pointe le fait que les granulats

nord-américains présentent généralement une teneur en eau plus importante que leurs équivalents européens. L'eau résiduelle dans les granulats lors de leur séchage pose un sérieux problème concernant la résistance attendue des enrobés. C'est une préoccupation des entrepreneurs, d'autant plus que les enrobés tièdes impliquent de moins chauffer les granulats. Le choix du type de centrale n'est donc pas anodin lorsque l'on souhaite produire des enrobés tièdes. Pour autant, il n'est pas fait mention de réserves concernant l'utilisation de centrales continues.

1.3 Méthode de formulation

Il existe plusieurs méthodes de formulation des enrobés. Pour ainsi dire, chaque pays ou presque possède la sienne, basée sur les matériaux locaux, les climats et l'expérience accumulée dans le domaine. Au Québec, la méthode de formulation utilisée est celle mise au point par le Laboratoire des Chaussées (LC), qui s'inspire à la fois de la méthode Française et de la méthode Américaine Superpave du SHRP. Ces méthodes sont validées et normalisées pour des mélanges à chaud, mais il n'existe encore aucune norme concernant les enrobés tièdes. Toutes les formulations se font donc, de fait, sur la base des modèles existants. Voici dans les grandes lignes les caractéristiques de chacune.

1.3.1 Méthode Française

La méthode française a été développée par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). Elle se décompose en deux étapes principales. La première consiste à choisir les matériaux, bitume et granulats (dont le fuseau granulométrique est défini par expérience), et à *fixer un pourcentage de bitume* pour le mélange, par rapport à la masse de granulats. On procède ensuite au mélange et au compactage à la Presse à Cisaillement Giratoire (PCG). Si les vides obtenus sont trop importants, on ajuste la granulométrie et on reprend les tests (figure 1.7).

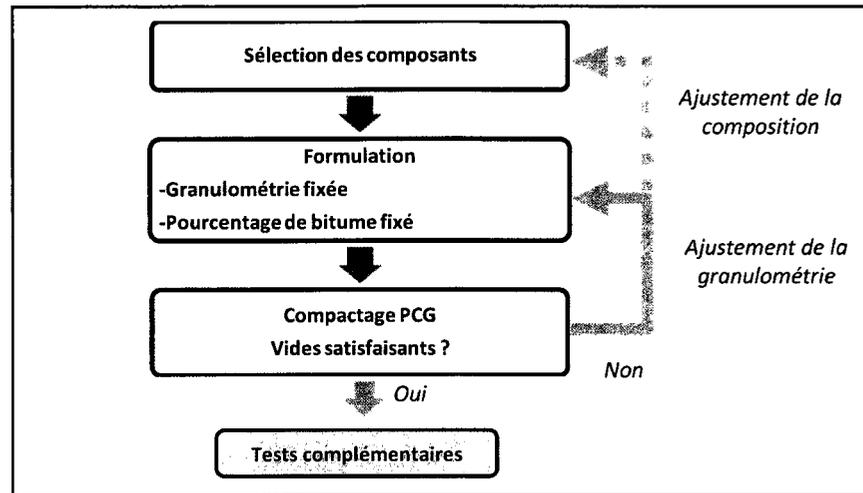


Figure 1.7 Méthode de formulation française.

Une fois la première étape passée avec succès, le mélange produit avec la formule retenue passe une batterie de tests supplémentaires : ornièreur, détermination du module, fatigue sur éprouvettes trapézoïdales, sensibilité à l'humidité (essai Duriez).

1.3.2 Méthode Superpave

La méthode Superpave a été mise au point suite aux travaux du SHRP. Contrairement à la méthode Française, elle ne consiste pas à faire varier la granulométrie, mais la teneur en bitume du mélange. Après avoir choisi les matériaux, granulats et bitume, on fixe une granulométrie à l'intérieur d'un fuseau normalisé. On fait ensuite plusieurs mélanges à différentes teneurs en bitume (calculées par rapport à la masse totale d'enrobé cette fois), et on compacte les mélanges à la PCG. La méthode préconise des pourcentages de vides à respecter en fonction du nombre de girations effectuées par la presse. Il faut donc, pour déterminer le pourcentage optimal de bitume, avoir des résultats au dessus et en dessous de cet optimal afin de pouvoir le déterminer par interpolation. Dans le cas de la figure 1.8, par exemple, la teneur optimale en bitume se situe entre 5% et 5,5%.

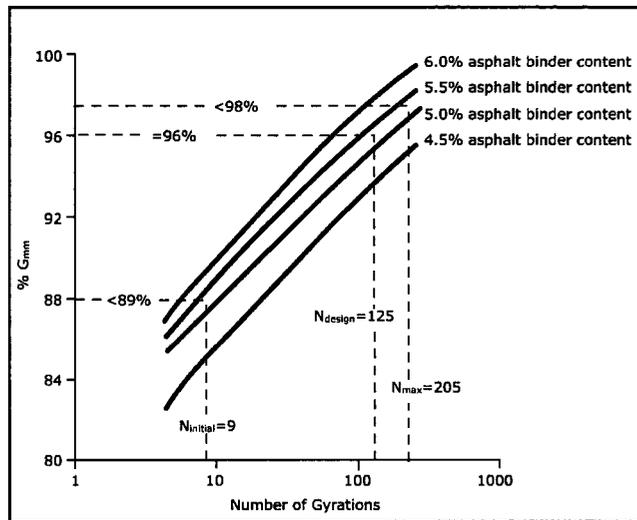


Figure 1.8 Détermination de la teneur optimale en bitume.
Tirée de Muench (2003)

Ensuite, comme pour la méthode Française, viennent une série de tests complémentaires tels que la susceptibilité à l'humidité (Tensile Strength Ratio, TSR), orniérage, etc. Il faut noter que les bitumes sont choisis en fonction de la zone géographique où l'on se trouve. Les zones sont déterminées en fonction de leurs caractéristiques climatiques. En fonction de ces données climatiques et du trafic envisagé, le grade PG du bitume approprié est retenu.

La PCG utilisée est légèrement différente de la PCG française, et les exigences granulométriques sont différentes (ne serait-ce que par la différence de système d'unités).

1.3.3 Méthode LC

La méthode LC est la méthode développée par le Laboratoire des Chaussées du ministère des Transports du Québec (MTQ). Elle se base à la fois sur des éléments issus des méthodes LCPC et Superpave.

Comme la méthode française, elle se base sur la fixation, au départ, d'une certaine quantité de bitume, inchangée lors du processus. Cependant, la quantité de bitume est fixée non pas en pourcentage par rapport aux granulats, mais en volume de bitume effectif. C'est-à-dire le

volume de bitume non absorbé par les granulats, servant effectivement au collage des granulats. En fonction des résultats de compaction à la PCG, on ajuste la granulométrie jusqu'à l'obtention d'un mélange satisfaisant l'exigence de vides.

Cependant, la méthode LC utilise la PCG, les exigences granulométriques et les calculs de proportions (par rapport à l'enrobé et non aux granulats) de Superpave. Ceci s'explique par la proximité du Québec avec les utilisateurs du système Superpave, et la nécessité de pouvoir adapter les formulations québécoises aux besoins extérieurs au Québec.

Comme les deux méthodes précédentes, il s'ensuit une batterie de tests complémentaires, comme la tenue à l'eau (LC 26-009), l'orniérage (basé sur la norme française), etc.

1.4 Logiciels d'analyse de cycle de vie – Eco-comparateurs

Aujourd'hui, pour convaincre les maîtres d'œuvres et d'ouvrages en infrastructures routières, bien souvent il ne suffit plus de présenter une estimation de coûts et des résultats de performances d'enrobés. L'aspect environnemental commence également à rentrer en ligne de compte dans le processus d'attribution des contrats. Le développement des solutions « vertes » en est la preuve. Par exemple, en mars 2009, les entreprises adhérentes de l'Union des Syndicats de l'industrie Routière Française (USIRF) ont signé la Convention d'Engagement Volontaire, dans laquelle elles s'engagent pour la lutte contre les changements climatiques et la préservation de l'environnement. Un des articles de cette convention stipule que les signataires s'engagent à :

« Accroître la performance environnementale des entreprises et des infrastructures : En favorisant (dès septembre 2009) la comparaison des solutions environnementales par la création d'un « Eco-comparateur » commun aux entreprises, validé par l'ADEME, portant sur l'énergie consommée, les émissions de gaz à effet de serre, la préservation de la ressource naturelle. »

USIRF, Synthèse de la CEV, 2009

Cet éco-comparateur est le logiciel SEVE (Système d'Évaluation des Variantes Environnementales). C'est aujourd'hui un outil commun utilisable par les entreprises signataires. Ce logiciel permet de faire une analyse comparative d'une solution « classique » et d'une solution alternative « écologique » (Leroy et al, 2010).

Plusieurs entreprises françaises ont déjà développé leur propre éco-comparateur. Parmi elles on retrouve Colas avec « Ecologiciel », dont la filiale au Québec est Sintra et Eurovia avec « Gaïa », dont la filiale au Québec est DJL. Tous ces logiciels, antérieurs à SEVE, fonctionnent comme lui et effectuent des comparaisons entre les procédés mis en œuvre lors de la construction d'une chaussée. Les comparaisons se font sur la base d'indicateurs environnementaux, d'une part ceux de la norme française NF P01-010 : *Qualité environnementale des produits de construction - Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction* (tableau 1.1), et d'autre part sur des indicateurs internes propres à l'entreprise et adaptés à son activité (tableau 1.2).

Tableau 1.1 Indicateurs de la norme française NF P01-010

Indicateur	Unité
Épuisement des ressources (ADP)	kg équivalent d'antimoine* (Sb)
Consommation de granulats	Tonne
Consommation d'eau	litre
Consommation des ressources énergétiques	Méga Joule
Émission de gaz à effet de serre	kg équivalent CO ₂
Acidification atmosphérique	kg équivalent SO ₂
Pollution de l'air	m ³
Pollution de l'eau	m ³
Formation d'ozone photochimique	kg équivalent C ₂ H ₄
Déchets solides	kg

* Échelle de rareté

Aujourd'hui, Gaïa est utilisé au Québec par DJL. Les indicateurs supplémentaires développés en interne sont (documentation Gaïa) :

Tableau 1.2 Indicateurs internes

Indicateur	Unité
Déblais évacués pour valorisation	m ³
Déblais stockés	m ³
Recours aux ressources naturelles	%
Consommation directe de fioul	litre
Transport global	Tonne.km
Transport local routier	Tonne.km

Ces indicateurs servent principalement en interne, et n'ont pas forcément de valeur traduisible directement en terme d'impact environnemental. Par exemple, la consommation directe de fioul représente la consommation faite durant les activités de DJL uniquement (la facture de carburant en somme), et ne prend pas en compte le fioul dépensé par les activités connexes (production et transport des matières premières).

Ces logiciels ne permettent pas d'effectuer une analyse complète du cycle de vie (ACV) de la chaussée depuis la production de ses granulats jusqu'à son recyclage en fin de vie. Le type d'analyse retenu est l'analyse partielle. En effet, au sens de la norme ISO 14040 définissant l'ACV, le cycle de vie comprend :

« [Les] phases consécutives et liées d'un système de produits, de l'acquisition des matières premières ou de la génération des ressources naturelles à l'élimination finale. »

Source : Norme ISO 14040

Dans le cas présent, l'analyse menée ne tient pas compte de l'utilisation du produit et de sa fin de vie. En effet, ces phases ne sont pas du recours de l'entrepreneur, il ne peut donc pas s'engager sur la fréquence des cycles d'entretien et de l'utilisation qui est faite de la route. L'analyse se limite donc aux phases allant de la production de matière première à la livraison de l'ouvrage (figure 1.9).

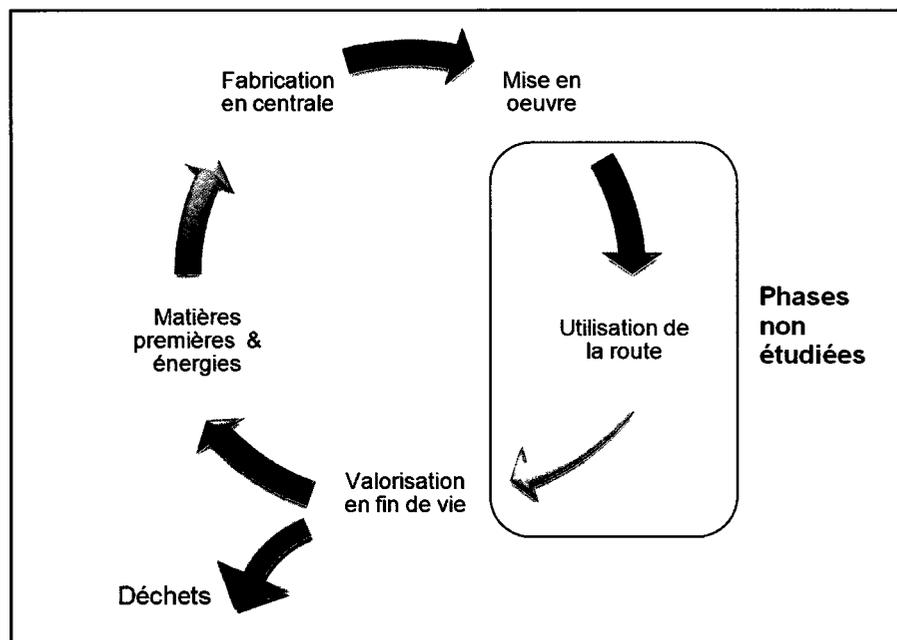


Figure 1.9 Cycle de vie de l'enrobé bitumineux.
Adaptée de Leroy et al. (2010)

Malgré cette analyse incomplète, il reste néanmoins possible de mener une étude comparative entre différentes solutions pour une même chaussée. Il faut toutefois tenir compte du fait que l'on travaille avec l'hypothèse d'une durée de vie équivalente entre les deux solutions, et d'une valorisation équivalente. Dans le cas contraire, l'étude n'a aucun sens. C'est le cas pour les enrobés tièdes, que l'on souhaite voir performer aussi bien que les enrobés à chaud, et dont la fin de vie ne présente pas de différence notable avec la solution classique.

1.5 Utilisation en chantier

1.5.1 Types d'enrobés utilisés

L'industrie de la construction routière utilise diverses formulations d'enrobé bitumineux correspondant aux diverses utilisations qui en sont faites. Voici les principaux types d'enrobés que l'on peut trouver dans une chaussée. En fonction des pays et de leurs normes respectives, il peut y avoir des variations.

Fondations

La fondation d'une chaussée est généralement faite d'une couche épaisse de matériaux granulaires. Cette couche repose sur le sol. Parfois, pour plus de stabilité, si le sol est peu porteur, on le traite à la chaux. Au dessus de cette couche de fondation, on trouve généralement la couche de base, faite de gros granulats et de bitume. On appelle ce matériau de la grave-bitume. Cette couche est censée donner sa rigidité à la chaussée et va reprendre les efforts en traction. Le bitume utilisé est généralement dur, afin de lui donner une grande rigidité. Sa durée de vie est d'au moins 20 ans.

Couches de liaison

La couche de liaison sert comme son nom l'indique à faire la liaison entre la couche de base et la couche de roulement. Elle permet à la chaussée de gagner encore en module, grâce à son épaisseur. Cela signifie que la chaussée va voir sa rigidité augmenter. Généralement les granulats utilisés ne dépassent pas 14 mm. Sa durée de vie peut être inférieure à la couche précédente, pour la prolonger on procède à des rechargements. C'est-à-dire qu'après avoir fraisé la couche de surface lors de travaux d'entretien, on augmente l'épaisseur de la couche de liaison en rajoutant de l'enrobé.

Couches de roulement

La couche de roulement est la couche qui est en contact avec les pneumatiques des véhicules. C'est la seule couche visible des utilisateurs et elle doit assurer la plupart des qualités citées précédemment, tout en ne faisant que quelques centimètres d'épaisseur (généralement aux environs de 5). On l'appelle aussi couche d'usure, car elle s'use

prématurément comparée aux couches inférieures. Elle a une durée de vie de 5 à 10 ans. La granulométrie ne dépasse généralement pas 10 mm, la formulation la plus courante au Québec étant des ESG-10 ou des EG-10. C'est principalement dans cette couche que les enrobés tièdes sont utilisés aujourd'hui. En effet, les risques sont plus grands d'utiliser un produit mal connu dans les couches inférieures censées durer des dizaines d'années si jamais il performe mal. De plus le suivi des performances dans le temps est facilité par l'observation directe en surface de la couche d'enrobé.

1.5.2 Application et compactage

L'application des enrobés se fait au finisseur. C'est une machine munie d'une trémie à l'avant pour réceptionner l'enrobé des camions, et qui le transfère à l'arrière de l'appareil grâce à un tapis convoyeur. Il est ensuite réparti à l'aide de vis sans fin sur la largeur désirée, pouvant atteindre une dizaine de mètres (figure 1.10). L'enrobé ainsi réparti est précompacté par une table vibrante articulée par une liaison pivot à l'engin, et flottante par rapport à l'enrobé. Cette table, accessoirement chauffante, permet d'obtenir une compaction importante de l'enrobé avant le passage des rouleaux, qui terminent le travail afin d'atteindre le pourcentage de vides désiré. Parfois le transfert de l'enrobé du camion à la trémie du finisseur se fait par l'intermédiaire d'un Véhicule de Transfert de Matériaux (VTM), engin qui remalaxe et homogénéise l'enrobé afin d'éviter son agglomération et la ségrégation après le transport. L'obtention du pourcentage de vides désiré est primordial, la durée de vie de l'ouvrage pouvant être considérablement réduite dans le cas contraire.

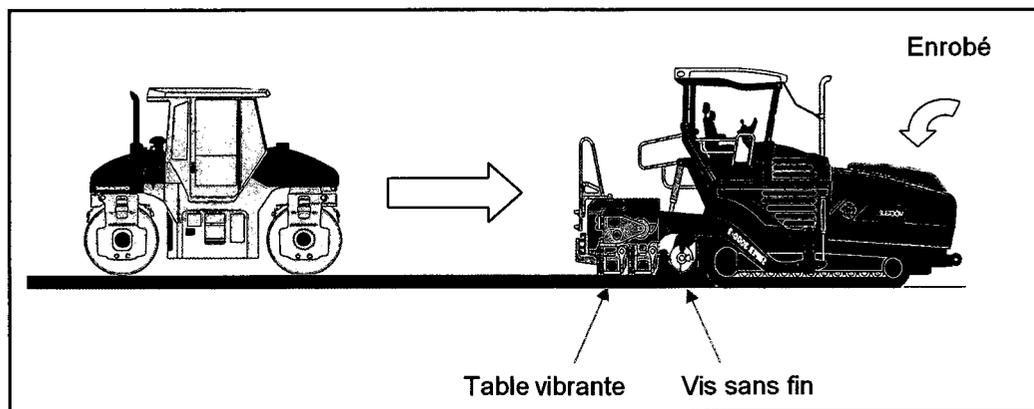


Figure 1.10 Application de l'enrobé.
Adaptée de documents techniques Dynapac et Vögele.

Toutes ces étapes postérieures à la fabrication en centrale prennent un certain temps. Temps pendant lequel la température de l'enrobé chute. La norme au Québec préconise une baisse inférieure à 15°C entre le malaxage et le compactage. Au-delà, on considère qu'il risque d'y avoir des problèmes à la compaction. Il est donc évident que la phase de transfert de l'usine au chantier doit se faire le plus rapidement possible. Les enrobés tièdes, présentant un gradient thermique avec l'extérieur plus faible que les solutions classiques perdent moins vite leur chaleur. Ils permettent ainsi de limiter l'empressement après la fabrication.

Lors de la tournée européenne de la FHWA concernant l'utilisation des enrobés tièdes (D'Angelo et al, 2008), il a été remarqué que les paveuses utilisées sur le vieux continent produisaient généralement une compaction plus importante que les paveuses américaines avant le passage des rouleaux. Cette particularité est due à la présence de barres de bourrage dans la table vibrante (figure 1.10). Bien que cela favorise l'obtention du pourcentage de vides optimum, l'équipe de recherche de la FHWA n'y voit pas d'inconvénient pour l'adaptation des techniques européennes d'enrobés tièdes en Amérique.

1.6 Enrobés tièdes

1.6.1 Historique et genèse

La philosophie originale de la technique des enrobés tièdes se résume ainsi : réduire la température des mélanges à base de bitume afin d'économiser de l'énergie. Il n'est pas pour autant question d'obtenir des produits bas de gamme et affichant de moindres performances. Tout le défi est donc de garder le niveau de qualité des technologies à chaud. Le problème est que si l'on diminue la température de l'enrobé, la viscosité du produit, due en réalité à celle du bitume, augmente de telle sorte qu'il n'est matériellement plus possible de procéder à la pose du matériau de façon correcte (Brosseaud et St-Jacques, 2007). Il a donc fallu trouver des moyens afin de contourner cette viscosité trop importante à basse température. La clé du problème consiste à maîtriser la viscosité et la maniabilité des enrobés et à garantir leur caractère non évolutif une fois posés (vieillessement, désenrobage, etc). Plusieurs entreprises ont d'ores et déjà développé des technologies qui leur sont propres principalement en Europe, les entreprises de travaux

publics disposant de laboratoires de recherches conséquents. La première fut Shell ; la compagnie pétrolière mit au point un procédé de double enrobage par bitume mou et mousse de bitume dur il y a un peu plus de 10 ans. Ce procédé est appelé WAM Foam. Depuis, différentes techniques ont été mises au point.

Il existe pour ainsi dire trois familles de technologies :

- Le moussage / émulsion,
- L'addition d'additifs organiques,
- L'addition de produits chimiques.

Les promoteurs de ces technologies mettent en avant les nombreux avantages de leurs produits, parmi lesquels on retrouve le plus souvent :

- Baisse de la consommation de fioul dans les centrales,
- Diminution des émissions,
- Amélioration des conditions de travail,
- Meilleure compaction du fait de la faible viscosité,
- Augmentation des distances de transport,
- Possibilité de paver par temps froid,
- Procédés plus enclins à accepter des matières recyclées,
- Réouverture rapide au trafic.

Malgré tout, leur utilisation reste timide. En effet, il y a encore quelques obstacles à un recours massif à ces technologies. Bien que les retours d'expériences commencent à se faire de plus en plus nombreux, les performances à long terme sont encore mal connues (D'Angelo et al, 2008). Or s'il y a bien un point qui fait le consensus en Europe ou aux États-Unis, c'est que les enrobés tièdes doivent performer aussi bien (voire mieux) que les enrobés actuels. Les questions de responsabilité et de garantie en cas de défaillance sont un sujet épineux, les sommes en jeu étant relativement importantes (EAPA, 2009). D'autre part, le coût d'adaptation des équipements rentre en compte pour certaines entreprises. Enfin, il n'y a pas eu de réelle demande jusqu'à présent de la part des maîtres d'ouvrages ni

des clients concernant l'utilisation de ces produits. Une façon de promouvoir ces technologies serait de convaincre les décideurs avec des chiffres vérifiés.

Cependant, l'intérêt est croissant de la part des autorités routières de divers pays, y compris en Amérique du Nord où les premières expériences ont été menées en 2005. Mais quelle solution choisir ? Comment départager les bonnes idées des mauvaises ? Plusieurs organismes se sont penchés sur la question, notamment le Setra en France, ou les FHWA et NCHRP aux États-Unis. Des programmes de plusieurs centaines de milliers de dollars sont en cours actuellement afin de répondre à ces interrogations (Corrigan, 2008). En fait, tout dépend des approches existantes, l'Europe et l'Amérique ayant déjà des visions différentes en ce qui concerne les enrobés chauds (système PG et « mix design » américain versus expériences européennes). Malgré tout, des transferts de technologie existent entre les deux continents, par le biais des filiales ou autres partenariats entre entreprises.

D'une manière générale, il est pour l'instant conseillé de suivre les procédures classiques d'élaboration des enrobés bitumineux (EAPA, 2009), les normes pour enrobés tièdes n'ayant pas encore été rédigées dans aucun pays. L'expérience acquise durant la décennie passée a permis de soulever quelques aspects importants. Le plus important fut celui de la teneur en eau des granulats (D'Angelo et al, 2008). Il ne fait plus de doute aujourd'hui que la baisse de la consommation en énergie dans le secteur ne pourra se faire qu'avec la maîtrise de la teneur en eau des granulats, l'évaporation de l'eau étant un poste très énergivore du procédé d'enrobage.

1.6.2 Technologies existantes

Additifs organique

- **Cire Sasobit**

L'ajout d'additifs organiques consiste à mélanger au bitume des paillettes de cire qui ont pour effet de créer un palier de viscosité, permettant à partir d'une certaine température de réduire la viscosité du liant et donc de permettre un enrobage et une maniabilité identique à une température moins élevée que la normale. Le plus connu d'entre eux est Sasobit®, un composé polymère, produit de Sasol Wax Americas Inc.

Cet additif particulier est une cire composée de longues chaînes polymères obtenue à partir d'une technique de vaporisation du charbon suivant le procédé Fischer-Tropsch, utilisé dans l'obtention d'hydrocarbures de synthèse. Les molécules, d'une longueur variant de 40 à 115 atomes de carbone, sont obtenues par réaction entre du monoxyde de carbone et du dihydrogène. Ce matériau présenté sous forme de flocons ou de granulés est une cire plastomère qui permet d'abaisser la viscosité du bitume dans l'enrobé quand il y est mélangé à un taux variant de 0,8 à 3 % en masse du bitume (figure 1.11). Ainsi, il est possible de réduire la température du mélange de 18 à 54° C lors de la fabrication tout en gardant une maniabilité équivalente (Hurley et Prowell, 2005 b). Le Sasobit® a un point de congélation de 102°C et se dissout complètement dans le liant bitumineux au-delà de 120°C. Cela donne par ailleurs les limites de températures de cette technique : on ne pourra pas descendre sous les 120°C lors du mélange sous peine de perdre les effets désirés de plastifiant.

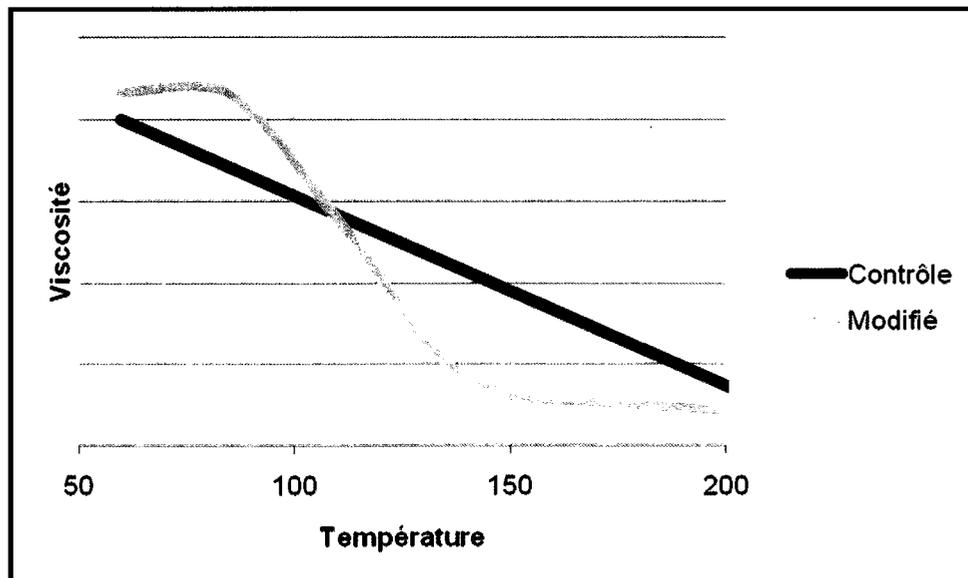


Figure 1.11 Illustration du changement de viscosité du bitume avec l'additif Sasobit.

En cristallisant, le Sasobit permet de raidir la structure de l'enrobé, car l'indice de performance (PG) du liant bitumineux se trouve en effet artificiellement décalé vers le haut du fait des propriétés de l'additif. Ceci permet d'augmenter la résistance à l'orniérage par temps chaud, mais dégrade le comportement par temps froid en faisant

perdre à l'enrobé son élasticité et donc favorisant la fissuration. C'est pourquoi il est recommandé d'utiliser en plus du plastomère Sasobit® un élastomère permettant de rétablir le caractère flexible de la chaussée à basse température. L'additif résultant élaboré par la même compagnie s'appelle Sasolwax®Flex (Sasol Inc, s.d).

On notera que selon les pourcentages d'additifs utilisés, il est possible de modifier la viscosité des bitumes, et donc de changer leur grade. À titre d'exemple, des essais en laboratoire ont donné les résultats suivants (Hurley et Prowell, 2005 b) :

- PG 58-28 + 2,5 % Sasobit → PG 64-22
- PG 58-28 + 4 % Sasolwax®Flex → PG 70-22
- PG 64-22 + 4 % Sasolwax®Flex → PG 76-22

La même étude a mis en évidence que ces produits permettaient de réduire le pourcentage des vides du mélange lors de la compaction d'une valeur de 0,87% (statistique). La sensibilité à l'orniérage est réduite grâce à l'utilisation du Sasobit à température équivalente comparé à un mélange classique. Enfin, la sensibilité à l'humidité est incontestablement accrue sans l'utilisation d'un agent antidésenrobage.

Addition d'eau - contrôle de teneur en eau

- **Zéolite – Asphamin**

Les enrobés contenant de l'Aspha-min sont produits principalement par l'entreprise Eurovia et ses filiales. Ils font partie de la gamme Tempera®, regroupant les enrobés tièdes du groupe. Il existe de la zéolite naturelle et de la zéolite artificielle, les deux ayant été utilisées (Eurovia, 2009).

Cette technologie consiste à intégrer dans le malaxeur en même temps que le bitume, des cristaux de silicates d'aluminium hydro-thermiquement cristallisés dans une proportion de 0,3% de la masse totale. Ils contiennent approximativement 21 % en masse d'eau sous forme cristalline. Lors du mélange entre les cristaux et le bitume,

sous l'effet de la chaleur, l'eau se vaporise et crée une expansion du liant diminuant ainsi sa viscosité, et permettant un enrobage plus aisé des granulats (Kristjandottir, 2006).

La réduction de température qui s'ensuit est de l'ordre de 30° C, et cette méthode s'applique à tous les types de bitumes. Généralement, l'alimentation en cristaux se fait par une ligne d'alimentation pneumatique directement dans le mixeur. Les bénéfices environnementaux selon Eurovia, sont une réduction de 20 % de la consommation d'énergie et de 18 à 25 % concernant les émissions de fumées (Eurovia, 2009).

Le NCAT (Hurley et Prowell, 2005 a) a montré que l'addition de zéolite permettait de réduire les vides dans un enrobé, comparativement au même mélange sans zéolite. Elle n'affecte pas le module résilient de l'enrobé, mais la sensibilité à l'humidité reste un problème à cause de la faible température de compaction.

- **LEA**

La technologie LEA (pour Low Energy Asphalt) est une innovation de l'entreprise française Eiffage. Elle repose sur l'utilisation de l'eau résiduelle naturelle lors du séchage des granulats. En effet, au lieu de sécher complètement les granulats pour l'enrobage, cette méthode préconise de garder une partie de leur humidité (environ 2%) permettant un moussage naturel du bitume lors de son introduction.

Cette pratique, bien que paradoxale, facilite ainsi l'étape d'enrobage par auto-expansion du bitume. De cette façon, on réduit considérablement la consommation d'énergie, puisque l'on supprime une partie de l'étape d'évaporation de l'eau très énergivore, la chaleur latente de vaporisation de l'eau étant extrêmement élevée. La température reste donc par conséquent égale ou inférieure à 100°C tout au long du processus. Eiffage a mis au point en laboratoire deux méthodes de séchage des granulats, validées par la suite sur ses différents postes d'enrobage, qu'ils soient continus, discontinus, à séchage en flux parallèle ou à contre-courant. La différence principale résidant dans le fait d'introduire tous les granulats dès le début, ou de procéder en deux

étapes par introduction dans l'anneau de recyclage du séchoir (Olard et Le Noan, 2006).

L'entreprise annonce des économies de l'ordre de 40 à 50 % en se basant sur les relevés de consommation en fioul des centrales (Le Goff et al, 2009). La réduction des émissions de CO₂ en est de même d'après les auteurs. Concernant le bilan de performance, l'entreprise annonce une équivalence en comparaison des enrobés à chaud, essais en laboratoires et contrôles sur chantiers à l'appui. Environ soixante études de formulation ont été menées, suivies d'essais de compactage PCG, d'orniérage, de tenue à l'eau, de fatigue et de mesure du module du bitume.

Cette technique innovante semble avoir de nombreux avantages. Outre le gain en énergie de chauffage, elle permet de réduire la température de malaxage et de pose sous la barre des 100°C sans ajout d'additifs *a priori*.

- **Wam Foam**

Le procédé par moussage étudié est un procédé développé par Shell Global Solutions et Kolo Veidekke en Norvège. Il consiste en fait à pré-enrober les granulats d'une couche de bitume mou à une température inférieure à 100° Celsius. La viscosité de ce bitume mou permet en effet cette manipulation et l'enrobage complet des granulats (documentation Shell). Dans un second temps, un bitume dur est introduit sous forme de mousse. Cette mousse est obtenue en injectant de l'eau froide dans une proportion de 1 à 5 % dans le bitume chaud. Ainsi l'enrobage est réalisé de façon plus économique et la maniabilité est améliorée. Au niveau de la centrale, une simple adaptation d'une buse spéciale pour injecter la mousse de bitume (incluant l'addition d'eau) au niveau du mixeur est nécessaire (Kristjandottir, 2006).

La température est maintenue entre 120° et 130° Celsius. Du fait de la température moindre de malaxage, les émissions sont considérablement réduites notamment en ce qui concerne le benzène soluble et les composés aromatiques polycycliques réputés cancérigènes. L'entreprise revendique une réduction de 30 % de sa consommation en

fioul et d'environ 30 % de ses émissions de CO₂. Le produit final est compacté à une température allant de 80° à 110° Celsius (Documentation Shell).

Additifs chimiques

- **Evotherm®**

Evotherm® est une gamme de produits développée par la société américaine Meadwestvaco et distribué sous licence en Amérique du Nord par l'entreprise Mac Asphalt et utilisé en Europe exclusivement par Eurovia. Elle regroupe trois produits ; l'Evotherm® ET, l'Evotherm® H5 DAT et l'Evotherm® 3G.

- L'Evotherm® ET se présente sous la forme d'une émulsion de bitume à haute teneur en particules solides, soit environ 70%. Cette émulsion est utilisable directement en centrale à la place du bitume conventionnel, et est stockée à 80°C. Meadwestvaco annonce un gain en température de 55°C grâce à cette technologie. Les premiers chantiers avec ce produit remontent à 2003, et les essais sur la piste du NCAT à Auburn en 2005 ont été menés avec ce produit.
- L'Evotherm® H5 DAT (Dispersed Asphalt Technology) est un additif chimique constitué d'un mélange d'émulsifiants et d'agents antidésenrobage. Le principe actif est à base de polyamines et d'acides gras (source : Evotherm materiel safety data sheet), et le produit se présente en solution comme un liquide ambré. Il a été développé à la suite de l'Evotherm® ET, et breveté en 2006. L'objectif est de fournir le même produit mais sans déplacer à chaque fois une citerne d'émulsion, juste l'additif. Le produit est donc livré en centrale sous la forme d'une solution aqueuse contenant les principes actifs, et directement injecté dans la ligne d'alimentation en bitume des tambours malaxeurs. Il est ainsi possible de moduler facilement la production entre enrobés tièdes et chaud en jouant sur l'alimentation en additif. Le gain en température annoncé est de 45 à 60 °C.
- Enfin, l'entreprise développe un dernier produit, l'Evotherm® 3G (troisième génération) qui consiste en un mélange sans eau directement injectable dans la ligne d'alimentation en bitume ou pré-additivé dans le bitume. La baisse de température attendue est comprise entre 33 et 45 °C.

La plupart des études menées sur l'Evotherm® l'ont été sur la version ET. La suite de l'étude ne s'intéressera qu'à la version DAT H5, utilisée par DJL et Eurovia. L'Evotherm® DAT étant encore récent, peu de documents sont disponibles à son sujet. L'additif est incorporé à hauteur de 0,3% en masse d'enrobé, soit selon les formules environ 6 % en masse de bitume. La modification de centrale est minime, et ne requiert qu'une connexion à la rampe d'injection du bitume (figure 1.13), et une pompe doseuse afin de réguler le débit d'additif en fonction de la cadence de production (figure 1.12).

En terme de réduction de la consommation, le fabricant et Eurovia annoncent (Mazé et al, 2008) un gain de 40% environ, dans une fourchette de 35 à 55%. Les gains d'émission avancés dans ce même document atteignent :

- 48% pour les gaz à effet de serre,
- 58% pour les oxydes d'azote,
- 41% pour le dioxyde de soufre.

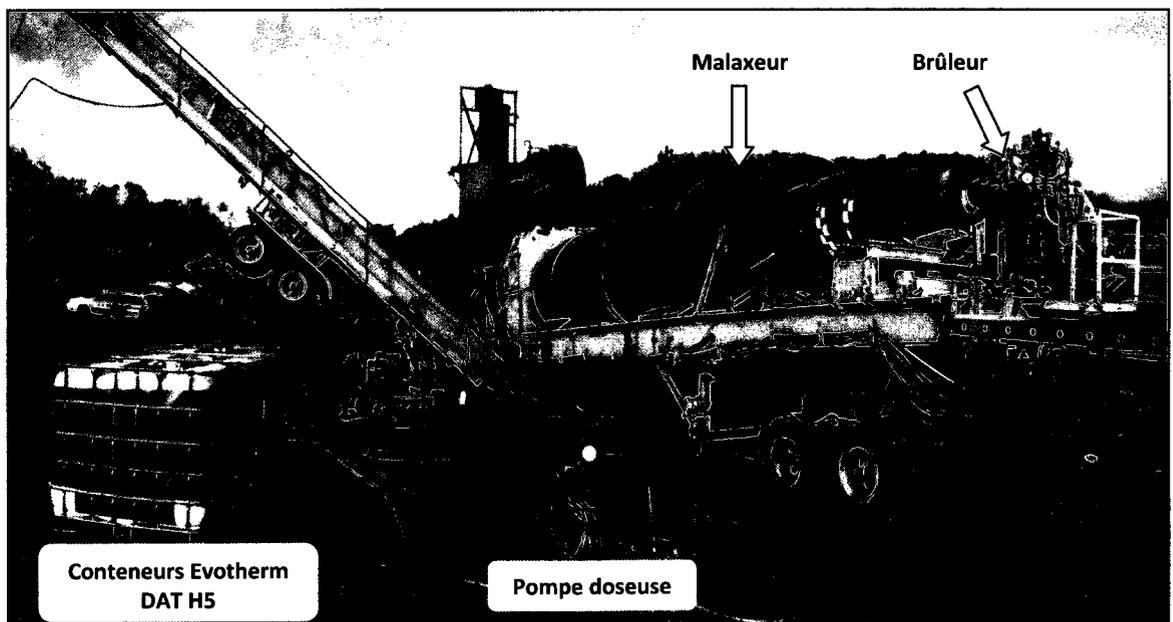


Figure 1.12 Installation pour production à l'Evotherm® DAT, Saint-André Avellin.
Glen Philippot (octobre 2009)

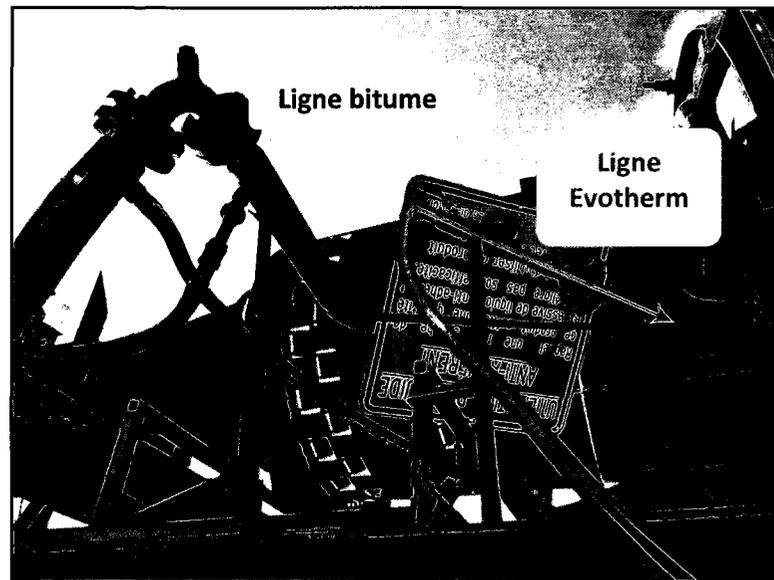


Figure 1.13 Rampe d'injection d'additif dans le bitume avant enrobage.
Glen Philippot (octobre 2009)

Le NCAT a mené des études en laboratoire et grandeur nature sur son manège extérieur avec l'Evotherm® ET. Les résultats expérimentaux (Hurley et Prowell, 2006) montrent que le produit permet d'augmenter le module de l'enrobé et sa compacité pour une même température comparativement à une solution classique (1,4% moins de vides en moyenne). Le produit a aussi tendance à limiter la sensibilité à l'orniérage, bien que la baisse de température produise l'effet antagoniste, qui n'est pas forcément totalement compensé. Les mesures in situ sur le manège ne montrent cependant aucune augmentation significative de l'orniérage (Prowell et al, 2007). Il a également été remarqué que les résultats des essais en laboratoire ne correspondaient pas tout à fait aux résultats obtenus sur l'enrobé posé en conditions réelles. Les performances étant très souvent moins bonnes en laboratoire (Davidson, 2005) (Prowell et al, 2007). Il se pose donc la question de la fiabilité des essais en laboratoire, selon les méthodes actuelles, pour ces produits nouveaux.

Eurovia a de son côté publié quelques résultats concernant ses essais in situ à l'Evotherm® DAT H5, et toutes les caractéristiques des normes étaient respectées, que ce soit en terme de pourcentage de vides, de sensibilité à l'humidité, ou de module (Mazé et al, 2008). Cependant, certains avancent que les mélanges à l'Evotherm® ont

un module résilient d'autant plus faible que leur température de malaxage décroît, et qu'ils adoptent un comportement plus mou. Ce qui peut s'avérer intéressant à basse température pour plus d'élasticité du matériau, donc moins de fissuration, mais problématique aux températures élevées de service (Purdy, 2008).

1.6.3 Intérêts

Réduction de la consommation d'énergie

Le principal intérêt des technologies d'enrobé tiède réside dans le fait qu'elles permettent a priori une diminution conséquente des consommations d'énergie lors de la fabrication des enrobés en centrale. Les gains en énergie attendus de ces technologies se situent dans une fourchette comprise entre 20 et 50 % de moins par rapport aux techniques classiques (D'Angelo et al, 2008).

Cette diminution de la consommation de fioul ou de gaz par le brûleur dans la centrale s'explique simplement par la baisse de température de fabrication. En fonction de la technologie utilisée, le gain énergétique est plus ou moins conséquent. Il faut toutefois noter que la consommation d'énergie ne varie pas linéairement en fonction de la température (figure 1.14). Un des facteurs importants qui rentre en compte, et le passage de la limite des 100°C, température à laquelle l'eau se vaporise dans des conditions normales de pression. La chaleur latente de vaporisation de l'eau étant très élevée, il existe un palier à cette température qui va faire augmenter la consommation de carburant afin d'évaporer l'eau des granulats. Avant ce palier, l'énergie consommée sert à sécher les granulats et l'eau qu'ils contiennent, à 100°C l'eau s'évapore, au-delà de 100°C l'énergie consommée sert à augmenter la température des granulats jusqu'à la température d'enrobage. Selon que l'on doive passer ou pas ce palier en fonction des technologies utilisées, les gains seront donc plus ou moins importants. Les technologies « tièdes » passent ce palier, alors que les technologies dites « semi-tièdes » restent en deçà de cette température.

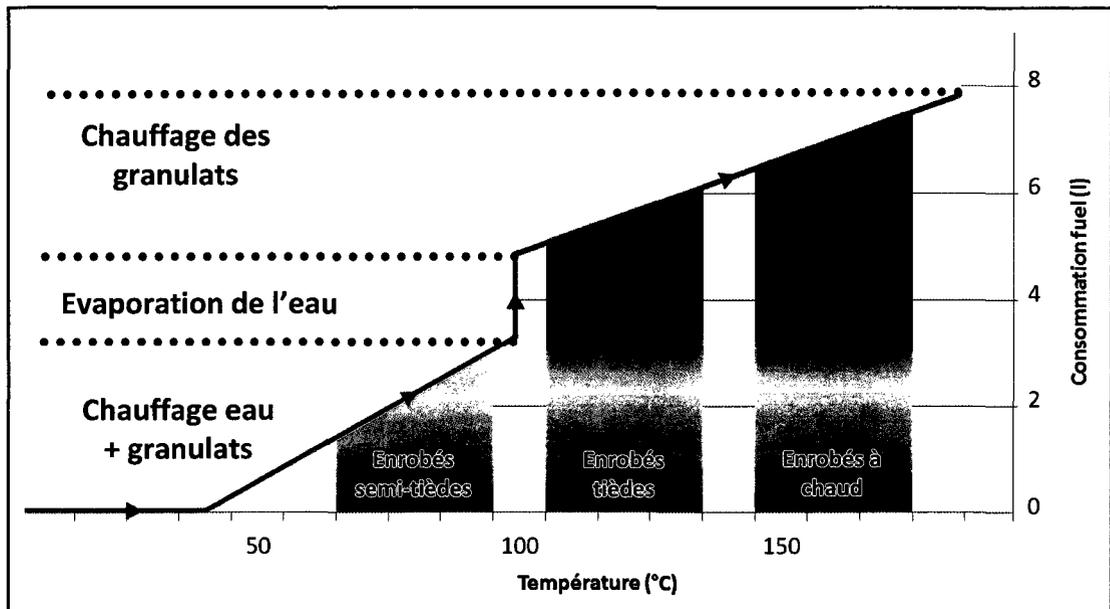


Figure 1.14 Consommation de carburant en fonction du type d'enrobé.

On trouve finalement très peu d'informations dans la littérature concernant les gains réels de consommation d'énergie lors de la fabrication des enrobés tièdes. La plupart du temps il faut se baser sur des valeurs proposées par le fabricant. Les valeurs disponibles sont donc bien souvent des valeurs à analyser avec précaution. En effet, ce sont la plupart du temps des valeurs maximales, ou ne prenant en compte qu'une partie de l'énergie totale utilisée dans le processus de fabrication des enrobés.

Réduction de émissions

La fabrication d'enrobé génère des émissions de gaz et de particules dans l'atmosphère. Ces émissions proviennent de deux sources principales. D'une part les polluants émis par l'enrobé et le bitume en particulier, d'autre part les polluants émis par la centrale elle-même et en particulier son brûleur (Paranhos, 2007). Il est cependant difficile de séparer nettement les émissions des sources respectives lors de mesures in situ (Gaufrey et al 2005).

Plusieurs études ont été menées sur les émissions des bitumes (Binet, 2002) et sur celles des enrobés (Tang et al, 1999 ; Ventura et al, 2007). On retrouve dans ces fumées des particules solides et de la vapeur. La plupart des gaz contiennent des composés soufrés

(H₂S, SO₂) et des vapeurs d'hydrocarbures. On regroupe sous le terme « composés organiques » tous les composés contenant au moins un atome de carbone et plusieurs atomes d'hydrogène. A cela peuvent s'ajouter de l'oxygène, des halogènes, du soufre ou de l'azote. Parmi ces composés organiques, on distingue les « composés organiques volatils» (COV), les « composés organiques semi-volatils» (COSV) et les « composés organiques non volatils» (CONV). La distinction dépendant des réglementations nationales, pour simplifier nous ne considérerons que deux fractions : volatile et non volatile. Les COV sont des composés dont la tension de vapeur est généralement élevée. A température ambiante ils s'évaporent donc facilement et se retrouvent dans l'atmosphère. La concentration de ces produits dans l'air est régulièrement mesurée par les autorités compétentes.

« De nombreux COV individuels sont connus ou soupçonnés pour leurs effets toxiques directs sur les êtres humains qui vont de la carcinogenèse à la neurotoxicité. Certains d'entre eux (p. ex., le benzène, le dichlorométhane) ont été évalués et déclarés toxiques en vertu de la Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999). »

Site internet d'Environnement Canada

Parmi les COV présents dans les fumées d'enrobé on trouve les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les HAP soufrés, qui sont particulièrement dangereux pour la santé humaine (Binet, 2002). Comme leur nom l'indique, les HAP sont des hydrocarbures présentant au moins deux cycles aromatiques (benzéniques) (figure 1.15). Ils peuvent causer de multiples cancers, le plus fréquent étant le cancer du poumon. L'U.S. Environmental Protection Agency (EPA) a référencé les 16 principaux HAP cancérigènes, que l'on retrouve dans les bitumes, mais bien souvent on ne mesure que la concentration totale en HAP du fait de la difficulté de la tâche. Les HAP sont des composés que l'on retrouve dans la fraction malténique des bitumes.

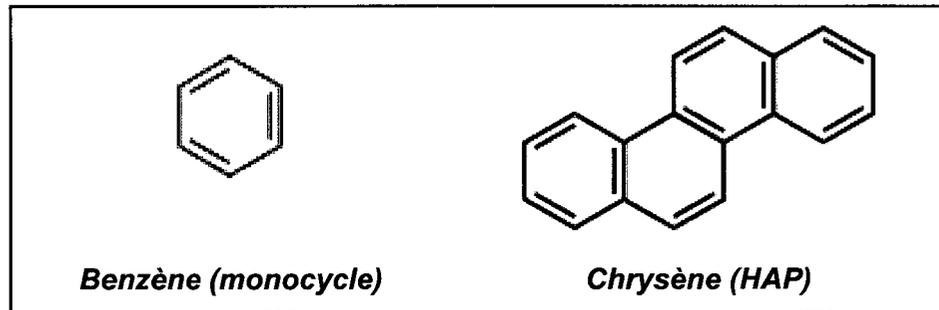


Figure 1.15 Composés cycliques.

Les émissions générées par des enrobés peuvent être différentes de celles émises par le bitume lui-même. En effet l'importante surface spécifique du bitume enrobant les granulats permet une évaporation plus grande et donc une émission de COV supérieure (Gaudefroy et al, 2005). Ainsi, plus l'enrobé contient de bitume moins il émet de COV, car l'épaisseur du film de bitume est d'autant plus épaisse.

L'émission de composés organiques volatils par un enrobé en fonction du temps (à température maintenue constante) suit une courbe en cloche caractéristique (figure 1.16) d'après les mesures effectuées en laboratoire. L'intégration de cette fonction selon le temps donne ce que l'on appelle le potentiel d'émission (Gaudefroy et al, 2005). On remarque que l'enrobé émet de moins en moins au cours du temps, ayant perdu la plupart de ses composés les plus volatils dans les premières minutes.

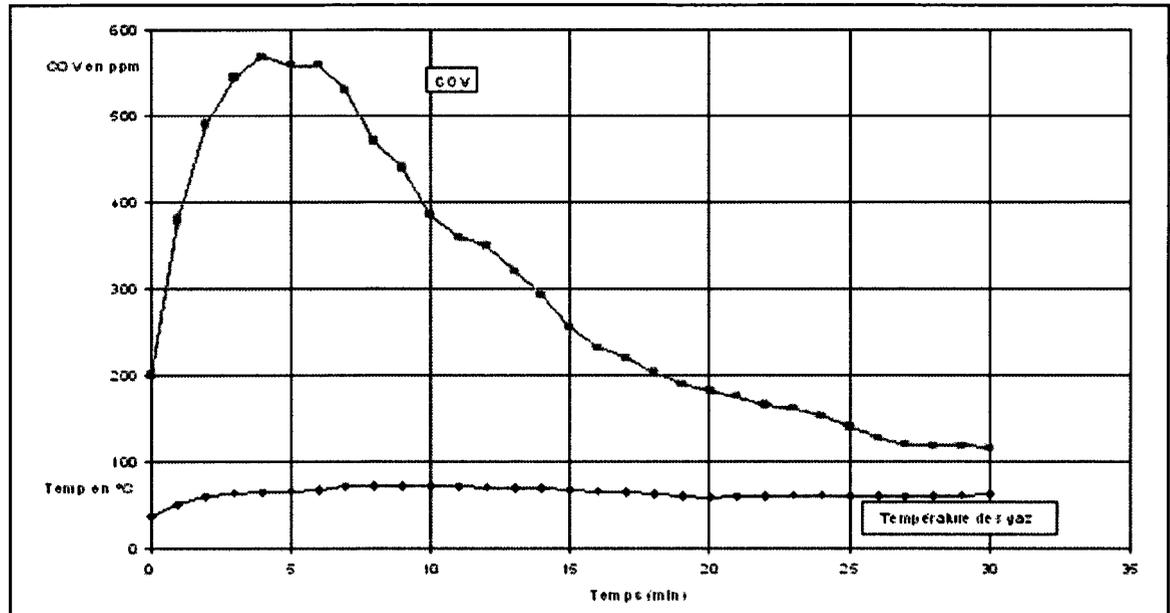


Figure 1.16 Émission de COV et température.
Jullien (2006) tirée de Paranhos (2007)

Les polluants émis par la centrale, proviennent de la combustion du gaz ou du fioul par le brûleur lors du chauffage des matériaux. Lors d'une combustion complète du carburant, les principaux produits sont du dioxyde de carbone et de la vapeur d'eau. C'est cette source qui est responsable de l'émission de gaz à effet de serre. On trouve également, en fonction de la composition du carburant, quelques produits soufrés, des oxydes d'azote et des métaux lourds. Si la combustion n'est pas parfaitement maîtrisée, elle se fait alors de manière incomplète et l'on voit apparaître des produits supplémentaires tels que le monoxyde de carbone et diverses particules d'hydrocarbures imbrûlés (Paranhos, 2007). Une combustion incomplète mène aussi à la formation d'HAP, dont la source (enrobé ou brûleur) est difficile à désigner lors de mesures en cheminée (Ventura et al, 2007). La figure 1.17 résume les diverses émissions produites par une centrale d'enrobage.

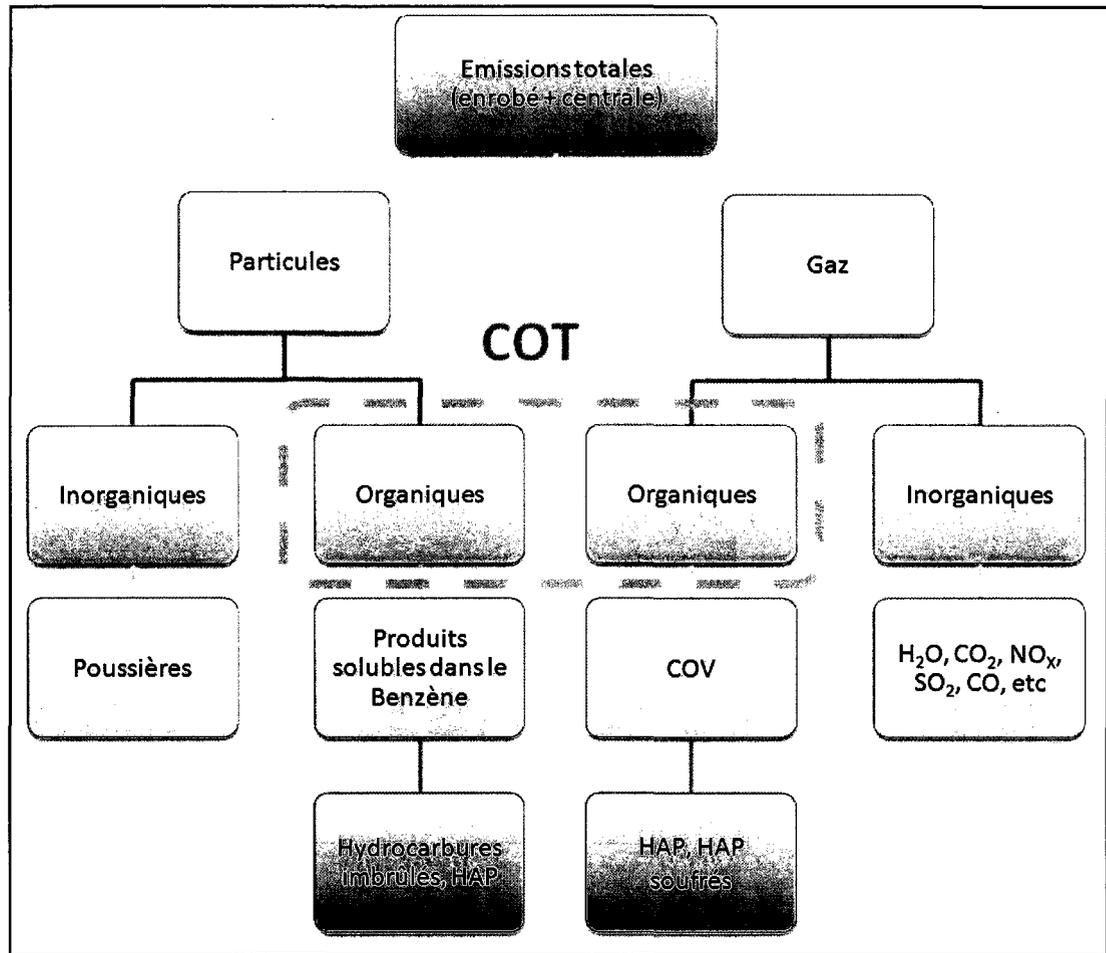


Figure 1.17 Émissions des enrobés.

Tous ces polluants sont rejetés par la cheminée de la centrale et, concernant l'enrobé, ils continuent de se disperser dans l'atmosphère tout au long du processus de construction de la chaussée (transport, application, compactage). On regroupe sous le terme « composés organiques totaux » (COT) tous les composés organiques qui sont émis par le processus de fabrication, qu'ils soient volatils ou non (figure 1.17).

Il a été mis en évidence (Brandt et de Groot, 1999 ; Klinevicius et al, 2009) que la température à laquelle le bitume ou l'enrobé était chauffé influençait grandement la quantité de ses émissions. Ainsi, moins l'enrobé est chaud moins il aura tendance à libérer ses composés toxiques dans l'atmosphère. D'autre part, il paraît évident que si l'on réduit la consommation des brûleurs en centrale, la production de gaz de combustion sera également réduite. Le recours aux enrobés tièdes permet donc a priori de limiter les

émissions polluantes lors du processus de fabrication d'enrobé, et ceci aux deux sources d'émission. On réduit ainsi à la fois les émissions de gaz à effet de serre et les polluants toxiques.

Réduction des gradients thermiques

Un des arguments utilisés, pour la promotion des enrobés tièdes, s'appuie sur le fait que l'enrobé étant moins chaud qu'usuellement, le gradient thermique qui existe entre le matériau et l'air ambiant est réduit. Ce phénomène a plusieurs conséquences (D'Angelo et al, 2008) :

- Il devient possible d'appliquer l'enrobé à des températures ambiantes inférieures à la normale. Certains cas ont été rapportés, où la température extérieure était légèrement inférieure à 0° Celsius. Dans la pratique, cela équivaut à une saison de travaux plus longue durant l'année : démarrage plus précoce au printemps et fin plus tardive à l'automne.
- Le gradient de température étant plus faible, le refroidissement du matériau se fait moins vite. Ce phénomène physique permet donc de transporter les matériaux plus longtemps dans les camions, donc plus loin des centrales. Selon les techniques, il a également été remarqué que l'enrobé préparé pouvait se conserver quelques dizaines d'heures en silo avant d'être posé (Prowell et al, 2007 ; D'Angelo et al, 2008).
- La réouverture au trafic peut théoriquement se faire plus rapidement qu'à l'accoutumée, le matériau atteignant en fin de compactage une température plus basse que les enrobés chauds (Brosseaud et St-Jacques, 2007). Ce point reste particulièrement intéressant pour les travaux de forte épaisseur (piste d'aéroport par exemple), où la massivité de l'ouvrage allonge la période de refroidissement.

Enfin, la température réduite permet d'envisager un recyclage plus important des déchets d'enrobé issus des fraisages lors de démolition de chaussées en fin de vie. Le bitume de ces particules recyclées ayant déjà subi un vieillissement lors de son utilisation initiale à cause de son âge, le fait de moins chauffer permet de mieux préserver ses propriétés lors de sa réutilisation. Dans le cas contraire, on inclurait du bitume très oxydé dans le mélange. Il faut savoir que lors de la formulation d'un enrobé, le bitume apporté par les fraisats est

soustrait à la quantité de bitume neuf. On considère qu'il y a une compensation du fait d'incorporer un vieux bitume par le fait que le bitume neuf est lui aussi moins chauffé, donc subit moins le vieillissement en centrale (D'Angelo et al, 2008). Ainsi, certains entrepreneurs incorporent jusqu'à 50 % d'enrobés recyclés.

Amélioration des conditions de travail

Les conditions de travail en chantier sont généralement grandement améliorées. D'une part, les opérateurs bénéficient d'une température ambiante nettement moins importante qu'avec les enrobés chauds. Ceci est particulièrement appréciable notamment en été. D'autre part, en concordance avec ce qui a pu être mesuré en laboratoire et qui a été évoqué précédemment, les émissions dues au bitume sont beaucoup plus faibles. Brandt (Brandt et al, 1999) a montré que les résultats du système de génération et de mesure des émissions de bitume qu'il avait développé en laboratoire, était représentatif des émissions effectivement inhalées par les ouvriers. Les conclusions montrent bien une décroissance des émissions notamment d'hydrocarbures aromatiques polycycliques avec la température.

Dans la pratique, on constate une réelle atténuation des odeurs qui rend le travail plus agréable et est incontestablement le signe d'un environnement plus sain pour la santé. Des observations similaires ont été effectuées au Laboratoire des Ponts et Chaussées de Nantes (Klincevicius et al, 2009) démontrant que le potentiel d'émission d'un enrobé tiède à 110° C avec ou sans additif était bien inférieur à celui d'un mélange à chaud à 160° C. La présence ou non d'un additif ne générerait pas une modification de ce potentiel.

Le seul reproche que l'on retrouve de temps en temps concerne la maniabilité (Davidson 2005 ; Paquin 2009), qui semble être un petit peu inférieure, notamment pour les râteleurs, lorsqu'il faut placer l'enrobé à la force des bras. Malgré tout, il est rarement voire jamais fait mention des problèmes de compaction, que ce soit au niveau du pourcentage de vides, de déchirements de l'enrobé ou d'agglomération de particules.

1.7 Problématique

Les enrobés tièdes sont de l'avis général une avancée en matière d'environnement, et constituent sans doute une des innovations les plus marquantes de ces dernières années en matière de génie routier. De nombreuses études se sont penchées sur la question de leur performance, au moyen d'essais en laboratoire. Les résultats sont variables selon les procédés, les matériaux et les températures retenues. Le manque de normes spécifiques à ces technologies maintient le flou quant à l'interprétation de ces résultats, surtout quand les résultats in situ ne corroborent pas les essais sur enrobés préparés en laboratoire. Mais ce n'est qu'une question de temps avant que des standards d'essais nouveaux soient développés.

Bien sûr cela pose un problème pour convaincre les donneurs d'ordre, mais un problème plus rarement soulevé doit retenir l'attention. Peu d'études se sont intéressées à l'impact environnemental réel de ces enrobés. On ne sait pas vraiment à quoi correspondent les gains énergétiques annoncés, et parfois les chiffres semblent gonflés. Or, on ne peut pas indéfiniment promouvoir les vertus écologiques d'un produit sur de simples communications publicitaires. L'EAPA mettait en garde dans sa prise de position en juin 2009, vis-à-vis des consommations supplémentaires d'énergie engendrées par le recours aux enrobés tièdes, allant même jusqu'à dire que l'empreinte carbone des additifs utilisés pouvait dépasser le gain qu'ils produisaient. D'autres mettent en garde contre de possibles émissions supplémentaires provenant des additifs, particulièrement les HAP (Brosseaud et St-Jacques, 2007).

Le choix d'utiliser les enrobés tièdes dans les contrats de construction de route ou de conserver les enrobés à chaud relève donc de plusieurs facteurs (gains en énergie, gains financiers, santé des travailleurs, ...). L'objectif de cette étude est de déterminer plus précisément les gains énergétiques réels de ces enrobés comparativement à ce que l'on en attend. Les conclusions de la recherche doivent permettre de mieux cerner les bénéfices que l'on peut attendre des technologies d'enrobés tièdes, en particulier celle(s) étudiée(s). Elles permettront de mettre en balance les critères techniques, économiques et écologiques de l'additif Evotherm® DAT H5 utilisé par DJL.

L'étude se fera en trois parties :

- Un volet expérimental, permettant de valider les caractéristiques des mélanges testés, et justifié par le fait que cette technologie est récente au Québec, et avec les matériaux locaux.
- Une étude par simulation informatique à l'aide du logiciel éco-comparateur Gaïa de DJL.
- Une analyse des données relevées en chantier concernant les émissions et les consommations de carburant. Ces données seront comparées à celles de la simulation.

CHAPITRE 2

ESSAIS DE LABORATOIRE

2.1. Objectifs

Le volet expérimental de cette recherche doit permettre de valider les caractéristiques des mélanges testés, et se justifie par le fait que le retour d'expérience en termes de durée de vie et de performance concernant la technologie à l'Evotherm® DAT H5 est relativement peu fourni. Il faut donc autant que possible assurer la tenue de ces nouveaux enrobés dans le temps par des tests préliminaires. Ces tests devront permettre de juger si oui ou non les enrobés tièdes à base d'Evotherm® sont aussi performants que les mélanges initiaux préparés à chaud.

Les essais en laboratoire ont été effectués au Centre Technique Nord Américain (CTNA), soit le laboratoire d'Eurovia Canada, et au laboratoire de l'ÉTS. Ils ont porté sur quatre formules d'enrobé déjà utilisées par l'entreprise DJL au cours de chantiers précédents à chaud, c'est à dire où l'enrobé était fabriqué à des températures habituelles (entre 150 et 170°C). Aucune formulation spéciale n'a été créée. En effet, l'objectif de l'entreprise est d'utiliser ces formules éprouvées à chaud pour ses prochains chantiers « tièdes ». Les tests doivent donc permettre de comparer les caractéristiques des enrobés préparés selon le procédé à chaud (c'est-à-dire selon les températures de malaxage et de compaction référencées dans la norme québécoise en fonction du bitume utilisé), et selon le procédé tiède, à 50°C de moins pour les deux températures respectivement. Cette valeur de baisse de température a été choisie arbitrairement dans la fourchette annoncée par le fabricant de l'additif, soit entre 45°C et 60°C. C'est la baisse de température que la firme DJL compte appliquer à l'avenir pour ses chantiers en enrobé tiède à l'Evotherm® DAT H5.

2.2. Matériaux

Quatre formules ont été testées, dans l'ordre de priorité dans lequel l'entreprise compte mener ses essais en grandeur nature lors de chantiers pilotes avec les donneurs d'ouvrage de la province de Québec. Ces formules, proviennent de trois centrales d'enrobage

différentes listées ci-après, dont la répartition géographique est visible sur la carte de la figure 2.1 :

- Saint-Bruno de Montarville (deux formules),
- Bromont,
- Saint-André Avellan.

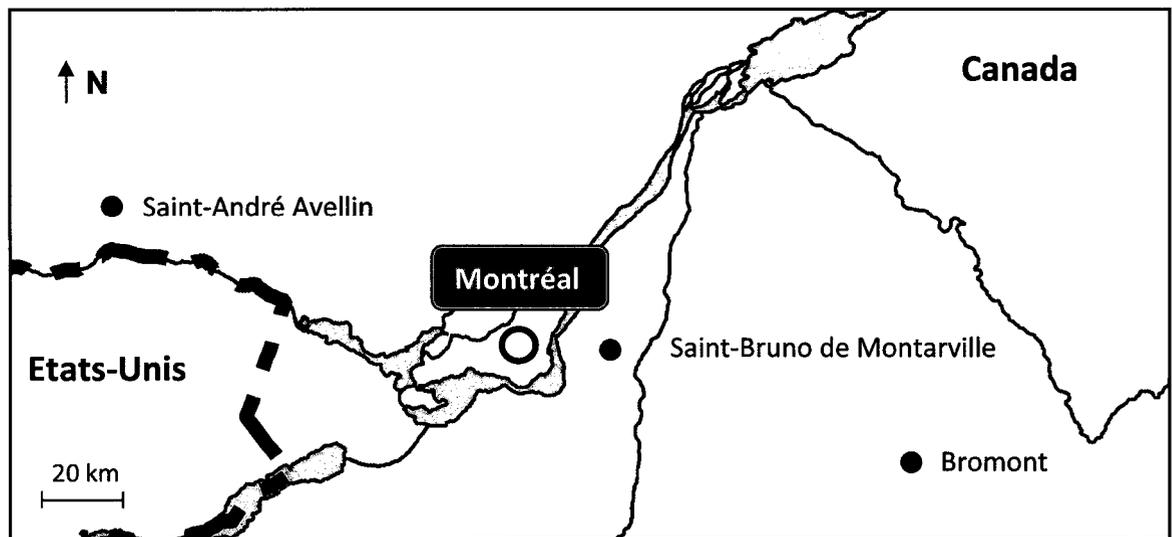


Figure 2.1 Localisation des centrales d'enrobage.
Tirée de www.mrnfp.gouv.qc.ca (2010)

Trois grades de bitumes différents ont été utilisés, soit :

- PG 70-28,
- PG 58-28,
- PG 58-34.

Pour rappel, les températures limites d'utilisation en service recommandées de ces bitumes correspondent aux nombres indiqués dans le grade, à savoir pour le premier bitume par exemple, 70°C de température maximale et -28°C de température minimale. Le tableau 2.1 présente les températures respectives de malaxage et compactage d'après la norme LC 26-003.

Tableau 2.1 Températures de chauffage du bitume

Grade de bitume	Température de malaxage (°C)	Température de compactage (°C)
PG 58-28	150 ± 2	135 ± 2
PG 58-34	155 ± 2	140 ± 2
PG 70-28	168 ± 2	160 ± 2

2.2.1. Saint-Bruno de Montarville # 1

La première formule de la centrale de Saint-Bruno de Montarville est un mélange de quatre granulats différents présenté dans le tableau 2.2 et d'un bitume de grade PG 70-28, le plus dur utilisé lors de ces essais, car il est conçu pour résister à la température maximale la plus haute des trois bitumes étudiés. Le bitume PG 70-28 est dosé à 5,39 % de la masse totale d'enrobé. Cela veut dire que le mélange est composé à 5,39% de bitume et de 94,61% de granulats.

Tableau 2.2 Granulats de la formule Saint-Bruno # 1

Granulats		Utilisé	Abs (%)
Grosueur	Provenance		
5 -10 mm	St-Bruno	38,00%	0,45
0 - 5 mm	St-Bruno	37,20%	0,68
0 - 5 mm (non lavé)	St-Philippe	15,50%	0,89
Sable 0 - 1,25 mm	Carrière Gaudette, St-Rock-sur-Richelieu	9,30%	1,03

2.2.2. Saint-Bruno de Montarville # 2

La seconde formule de la centrale de Saint-Bruno de Montarville (tableau 2.3) est un mélange de cinq granulats différents, auxquels du filler (poussière d'apport) est ajouté afin de respecter la granulométrie prescrite par la norme. Cette formule fait intervenir des granulats recyclés à hauteur de 20%.

Tableau 2.3 Granulats de la formule Saint-Bruno # 2

Granulats		Utilisé	Abs (%)
Grosueur	Provenance		
5 -10 mm	St-Bruno	30,00%	0,45
0 - 5 mm	St-Bruno	37,90%	0,68
0 - 5 mm (non-lavé)	St-Philippe	4,80%	0,89
0 - 1,25 mm	Carrière Gaudette, St-Roch-sur-Richelieu	4,80%	1,03
0 - 10 mm	Recyclé	20,00%	-
Filler	Usine	2,50%	2,50

Le bitume utilisé est un grade PG 58-28. Il est moins dur que le précédent, donc il nécessite un chauffage moins important lors du malaxage. La teneur en bitume est de 5,28% de la masse totale d'enrobé, bitume recyclé compris.

2.2.3. Bromont

La formule de l'usine de Bromont (tableau 2.4) comporte quatre types de granulats dont du recyclé et du filler. Le bitume utilisé est un grade PG 58-34, incorporé à hauteur de 5,35 % de la masse d'enrobé produite. Le type de roche utilisée est une roche cornéenne (métamorphique).

Tableau 2.4 Granulats de la formule Bromont

Granulats		Utilisé	Abs (%)
Grosueur	Provenance		
5 -10 mm	Bromont	34,00%	0,57
0 - 5 mm	Bromont	35,00%	0,94
0 - 5 mm	Sable, banc Zawistowski Lac Brome	9,50%	1,47
Filler	Usine	1,50%	2,50
0 -10 mm	Bromont (4,4% de bitume)	20,00%	-

2.2.4. Saint-André Avellin

La formule de l'usine de Saint-André Avellin (tableau 2.5) utilise trois granulats différents, dont deux proviennent de roches concassées du chantier de l'autoroute 50, en construction à proximité. La nature de ces roches est granitique. Cette formule a été posée sur la route 323 à Montebello à la fois en chaud et en tiède en octobre 2009.

Tableau 2.5 Granulats de la formule Saint-André Avellin

Granulats		Utilisé	Abs (%)
Grosseur	Provenance		
5-10 mm	Autoroute 50 Papineauville	42,00%	0,41
2,5-6,3 mm	Autoroute 50 Papineauville	15,00%	0,56
0-5 mm	Sables Guertin Ltée, St André Avellin	43,00%	0,77

Le pourcentage de bitume est de 5,44 % par rapport à la masse totale d'enrobé, et son grade est PG 58-34.

2.3. Méthode de préparation

2.3.1. Préparation des combinés granulaires

Les granulats sont réceptionnés au laboratoire dans des sacs en plastique. Il faut les sécher préalablement à leur utilisation, afin de ne pas fausser les mesures de masse par de l'eau absorbée dans leurs pores. Une fois secs, la taille des échantillons de granulats est réduite au séparateur mécanique pour éviter la ségrégation, jusqu'à l'obtention des masses respectives nécessaires pour la gâchée d'enrobé à préparer. Les différents granulats de la formule sont ensuite mélangés pour former le combiné granulaire répondant aux spécifications de la norme.

2.3.2. Chauffage des matériaux

Les matériaux sont chauffés en vue du malaxage dans des étuves programmables. Pour les mélanges chauds, le chauffage des granulats et du bitume se fait aux températures

présentées précédemment dans le tableau 2.1. Pour les mélanges tièdes, le bitume est chauffé aux mêmes températures, mais celle des granulats est ajustée de manière à obtenir un mélange final 50°C plus froid (tableau 2.6).

Tableau 2.6 Températures des enrobés tièdes

Grade de bitume	Température de malaxage (°C)	Température de compactage (°C)
PG 58-28	100 ± 2	85 ± 2
PG 58-34	105 ± 2	90 ± 2
PG 70-28	118 ± 2	110 ± 2

2.3.3. Dosage

Les granulats entrant dans la composition de la gâchée d'enrobé ont été préparés à l'avance (cf. § 2.3.1). Il reste à peser la masse de bitume nécessaire pour respecter le pourcentage requis par la formule avant de malaxer. Ceci se fait à l'aide d'une balance. Dans le cas des enrobés chauds, le processus est relativement simple. Une partie des granulats est mise dans un bol pour former un lit de recueil du bitume, le reste est disposé dans le malaxeur. Ce lit de granulats sert à éviter de perdre du bitume, qui sinon pourrait rester collé au bol de pesée. Le bitume chaud est versé dans le bol jusqu'à l'obtention de la masse nécessaire, puis le tout est versé dans le malaxeur.

Dans le cas des enrobés tièdes, il a fallu trouver un moyen de peser ce même bitume, tout en y ajoutant l'additif sans perdre l'effet moussant de celui-ci. L'objectif étant de s'approcher du processus de la centrale d'enrobage, où l'additif est injecté directement dans la ligne de bitume. Quelques problèmes pratiques liés au matériel utilisé au laboratoire apparaissent alors :

- Il n'est pas question de verser directement l'additif sur les granulats dans le bol. Ils l'absorberaient, et une partie s'évaporerait, compromettant son action sur le bitume.
- Il est difficile de préparer un mélange bitume-additif à l'avance, car l'effet de moussage s'estompe rapidement, et ce même effet nécessite un contenant de taille approprié pour que la mousse ne déborde pas lors de l'additivation.

- Le mélange bitume-additif doit être le plus homogène possible avant que l'enrobage ne commence, sous peine d'enrober des granulats avec du bitume non additivé.

La solution retenue (figure 2.2), sans être parfaite, consiste à tarer la masse d'additif à l'avance dans le bol, de verser une partie du bitume dans le bol, d'y ajouter l'additif, et de compléter le reste de la masse de bitume. Ce versement en deux fois du bitume active le moussage, et permet d'incorporer du bitume homogène dans le malaxeur. Si l'additif est versé à la toute fin dans le bitume, le moussage n'est pas parfait, la réaction mettant un certain temps à s'initialiser (figure 2.3).

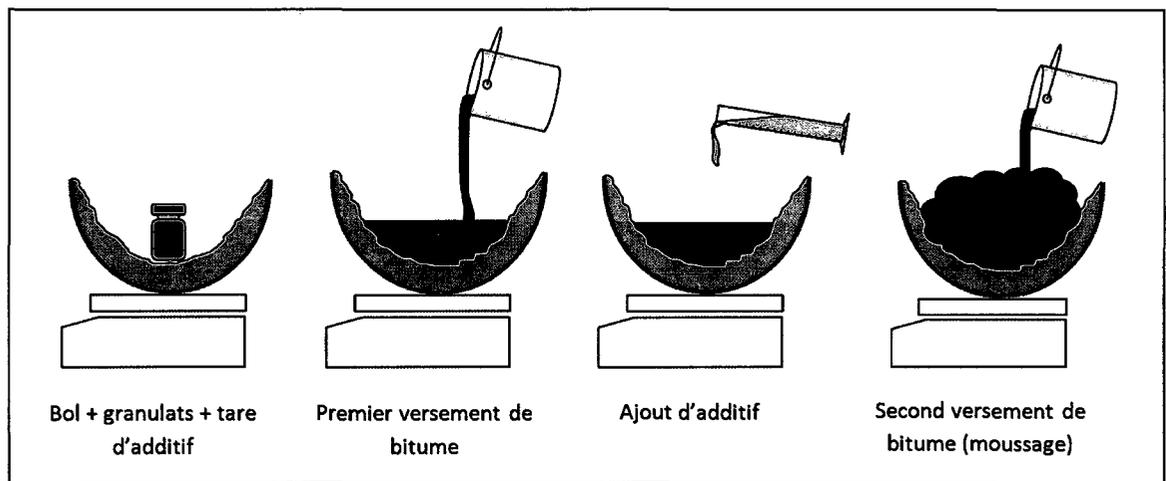


Figure 2.2 Schéma du dosage du bitume pour le procédé tiède.

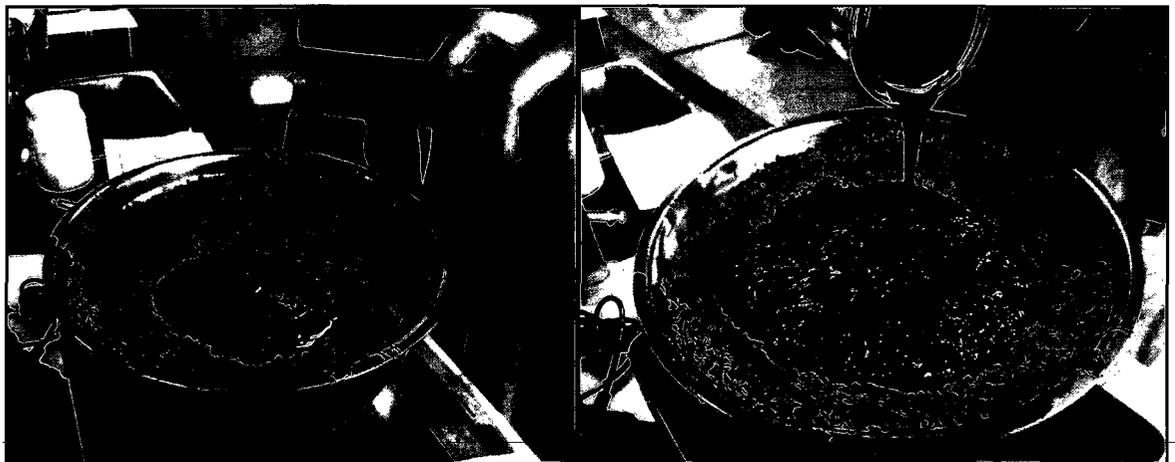


Figure 2.3 Dosage du bitume et de l'Evotherm®.
Glen Philippot (2009)

L'opération se doit d'être brève dans tous les cas, pour conserver les propriétés d'enrobage améliorées grâce à l'additif. La quantité d'Evotherm® DAT H5 en solution incorporée correspond à 0,3% de la masse totale d'enrobé, soit environ 6% de la masse de bitume selon les formules, comme précisé sur la fiche de préparation en laboratoire du fabricant.

2.3.4. Malaxage

Le malaxage des échantillons a été effectué dans un malaxeur calorifugé et thermostaté, permettant de régler la température au degré Celsius près.

Les gâchées ont été préparées une par une en juste-à-temps, en fonction des essais à mener. C'est-à-dire que l'enrobé était utilisé directement pour les essais après avoir été malaxé. Les seules gâchées qui ont été préparées à l'avance et stockées dans des boîtes en carton, comme la norme québécoise l'autorise étaient les gâchées pour les essais de :

- Tenue à l'eau formule Bromont chaud et tiède,
- Tenue à l'eau formule Saint-André Avellin chaud et tiède.

2.4. Essais

2.4.1. Compaction PCG

La Presse à Cisaillement Giratoire (PCG) est un type de presse utilisé en laboratoire pour caractériser l'aptitude de compaction d'un enrobé. Le principe est de compacter l'enrobé en lui appliquant un effort presseur ainsi qu'un mouvement de pétrissage, représentatif du travail des rouleaux compacteurs en chantier. Cette méthode de compaction par pétrissage s'oppose à la méthode de compaction au marteau Marshall, qui permet de compacter l'enrobé par coups.

La figure 2.4 illustre le fonctionnement de la presse. Une masse précise d'enrobé est placée dans un moule cylindrique, lui-même reposant sur une table tournante. Un bras de compaction se déplaçant en translation verticale uniquement (trait pointillé), descend dans le moule et vient appliquer une pression de 600 kPa sur l'enrobé tout au long du processus de compaction. La table tourne de façon excentrique, ce qui oblige le moule à adopter un angle α de giration. Cet angle est de 1° sur la presse française, et 1,25° en Amérique du

Nord. Au fur et à mesure que les girations s'effectuent, l'enrobé se compacte. L'appareil relève à chaque tour la valeur de descente du bras, donnant la hauteur instantanée de l'éprouvette. Connaissant la masse d'enrobé dans le moule, et sa densité maximale, il est ainsi possible de suivre à chaque tour le pourcentage de compaction de l'enrobé.

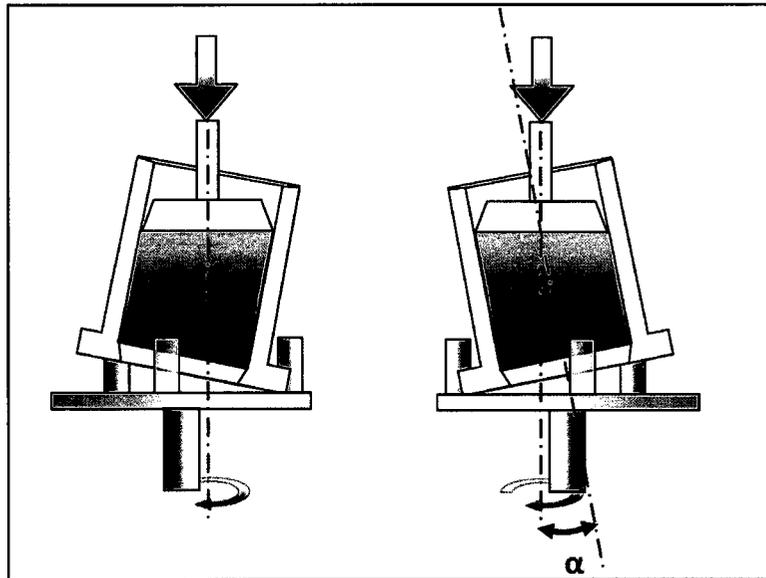


Figure 2.4 Schéma de fonctionnement d'une PCG.

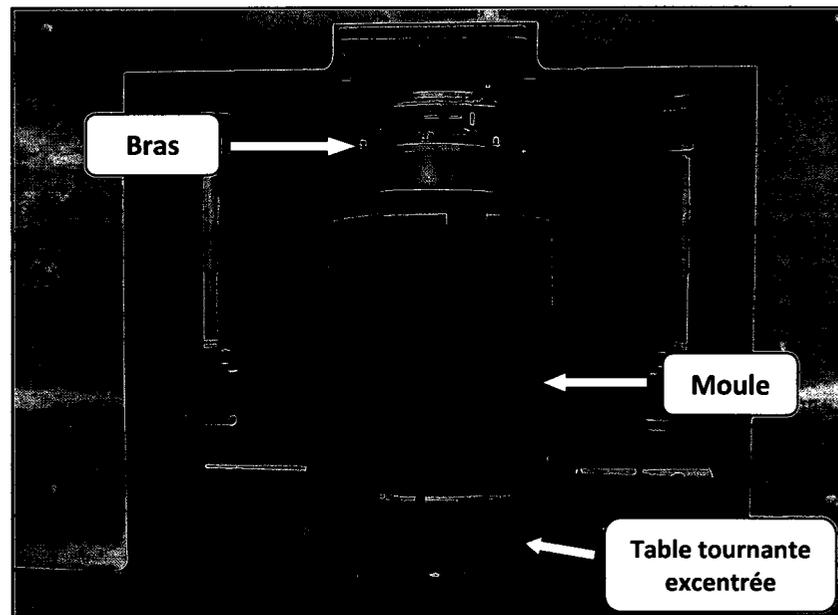


Figure 2.5 PCG.
Glen Philippot (2009)

La norme québécoise 4202, développée par le Laboratoire des Chaussées du ministère des Transports du Québec (MTQ), exige que l'on respecte un certain pourcentage de vides à trois nombres de girations donnés, noté N_i , N_d et N_f , où :

- N_i (i pour initial) correspond à 10 girations, et représente globalement l'énergie de compaction appliquée en sortie de finisseur. La valeur du pourcentage de vides obtenue illustre la facilité de mise en place de l'enrobé. Il est attendu un pourcentage de vides supérieur ou égal à 11%.
- N_d (d pour design) correspond à l'énergie de compaction reçue par l'enrobé en chantier. Pour les mélanges testés, tous de type ESG-10, N_d est fixé à 80 girations. Le pourcentage de vides doit alors se trouver compris entre 4% et 7%.
- N_f (f pour final) correspond pour l'enrobé à la post compaction résultant du passage des véhicules lourds. Il doit alors présenter un pourcentage de vides supérieur à 2%.

Pour chaque mélange, trois éprouvettes ont été réalisées à chaud et trois selon le procédé tiède. L'objectif de cet essai est de valider, d'une part, que les formules à chaud sont bien conformes aux spécifications et, d'autre part, que les mélanges tièdes à base d'Evotherm® DAT H5 se compactent aussi bien que les mélanges chauds. Il faut toutefois noter que cet appareil a la réputation d'être insensible aux variations de températures des mélanges (Hurley, 2006).

2.4.2. Tenue à l'eau

L'essai de tenue à l'eau est un essai régi par la norme québécoise LC 26-001. Il permet de déterminer dans quelle mesure les enrobés sont sensibles à l'eau. Le résultat attendu est un ratio entre la stabilité « Marshall » moyenne d'un lot d'éprouvettes vieillies de façon accélérée dans l'eau et celle d'un autre lot témoin. La stabilité « Marshall » correspond à l'effort maximal (avant ruine de l'éprouvette) enregistré lors de l'écrasement diamétral d'une éprouvette cylindrique de diamètre 100 mm, à l'aide de mâchoires spécifiques (figure 2.6). Afin de comparer les résultats de plusieurs éprouvettes entre eux, les valeurs d'efforts maximaux sont ramenées à leur équivalent sur une éprouvette de taille standard à l'aide d'une formule donnée par la norme. La procédure de mesure de stabilité « Marshall » est décrite dans la norme LC 26-060.

Les deux lots d'éprouvettes sont préparés à partir du même enrobé à l'aide d'un marteau Marshall. Le premier lot est conditionné pendant 24 heures dans un bain-marie à 60°C après avoir été préalablement saturé d'eau sous vide d'air, puis écrasé. L'autre lot est trempé 30 minutes dans le même bain marie, sans être saturé d'eau, puis écrasé. Le trempage dans le bain dans ce cas ne sert qu'à porter les éprouvettes à la même température que celles du premier lot.

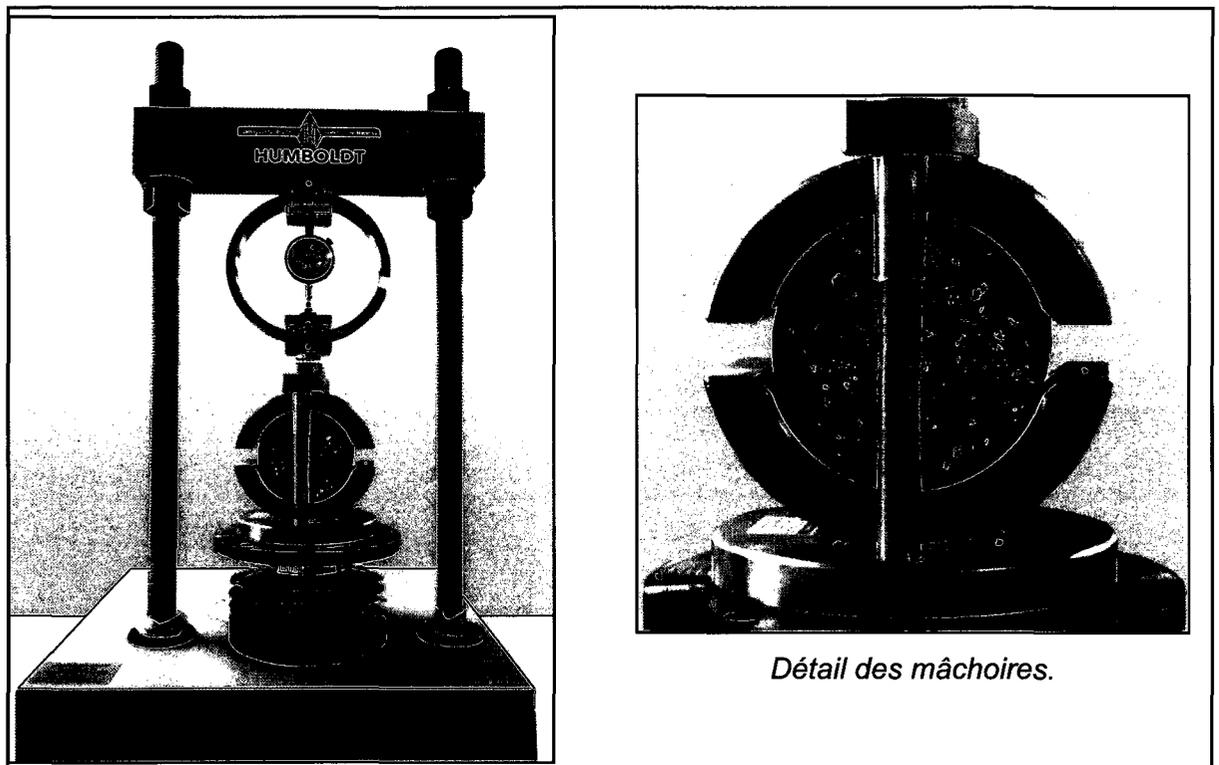


Figure 2.6 Presse dynamométrique équipée de mâchoires pour stabilité Marshall.
Glen Philpott (2009)

Initialement, huit éprouvettes étaient confectionnées. En conséquence, la taille des lots varie de trois à quatre éprouvettes en fonction des densités brutes obtenues lors du compactage. Si de trop fortes disparités étaient notées, certaines éprouvettes étaient volontairement écartées du processus de test.

2.4.3. TSR AASHTO

L'essai de résistance des enrobés aux dommages causés par l'humidité de l'AASHTO, communément appelé TSR pour Tensile Strength Ratio est un essai similaire à celui de la tenue à l'eau québécois. Il a été développé par l'American Association of State Highway and Transportation Officials, et est régi par la norme AASHTO T 283-07.

Comme son équivalent du Québec, cet essai fait intervenir un lot d'éprouvettes conditionnées et un lot témoin. Les éprouvettes sont fabriquées avec la presse PCG, en diamètre 100 mm. Les étapes de fabrication suivent un protocole plus drastique que l'essai précédent. Après le malaxage, il faut respecter le plan d'essai suivant (figure 2.7) :

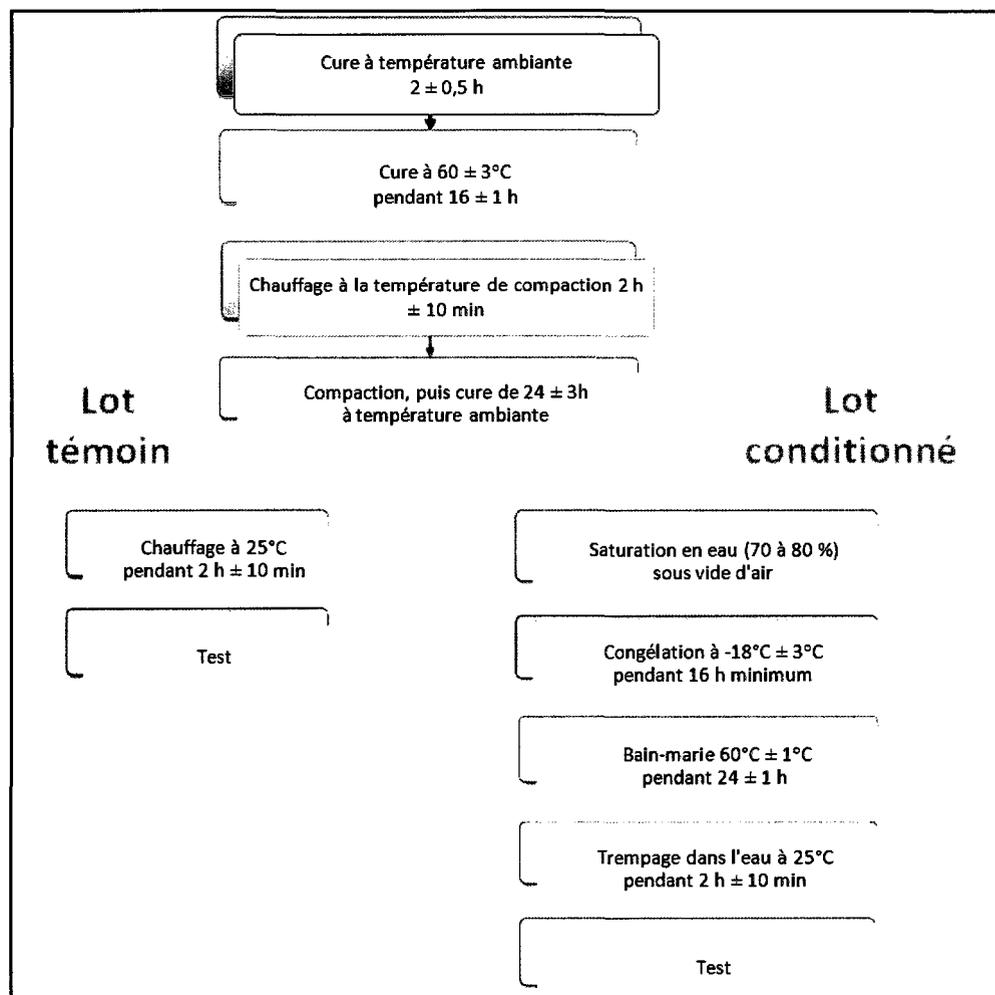


Figure 2.7 Chronologie du test "TSR".

Le test est réputé plus sévère que l'essai de tenue à l'eau, du fait notamment de la phase de congélation. Les dégâts dus à l'humidité peuvent donc être de causes multiples : gel ou chaleur. Les éprouvettes doivent présenter un pourcentage de vides de $7 \pm 0,5$ %. En fonction des compactations, certaines peuvent donc être écartées du processus de test. Généralement, les lots étaient formés de trois à quatre éprouvettes.

L'écrasement des éprouvettes se fait à l'aide de la même presse que pour l'essai de tenue à l'eau, mais munie de mâchoires différentes. Ces mâchoires sont conçues pour induire une rupture par traction indirecte. L'écrasement diamétral fait que les éprouvettes vont s'ouvrir en deux tel que représenté sur la figure 2.8. Le ratio de la contrainte moyenne de rupture des éprouvettes conditionnées sur celle des éprouvettes témoins est appelé TSR.

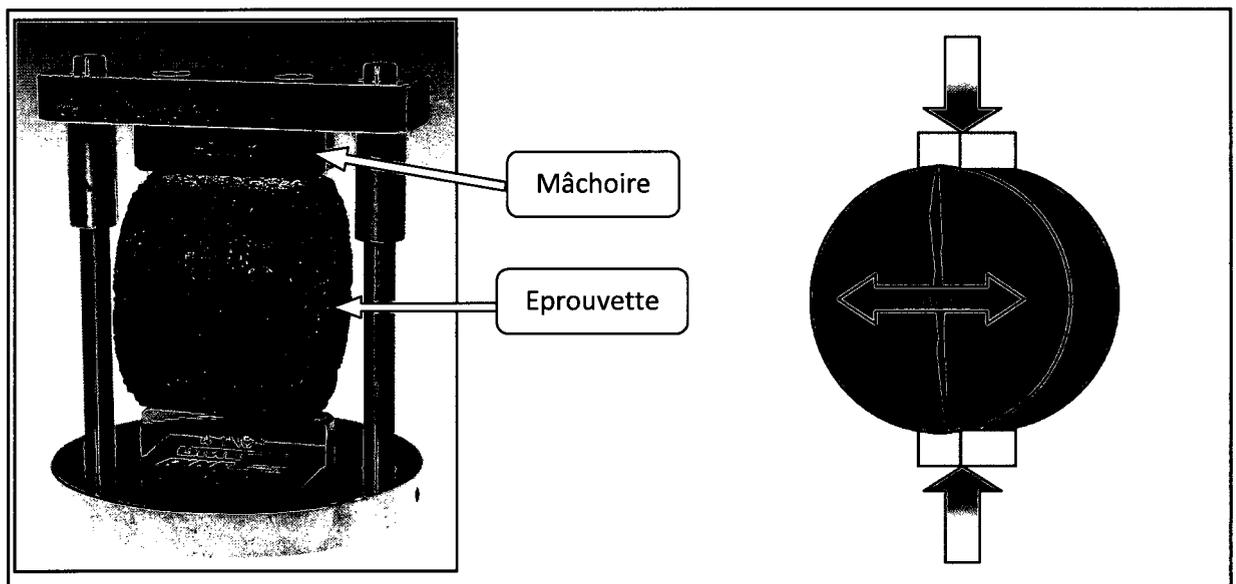


Figure 2.8 Mâchoires TSR.
Photographie tirée de www.pineinst.com

A l'issue du test, les éprouvettes sont ouvertes à la main de telle sorte que l'on puisse évaluer l'éventuel désenrobage causé par l'humidité. Une note de 0 à 5 est alors attribuée, la note 5 caractérisant un important désenrobage.

2.4.4. Désenrobage

Le test de désenrobage est un test développé par le Laboratoire des Chaussées du MTQ, d'après la norme française NF T66-018. Il permet de caractériser la capacité d'adhérence d'un bitume à un granulat dans le temps. Cet essai est régi par la norme LC 25-009.

Cet essai permet de prévoir s'il existe des incompatibilités bitume/granulat pouvant mener à des désenrobages prématurés, mettant en péril la longévité de la chaussée. La qualité de l'interface bitume/granulat est en effet primordiale pour assurer une bonne cohésion de l'enrobé et limiter les dégâts dus à l'humidité. La qualité de cette interface dépend entre autres de la nature chimique des granulats et de leur interaction avec le type de bitume utilisé. En fonction de l'additif utilisé, la qualité du collage du bitume peut être affectée, car bien souvent ils modifient les propriétés chimiques du bitume, comme les surfactants ou les agents antidésenrobage.

Le principe consiste à enrober $150 \pm 0,5$ g de granulats lavés et tamisés de la fraction 5-10 mm de la formule avec $2,25 \pm 0,25$ g de bitume. L'enrobage se fait à 165°C quels que soient le bitume et la technologie. Les granulats enrobés sont ensuite séparés en trois lots et placés dans des béciers contenant de l'eau déminéralisée. Les granulats sont maintenus par une grille les empêchant de se frotter les uns aux autres. Les béciers sont placés sur une table agitatrice pendant 24 h (figure 2.9). À l'issue de la période d'agitation, les granulats sont examinés, puis le pourcentage de désenrobage est évalué à l'œil. Pour limiter les erreurs d'appréciation, les évaluations ont été faites par plusieurs personnes.

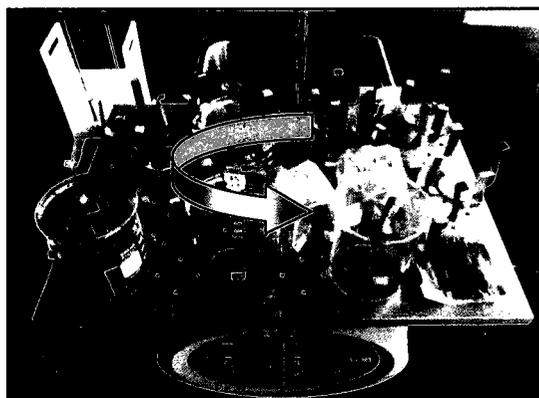


Figure 2.9 Table agitatrice et béciers pour désenrobage.
Glen Philippot (2009)

2.4.5. Orniérage

Le test d'orniérage est un test qui permet d'évaluer la sensibilité à la déformation par orniérage des enrobés. Cet essai suit la norme québécoise LC 26-410, qui s'inspire de la norme française NF EN 12697-22. Il consiste à faire passer une roue de façon répétée sur une plaque d'enrobé poussée contre elle par un vérin, et à mesurer à intervalle donnés la profondeur des ornières ainsi créées. Ces profondeurs donnent un pourcentage d'orniérage par rapport à l'épaisseur initiale de la plaque. La machine d'essai (figure 2.10) permet de tester deux plaques simultanément. Ces plaques sont maintenues à une température constante dans l'enceinte calorifugée grâce à un système de chauffage.

L'orniérage étudié par cet essai est directement lié aux caractéristiques intrinsèques de l'enrobé, telles que le pourcentage de vides de l'échantillon, le grade du bitume, la forme des granulats, etc. C'est ce que l'on appelle l'orniérage de petit rayon (rapport à la largeur des ornières, de l'ordre de grandeur de celle des pneumatiques des véhicules), contrairement à l'orniérage de grand rayon, lié principalement à des défauts de structure de la chaussée.

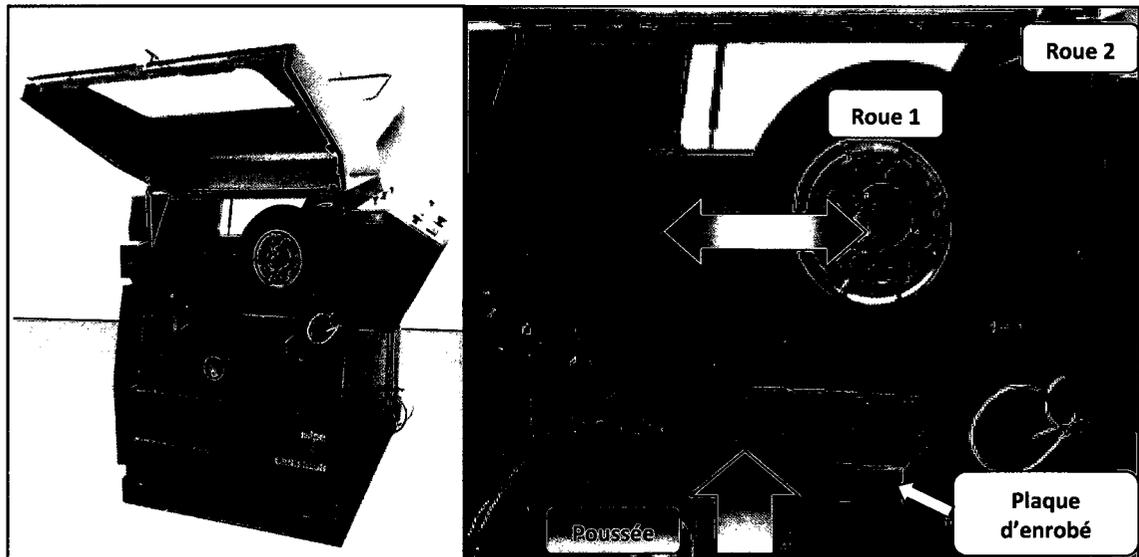


Figure 2.10 Ornièreur.
Glen Philippot (2009)

Un seul mélange a été testé avec ce test en comparaison tiède-chaud : le mélange de Saint-André Avellin, soit le seul mélange ayant été effectivement posé en chantier à la fois en tiède et en chaud. La température de chauffage des plaques lors du test est liée au grade de bitume utilisé. Dans ce cas, le bitume étant un PG 58-34, la température de l'enceinte était de 58°C. Deux plaques de chaque mélange (chaud et tiède) ont été testées. Cette formule d'enrobé ornierant beaucoup, tout en demeurant conforme aux spécifications de la norme, elle a été délibérément retenue afin de pouvoir mieux constater si le procédé tiède ou l'additif utilisé avaient une influence sur les résultats par le biais de l'effet d'échelle.

2.5. Résultats

2.5.1. Compaction PCG

Les résultats présentés sur le graphique de la figure 2.11 présentent les pourcentages de vides obtenus à 80 girations lors de la compaction des éprouvettes de diamètre 150 mm. Ce nombre de girations correspond à N_d , qui représente dans la norme québécoise la compaction de l'enrobé attendue à la livraison du chantier. Il doit impérativement se trouver entre 4 et 7 %. La valeur « formule originale » correspond aux vides attendus tels qu'ils ont été obtenus quand la formule a été mise au point. Normalement, les résultats à chauds doivent y être identiques.

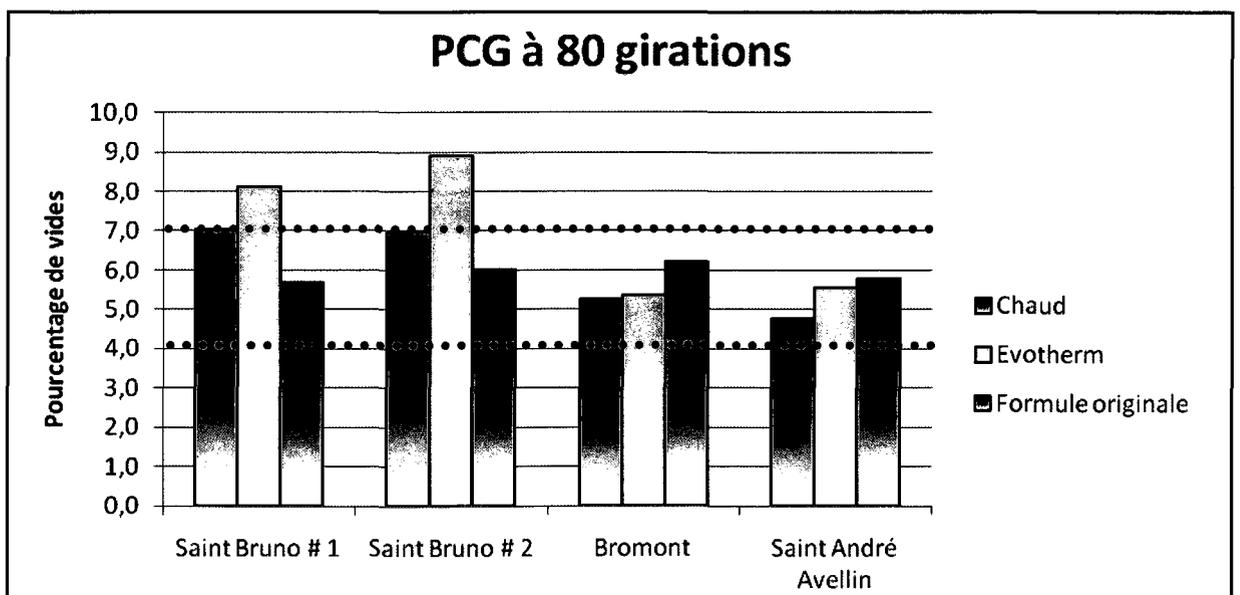


Figure 2.11 Résultats des essais de compaction.

Il se trouve qu'en ce qui concerne les formules de Saint-Bruno, les pourcentages de vides étaient supérieurs aux attentes, même pour les mélanges compactés à chaud (tableau 2.7). Il est apparu que les granulométries annoncées au départ pour les matériaux réceptionnés ne correspondaient pas à celles attendues. Il a donc fallu procéder à un ajustement des proportions de chaque granulat, mais, malgré tout, les résultats finaux restent supérieurs aux vides de la formule originale. De plus, les mélanges tièdes ne rentrent pas dans l'intervalle de 4 à 7% de vides exigé par la norme (figure 2.11).

Tableau 2.7 Résultats de compaction PCG

Formule	Bitume	Pourcentage de vides selon le nombre de girations		
		10	80	200
Norme	-	≥ 11 %	4 - 7 %	≥ 2 %
Saint-Bruno # 1	PG 70-28	15,1%	7,0%	4,3%
+ <i>Evotherm</i>		16,1%	8,1%	5,6%
Saint-Bruno # 2	PG 58-28	15,7%	7,0%	4,0%
+ <i>Evotherm</i>		17,1%	8,9%	6,1%
Bromont	PG 58-34	13,2%	5,2%	2,9%
+ <i>Evotherm</i>		12,7%	5,3%	3,5%
Saint-André Avellin	PG 58-34	12,5%	4,8%	2,3%
+ <i>Evotherm</i>		13,2%	5,6%	3,4%

Il n'y a pas de problème particulier concernant les formules de Bromont et Saint-André Avellin, les pourcentages de vides obtenus répondant aux spécifications.

2.5.2. Tenue à l'eau

La norme québécoise 4202 demande à ce que la valeur minimale du résultat de l'essai de tenue à l'eau soit de 70%. C'est-à-dire que les éprouvettes ayant subi un trempage prolongé soient au moins 70% aussi résistantes que les éprouvettes témoins.

Dans le cas des mélanges chauds, il n'y a pas de soucis, la valeur du ratio minimal mesuré étant de 80% pour la formule de Saint-Bruno avec bitume PG 58-28, soit le bitume le plus mou utilisé.

En revanche, comme le montre la figure 2.12, pour les mélanges tièdes seules deux formules répondent aux exigences de tenue à l'eau, à savoir : Saint-Bruno PG 70-28 (78%) et Bromont (72,5%). La formule de Saint-André Avellin atteignant 69,2%, les résultats à son sujet sont discutables. Il apparaît clairement que les mélanges à base d'Evotherm® fabriqués en laboratoire à -50°C par rapport aux échantillons témoins ont des résultats bien inférieurs en terme de tenue à l'eau. Les doutes concernant la sensibilité des mélanges tièdes semblent bel et bien fondés.

Cette moins bonne performance à la tenue à l'eau des mélanges tièdes intervient malgré la présence d'agents antidésenrobage et de surfactants dans l'additif, censés donner de meilleurs résultats face aux agressions de l'eau. Visiblement, ils ne suffisent pas à maintenir la performance des enrobés à eux seuls. Les attentes étaient contraires.

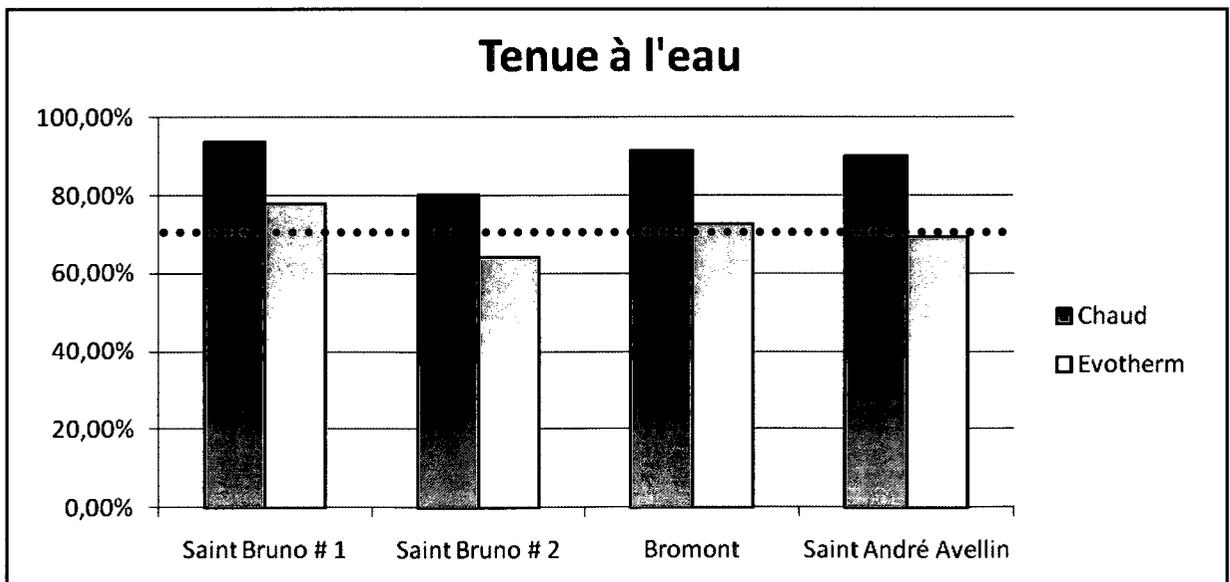


Figure 2.12 Ratios de tenue à l'eau.

Les résultats bruts de ratio de tenue à l'eau sont les seuls exigés par la norme. Mais la prise en compte de ces seuls résultats écarte d'autres informations importantes pour comprendre

les phénomènes qui entrent en jeu dans les dommages liés à l'humidité. Une observation intéressante consiste à comparer les moyennes des contraintes maximales enregistrées lors de l'essai. Ces résultats sont présentés sur le graphique de la figure 2.13 et dans le tableau 2.8, où TEA signifie tenue à l'eau.

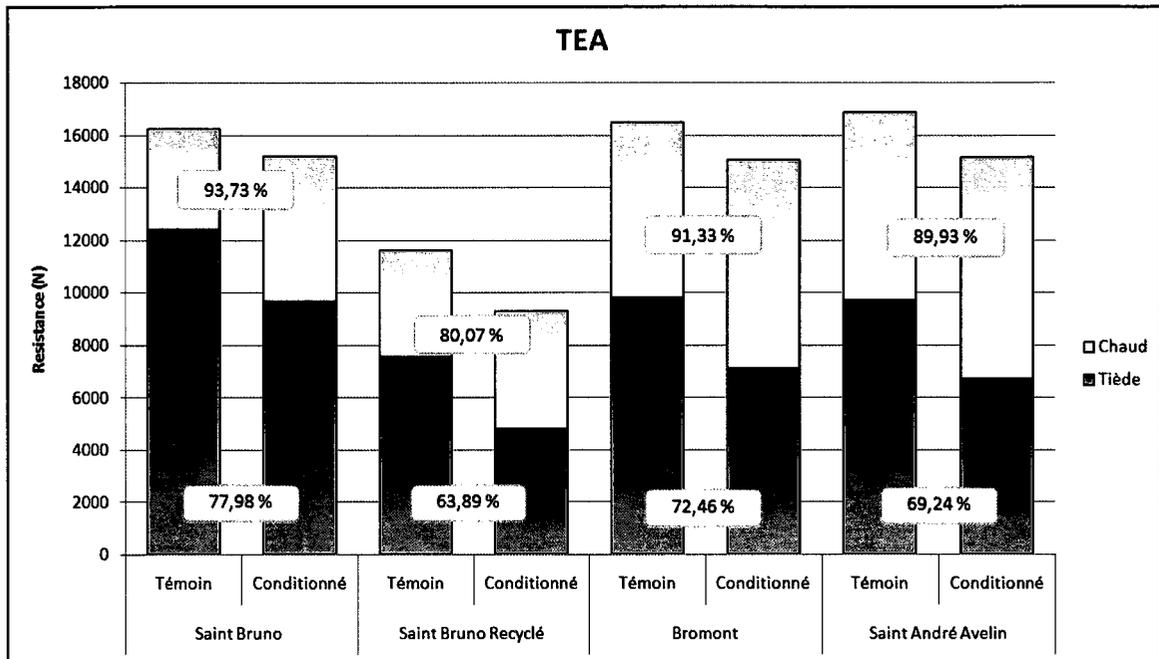


Figure 2.13 Contraintes maximales de tenue à l'eau.

Tableau 2.8 Résultats tenue à l'eau.

	Saint Bruno # 1			Saint Bruno # 2		
	Témoins	Conditionné	Ratio	Témoins	Conditionné	Ratio
Chaud (N)	16239	15221	93,73%	11619	9304	80,07%
Tiède (N)	12407	9675	77,98%	7555	4827	63,89%
Perte résistance	-23,59%	-36,44%	-15,75%	-34,98%	-48,12%	-16,18%
	Bromont			Saint André Avelin		
	Témoins	Conditionné	Ratio	Témoins	Conditionné	Ratio
Chaud (N)	16481	15052	91,33%	16874	15174	89,93%
Tiède (N)	9811	7109	72,46%	9707	6722	69,24%
Perte résistance	-40,47%	-52,77%	-18,87%	-42,47%	-55,70%	-20,68%

La figure 2.13 montre les valeurs de contraintes maximales pour chaque mélange, à la fois pour les lots conditionnés et les lots témoins. Le bas de chaque barre correspond à la valeur moyenne de résistance des éprouvettes tièdes, à laquelle il faut ajouter la partie supérieure pour obtenir la résistance des mêmes éprouvettes fabriquées à chaud. Les valeurs de pourcentage entre deux barres correspondent aux valeurs de ratio de tenue à l'eau, la valeur du haut étant pour les éprouvettes de contrôle à chaud, et celle du bas pour les éprouvettes tièdes.

Il est possible de constater que les pertes de résistance entre les mélanges tièdes et chauds sont importantes. S'il n'était tenu compte que des résultats de ratio, seuls résultats exigés par la norme, dans un premier temps, le réflexe serait de penser que la chute de résistance suit la même tendance, à savoir entre 15,75 et 20,68%, d'après le tableau 2.8. Or il n'en est rien. Les pertes entre les mélanges chauds et les mélanges tièdes atteignent jusqu'à 55% dans certains cas.

Il y a donc, d'une part, une perte en ce qui concerne le ratio de tenue à l'eau, critère déterminant pour l'acceptation du matériau, allant jusqu'à rendre le mélange tiède non conforme dans un cas sur deux et, d'autre part, une perte importante de résistance des éprouvettes.

Si la perte de résistance était attendue concernant les éprouvettes tièdes par rapport aux chaudes, son ampleur est plus étonnante. Plusieurs raisons peuvent expliquer cette chute. Elles seront abordées par la suite. Il faut noter cependant que les formules de Bromont et Saint-André Avellin (chaud et tiède) ont été fabriquées à partir d'enrobés conservés dans des boîtes pendant au moins une semaine avant compaction. Ce sont ces deux mélanges qui présentent les plus fortes chutes de résistance. Il semble à la vue de ces résultats qu'un changement s'est produit dans l'enrobé tiède durant ce temps de cure supplémentaire. Cela pose la question de l'adéquation des processus de laboratoire pour enrobés chauds vis-à-vis des enrobés tièdes.

2.5.3. TSR AASHTO

L'essai américain de sensibilité à l'humidité vient compléter les résultats de l'essai précédent, avec le recours à des conditions plus sévères. Le critère retenu pour la validation de l'essai est un ratio de 80% entre la contrainte maximale des éprouvettes conditionnées et celles témoins non conditionnées.

La figure 2.14 illustre les résultats bruts de ratio obtenus à l'issue des mesures. Il apparaît que les mélanges chauds de toutes les formules respectent ce critère. En revanche, concernant les éprouvettes tièdes, seules trois formules passent le test avec succès. La quatrième, celle de Bromont n'atteint qu'un ratio de 78,6 %. Malgré tout, comme pour l'essai précédent, cette non-validation est discutable de par la proximité du résultat avec la limite.

La tendance générale pour les enrobés tièdes est une plus grande susceptibilité aux dommages causés par l'humidité, confortant les résultats précédents. Il est toutefois surprenant que malgré un protocole de test plus contraignant, les résultats semblent être meilleurs.

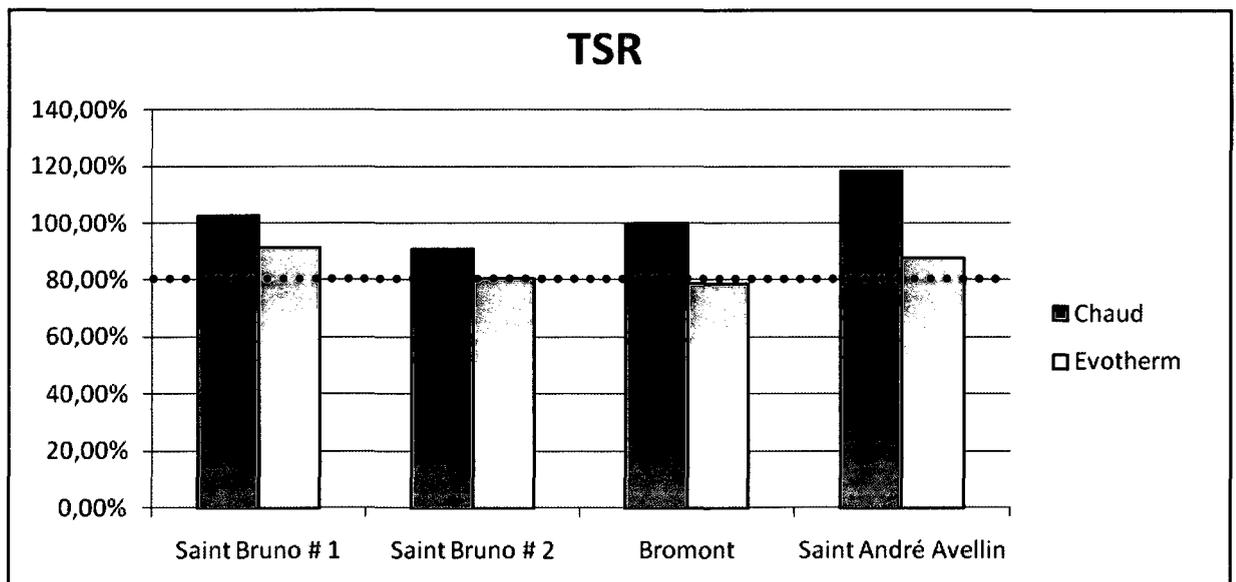


Figure 2.14 Ratios des tests de tenue à l'eau AASHTO (TSR).

La figure 2.15 et le tableau 2.9 présentent les résultats de contraintes maximales enregistrées pour les éprouvettes chaudes et tièdes, conditionnées ou non.

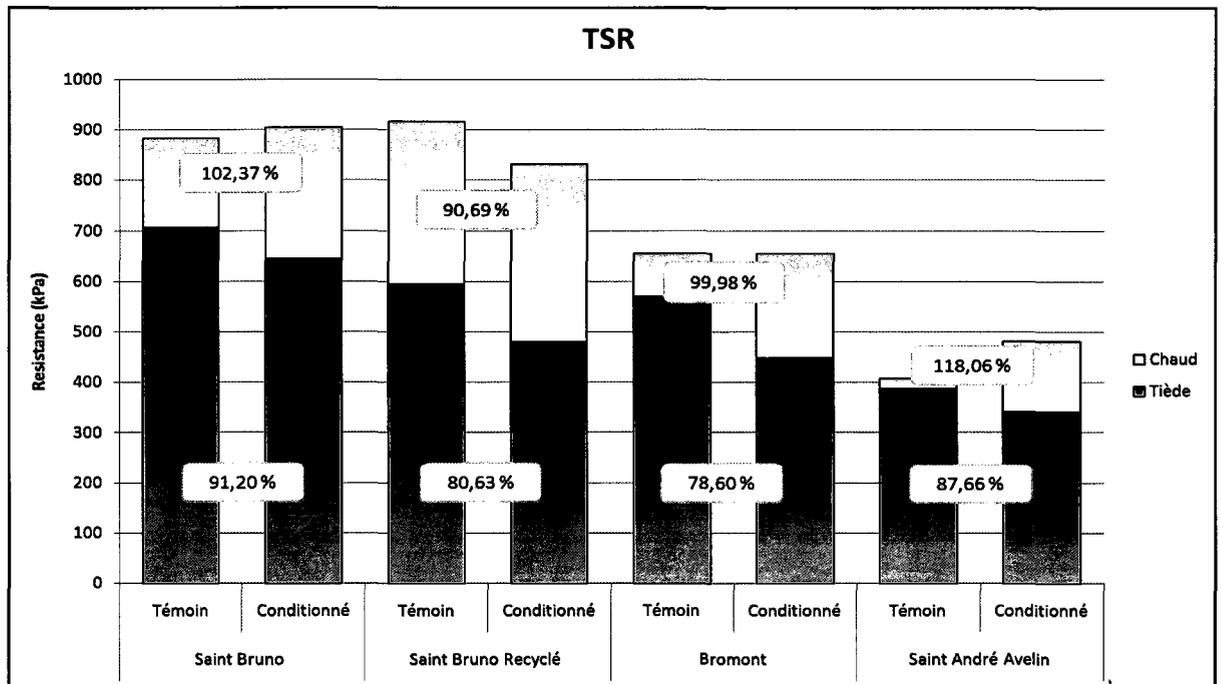


Figure 2.15 Contraintes à la rupture (essai TSR).

Tableau 2.9 Contraintes à la rupture (essai TSR)

	Saint Bruno # 1			Saint Bruno # 2		
	Témoin	Conditionné	Ratio	Témoin	Conditionné	Ratio
Chaud (kPa)	883	904	102,37%	916	831	90,69%
Tiède (kPa)	707	644	91,20%	595	480	80,63%
Perte résistance	-19,95%	-28,69%	-11,17%	-35,07%	-42,28%	-10,06%
	Bromont			Saint André Avelin		
	Témoin	Conditionné	Ratio	Témoin	Conditionné	Ratio
Chaud (kPa)	655	655	99,98%	408	481	118,06%
Tiède (kPa)	570	448	78,60%	388	340	87,66%
Perte résistance	-12,90%	-31,52%	-21,38%	-4,85%	-29,36%	-30,40%

Il apparaît que certains mélanges ont des ratios supérieurs à 100%. Cela signifie que les éprouvettes après conditionnement étaient plus résistantes que les éprouvettes témoins. Bien que surprenant, ce type de résultat arrive quelquefois. Les différentes étapes de conditionnement auront agi globalement plutôt comme une cure renforçant l'enrobé qu'une attaque de l'humidité. Malgré tout, des doutes planent sur le mélange de Saint-André Avellin, la valeur de ratio étant particulièrement élevée (118%). Les éprouvettes utilisées à chaud et non conditionnées devaient être anormalement faibles.

Comme pour l'essai québécois, il est possible d'observer sur la figure 2.15 les pertes de résistance entre les mélanges chauds et les mélanges tièdes. Ces chutes de valeurs de contraintes maximales à la rupture sont toutefois proportionnellement moins importantes que celles enregistrées lors de l'essai précédent, en particulier concernant les éprouvettes non conditionnées. Là encore, cette différence peut être interprétée comme un indice de l'inadéquation des essais « à chaud » en règle générale pour tester les enrobés tièdes. En effet, le fait que les mélanges tièdes aient des résultats moins médiocres, avec cet essai faisant intervenir des temps de cure, laisse à penser qu'il se pourrait que les enrobés tièdes nécessitent une cure avant de procéder aux mesures sur les éprouvettes.

Les observations faites sur les éprouvettes brisées n'ont pas montré plus de désenrobage de granulats sur les mélanges tièdes que sur les mélanges chauds. Cela tend à montrer que les faiblesses des enrobés tièdes ne sont pas dues à une mauvaise interaction bitume/granat, mais plutôt à une « dégradation » des propriétés du bitume. Ainsi les produits surfactants et antidésenrobage de l'additif ne seraient pas en cause, et permettraient un enrobage correct des granulats à basse température. Le problème pourrait venir de l'eau résiduelle supplémentaire présente dans l'enrobé, soit celle apportée par l'additif en solution. Malheureusement, la mesure de teneur en eau résiduelle des enrobés est une opération complexe, que nous n'avons pas pu effectuer faute de moyens techniques.

2.5.4. Désenrobage

La norme LC 25-009, portant sur l'évaluation de la susceptibilité au désenrobage des couples granulats/bitume, demande à présenter des résultats arrondis à 5%. Dans le cas

présent, les résultats étant particulièrement bons, ils auraient été de 100% pour tous les couples testés. C'est pourquoi le tableau 2.10 présente les résultats arrondis à 1% afin de pouvoir distinguer les comportements observés.

Tableau 2.10 Résultats du test de désenrobage

Origine	Enrobage résiduel	
	Chaud	Evothem
Saint Bruno # 1	98%	100%
Saint Bruno # 2	-	-
Bromont	97%	100%
Saint André Avellin	98%	100%

Il est clair qu'il n'y a aucun problème de désenrobage flagrant concernant les couples granulat/bitume étudiés. Cependant, on note que les granulats enrobés au bitume additivé présentent un enrobage résiduel sensiblement plus important que ceux enrobés avec le même bitume sans additif. Les agents antidésenrobage agissent donc conformément aux attentes. Ces résultats renforcent l'idée que les performances médiocres en tenue à l'eau ne sont pas originaires d'un problème de collage du bitume aux granulats.

2.5.5. Orniérage

La formule testée à l'orniéreur est une formule très orniérante retenue délibérément : celle de Saint-André Avellin. L'objectif étant d'observer s'il y avait une différence flagrante entre le mélange préparé à chaud et le mélange tiède par le biais d'un effet d'échelle.

Cet essai fait suite à des interrogations, survenues au cours de l'étude, concernant le recouvrement par l'enrobé tiède de ses propriétés de mise en œuvre. Est-ce que l'enrobé tiède, lorsqu'il est chauffé à des températures proches de celles de compaction, retrouve une maniabilité accrue ? Dans le cas de la tenue en service sous trafic de la chaussée, ce phénomène pourrait s'avérer dramatique et causer de profondes ornières. Cette interrogation est légitime car, en été, il est courant que par de chaudes journées l'enrobé monte en température jusqu'à 70°C voire 80°C dans certaines régions chaudes. S'il est

posé classiquement à 140°C, on peut estimer que la température limite de maniabilité est assez éloignée de la température atteinte au soleil, et que l'enrobé ne va pas perdre trop de rigidité. C'est d'ailleurs ce qui se passe. En revanche qu'en est-il si la température au soleil n'est inférieure que de 20 ou 30°C de celle à laquelle le matériau a été compacté ? L'enrobé retrouve-t-il sa plasticité ?

Les mesures de profondeur d'ornièrisme ont révélé que le mélange tiède ne présentait pas plus de sensibilité à l'ornièrisme que le mélange chaud. Certaines valeurs sont même inférieures. Les pourcentages d'ornièrisme sont présentés à la figure 2.16 et dans le tableau 2.11. Les résultats présentés sont les moyennes pour deux plaques lors de l'essai.

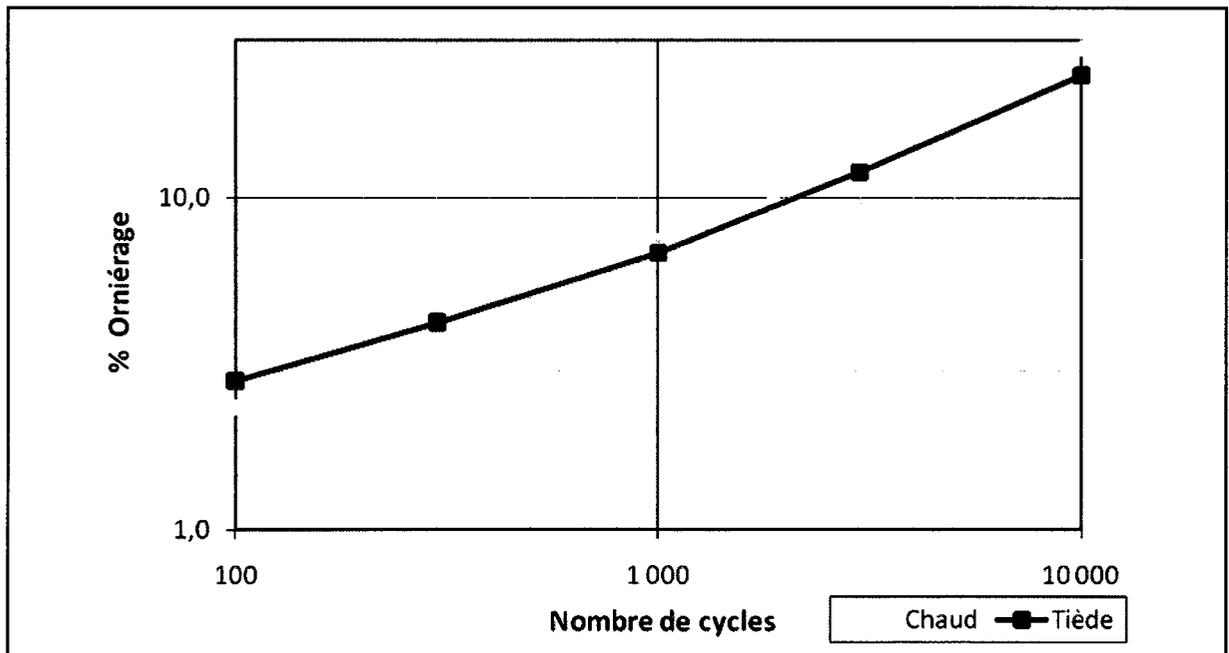


Figure 2.16 Évolution de l'ornièrisme.

Tableau 2.11 Résultats d'ornièrisme

Mélange	Nombre de cycles				
	100	300	1 000	3 000	10 000
Norme			< 10 %	< 20 %	
Chaud (moyenne)	2,35 %	4,15 %	7,40 %	12,56 %	28,42 %
Tiède (moyenne)	2,82 %	4,22 %	6,84 %	12,00 %	23,50 %

Il faut noter que la valeur finale des plaques « tièdes » a été obtenue dans des conditions moins sévères que celles des plaques chaudes. En effet, leurs 2100 derniers cycles ont été effectués avec une charge à la roue réduite. La pression dans les vérins pressant les plaques contre les roues a été réduite à 3 bar au lieu de 5 bar. Cette réduction de pression était nécessaire car la profondeur des ornières et principalement leur forme faisait que l'essai poussait la machine dans ses limites. Il se peut donc que la valeur finale de 23,5 % soit légèrement sous évaluée.

En ce qui concerne le recouvrement de plasticité à haute température, les résultats montrent manifestement qu'il n'en est rien. Il est certain que pour mieux cerner ce phénomène d'autres essais sont nécessaires, mais dans le cas de l'enrobé étudié, les performances à l'essai d'orniérage ne sont pas inférieures au mélange chaud.

CHAPITRE 3

IMPACT ENVIRONNEMENTAL

3.1. Présentation des méthodes de calcul

3.1.1. Calcul avec le logiciel Gaïa

Gaïa est un logiciel d'éco-comparaison, développé par l'entreprise Eurovia en France, qui permet d'effectuer des calculs concernant l'impact environnemental de la production et de la mise en œuvre de matériaux pour la construction routière. L'objectif premier du logiciel est de comparer deux solutions entre elles pour un même chantier. La comparaison se fait à plusieurs niveaux du processus de construction de la chaussée. Cela inclut :

- La production des matières premières,
- Le transport des matières premières,
- Le transport de et vers le chantier,
- La production de l'enrobé,
- La mise en œuvre.

Tous les impacts imputables à chaque étape sont détaillés dans les résultats donnés par le logiciel. La liste des impacts retenus a été présentée au chapitre 1.4. Dans cette étude, quelques indicateurs utilisés par Gaïa seront analysés, à savoir la consommation des ressources énergétiques, la consommation directe de fioul et les émissions de gaz à effet de serre. L'analyse des résultats des indicateurs en fonction du ou des niveaux étudiés doit permettre de cibler où se situent les gains ou dépenses d'énergie lors du recours aux enrobés tièdes, et de mettre en perspective ces résultats vis-à-vis du processus global de construction de chaussée.

Les informations rentrées dans le logiciel par l'opérateur concernent toutes les phases d'un chantier. La figure 3.1 montre les phases de saisie des informations et le tableau 3.1 les détaille.

Figure 3.1 Interface de Gaïa.

Tableau 3.1 Description de l'interface de Gaïa

Étape	Description
(1)	Différentes solutions étudiées : ici une solution chaude et une tiède
(2)	Phases du chantier : ici une phase de planage, puis d'application de l'enrobé
(3)	Étapes successives de chaque phase. On y indique : - les matières premières utilisées, (vue sélectionnée ici) - les machines mises en œuvre, (figure 3.2) - les éventuels déblais
(4)	Indication des enrobés appliqués et des tonnages respectifs (ici trois types recensés)
(5)	Saisie des informations relatives à l'enrobé produit (figures 3.3 et 3.4)

La capture d'écran présentée à la figure 3.2 représente la phase de saisie des machines de chantier, ici concernant la phase d'application de l'enrobé. On y indique le type de machine, le nombre de jours d'utilisation, leur consommation de carburant à l'heure et le nombre d'heures de travail par jour.

	Delete	Choice of machines	Number day	L/hour	Average duration of use /d
1		Alimentateur finisseur 2000 l/h	3.5	20	7
2		Finisseur 17 à 21 tonnes	3.5	16	7
3		Compacteur l = 1,40 à 1,7	3.5	11	7
4		Compacteur b 1,8	3.5	13	7
5					

Figure 3.2 Saisie des machines de chantier.

La capture d'écran présentée à la figure 3.3 présente le type d'information à saisir concernant la centrale d'enrobage (gaz ou fioul, consommation énergétique du parc à liant, teneur en eau de la fraction 0/2 mm, pourcentage de fraisat recyclé, ainsi que les distances de transport des matières premières à la centrale).

Characteristics of the coating plant	
Name of coating plant	Gaz L&G E sans parc liant 1.77% eau
Energy model	noir1
Energy type burner	Gaz
Energy type boiler	Electricité
Boiler consumption [kWh/t]	0
Average sand water content [%]	1.77 %
Recycled material binder content [%]	4.5 %

Detail of the raw materials transport				
Wording	Iron km	River km	Road km	Total km
Bitume Pur	0	0	250	250
Bitume modifié	0	0	350	350
Concasse moyen	270	0	0	270
Roules Moyen	0	0	180	180

Figure 3.3 Informations sur la centrale d'enrobage.

La capture d'écran de la figure 3.4 illustre les informations que l'opérateur doit saisir dans le logiciel en ce qui concerne l'enrobé produit. On y retrouve, outre le nom donné à la formule, le pourcentage de la fraction 0/2 mm, la densité maximale, le pourcentage de vides de l'enrobé compacté, la température d'enrobage ainsi que les proportions bitume/granulats.

Coating formula

Name of formula: BBSG 0/10 Lot et Garonne
 % screened at 2 mm: 21.3 %
 Density t/m3: 2.43
 Percent voids worksite: 6 %
 Coating temperature [°C]: 161.00

List of constituents

	Constituent 1	Constituent 2
Name of formula	Granulats concassés	Bitume pur
BBSG 0/10 Lot et Garonne	94.7 %	5.3 %

Modify formula Close

Figure 3.4 Informations concernant l'enrobé.

Les données sources pour l'évaluation des impacts concernant la production des matières premières proviennent de banques de données d'analyse de cycle de vie extérieures à l'entreprise (Swedish Environmental Research Institute, Eurobitume, USIRF), de données transmises par les fournisseurs ou de calculs simplifiés concernant la production des matières premières. Les impacts liés au transport sont déterminés en fonction du nombre de tonnes-kilomètre parcourus et du moyen de transport utilisé (route, fer, fluvial). Quant aux modèles énergétiques utilisés pour les calculs, ils ont été développés à partir d'observations et de mesures effectuées par Eurovia sur ses centrales d'enrobage, et résultent d'une compilation de ces données.

Les résultats obtenus avec Gaïa sont donc représentatifs des impacts des activités de constructions routières européennes. Malgré tout, le logiciel est utilisé sans modification majeure par DJL pour évaluer l'empreinte environnementale de ses réalisations en Amérique du Nord. En effet, malgré quelques différences mineures au niveau du matériel et de certaines distances de transport, la comparaison de deux solutions reste possible sans trop d'erreurs. Par exemple, au niveau du transport, Gaïa pose comme hypothèse que lors

d'un transport en train, l'énergie consommée est à 90% électrique et 10% fossile, ce qui est le cas en France mais pas en Amérique. Il suffit de faire attention aux hypothèses retenues pour ne pas biaiser les résultats.

Le logiciel étant propriété d'Eurovia, l'entreprise n'a pas souhaité communiquer la totalité des modèles utilisés afin de protéger son outil d'un éventuel vol de propriété intellectuelle. Il existe par conséquent quelques zones d'ombre concernant les formules exactes de calcul utilisées.

3.1.2. Calcul théorique

Afin de comparer les résultats de consommation d'énergie donnés par Gaïa, des calculs supplémentaires ont été effectués à l'aide du tableur Excel, en se basant sur des systèmes parfaits (sans pertes d'énergie). Ceci a permis de mieux cerner les différences qui pouvaient exister entre les mesures réelles et les valeurs obtenues par simulation. Cela a permis également de poser des repères concernant les ordres de grandeurs des résultats face aux zones d'ombres du logiciel.

3.2. Évaluation des gains bruts de production

Dans toute la suite de l'étude, il est posé comme hypothèse que les mélanges étudiés sont strictement identiques, à savoir mêmes matières premières, mêmes proportions de matériaux, mêmes centrales de production. Les seules différences étant les températures d'enrobage et l'utilisation de l'additif Evotherm® pour le procédé tiède. Seule l'étude du cas réel fait une légère entorse à cette règle puisque d'un jour à l'autre les matériaux ont vu leur teneur en eau varier lors de la phase d'expérimentation. En conséquence, certaines mesures de correction des résultats ont été utilisées.

3.2.1. Première évaluation : production de 1000 tonnes

Simulation Gaïa

Dans un premier temps, il est intéressant de simuler le processus d'enrobage en centrale afin d'évaluer le gain brut que procure le recours à l'additif Evotherm®. La simulation effectuée, ne prend en compte que l'enrobage dans le tambour malaxeur d'une centrale,

c'est-à-dire le séchage et l'enrobage des granulats. Le chauffage du bitume dans le parc à liant est mis de côté pour l'instant.

Les hypothèses retenues sont les hypothèses par défaut de Gaïa pour une formule de BBSG 0/10, équivalent à un ESG-10 au Québec :

- Teneur en granulats < 2 mm (sables) : 34%,
- Teneur en eau du sable : 2%,
- Teneur en bitume : 5,39%,
- Température d'enrobage : 160°C,
- Centrale au gaz.

En ce qui concerne le procédé tiède, on considèrera :

- Température d'enrobage à 110°C,
- Teneur en additif : 0,3% sur la masse totale
- Teneur en eau résiduelle de l'enrobé : 0,6%.

Pour une production de 1000 tonnes, on obtient les résultats suivants (tableau 3.2) :

Tableau 3.2 Bilan environnemental simulé sur 1000 tonnes

	Unité	Chaud	Tiède	Différence	%
Consommation d'énergie	MJ	255 431	193 900	-61 531	-24,09%
Consommation directe de fioul	Litres	7 240	5 496	-1 744	-24,09%
Émission de gaz à effet de serre	kg eq CO ₂	12 155	8 831	-3 324	-27,35%

Dans le cas présent, la consommation directe de fioul et la consommation d'énergie présentent la même baisse, car les deux facteurs représentent la même chose étant donné

qu'on ne considère que le processus d'enrobage. La consommation de gaz est convertie par le logiciel en équivalent litre de fioul. Ainsi le logiciel considère que le gain attendu en termes de réduction de consommation d'énergie est de 24%. C'est en somme le maximum que l'on peut attendre de la technologie Evotherm®, sur la base de l'outil de simulation disponible. Les résultats de Gaïa sont surévalués, du fait des hypothèses retenues et des marges de sécurité appliquées. Il est donc possible que ces résultats soient améliorables dans la réalité si l'installation industrielle est très performante et optimisée.

Calcul théorique

Les hypothèses utilisées lors d'un calcul théorique dans des conditions parfaites, c'est-à-dire sans aucune perte énergétique, sont légèrement différentes de celles de Gaïa, à cause des zones d'ombres de l'algorithme de calcul du logiciel.

Dans le modèle utilisé, il est considéré qu'une partie de l'eau présente dans les granulats n'est pas vaporisée. N'ayant aucune information sur le processus de changement d'état de l'eau dans les granulats en cours d'enrobage, l'hypothèse qui a été posée pour satisfaire les 0,6% d'eau résiduelle est la suivante (figure 3.5) :

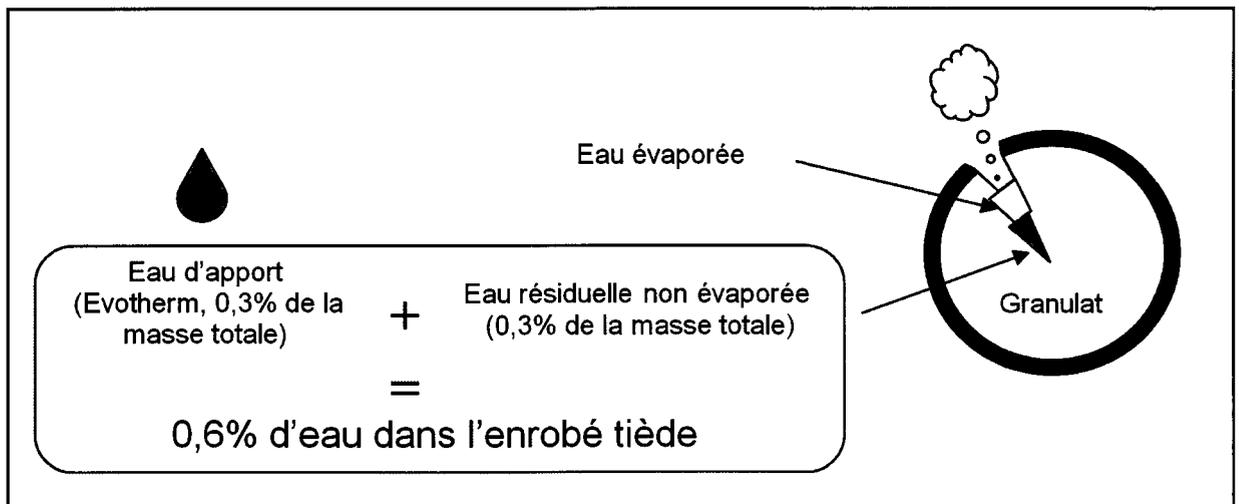


Figure 3.5 Répartition de l'eau pour le calcul théorique.

L'eau dans les pores des granulats est chauffée (jusqu'à 100°C pour le calcul) puis une partie de cette eau s'évapore. L'eau non évaporée est comptabilisée dans le pourcentage d'eau résiduelle. Cependant, l'additif Evotherm® introduit à hauteur de 0,3% de la masse totale apporte de l'eau en plus de la teneur en eau naturelle des granulats. Pour simplifier, on considérera que le produit apporte 0,3% d'eau (additif pur négligé). Cette eau introduite dans la ligne d'alimentation en bitume ne nécessite pas à proprement parler d'énergie supplémentaire. Elle ne fait que participer à une baisse de température du mélange une fois les granulats enrobés. Ainsi, on peut considérer que cette eau d'apport n'influence pas le bilan énergétique. Donc, pour atteindre 0,6% d'eau résiduelle au final avec un apport de 0,3% dû à l'additif, il faut estimer l'eau « naturelle » non évaporée des granulats à 0,3%.

Les paramètres retenus pour le calcul théorique sont présentés à la figure 3.6 :

Température	Chaud	160°C	Teneur en eau	Chaud	1,70%	C _p eau	4180	J/kg.°C
	Tiède	110°C		Tiède	1,70%	L _{vap}	2260	kJ/kg
	Ambiante	18°C		Résiduel	0,30%	C _p granulats	800	J/kg.°C
Formule	Bitume	5,39%	Tonnage	Chaud	1000 t			
	Granulats	94,61%		Tiède	1000 t			

Figure 3.6 Paramètres de calcul.

La teneur en eau est celle moyenne des granulats. Elle a été fixée à 1,7%, pour coller aux paramètres de Gaïa, qui la considère à 2% pour le sable dosé à 34%, la teneur en eau des autres granulats étant inconnue (non divulguée et non modifiable). L'indication « résiduel » correspond à la portion d'eau non évaporée des granulats. Cette valeur permet de calculer l'énergie sauvée du fait qu'une partie de l'eau ne s'évaporera pas lors du procédé tiède. En revanche, cette eau non évaporée est bien comptabilisée dans l'énergie de chauffage jusqu'à 100°C. C_p représente la capacité thermique des matériaux, et L_{vap} la chaleur latente de vaporisation.

En décomposant les calculs on obtient :

- L'énergie de chauffage de l'eau : c'est l'énergie utilisée pour chauffer l'eau présente dans les granulats de la température ambiante à 100°C.
- L'énergie de vaporisation de l'eau : c'est l'énergie nécessaire pour vaporiser cette même quantité d'eau, puisque les granulats sont chauffés au-delà de 100°C.
- Puis pour l'enrobé tiède, l'énergie sauvée à la vaporisation, qui correspond à la quantité d'eau résiduelle non vaporisée. Elle est retranchée à la valeur précédente pour trouver l'énergie de vaporisation réelle (les valeurs détaillées sont en gris dans le tableau 3.3).
- L'énergie de chauffage des granulats.

Tableau 3.3 Résultats théoriques 1000 tonnes d'enrobé

	Unité	Tiède	Chaud	Différence	%
Énergie chauffage eau	MJ	5512,8	5512,8	0	0%
<i>Énergie vaporisation eau</i>	<i>MJ</i>	<i>36349,2</i>	<i>36349,2</i>	<i>0</i>	<i>-</i>
<i>Énergie sauvée à la vaporisation de l'eau</i>	<i>MJ</i>	<i>-6414,6</i>	<i>0</i>	<i>-6414,6</i>	<i>-</i>
Total vaporisation	MJ	29934,6	36349,2	-6414,6	-21,4%
Énergie chauffage granulats	MJ	69633,0	107477	-37844,0	-35,2%
Total	MJ	106474,1	149339	-42864,8	-29,6%

Le fait qu'il reste 0,3% d'eau résiduelle permet d'économiser sur le poste «vaporisation ». Dans la globalité du processus, l'économie d'énergie totale est de 29,6% en faveur de l'enrobé tiède.

Le graphique de la figure 3.7 permet de comparer les résultats obtenus pour cette première simulation sur une production de 1000 tonnes. Bien entendu, les résultats « théoriques » sont bien en dessous de ceux du logiciel, mais la tendance reste identique, soit une baisse de 24,1% avec le logiciel et 29,6% avec le modèle parfait. La différence entre les deux calculs représente donc les déperditions d'énergie estimées lors du processus d'enrobage.

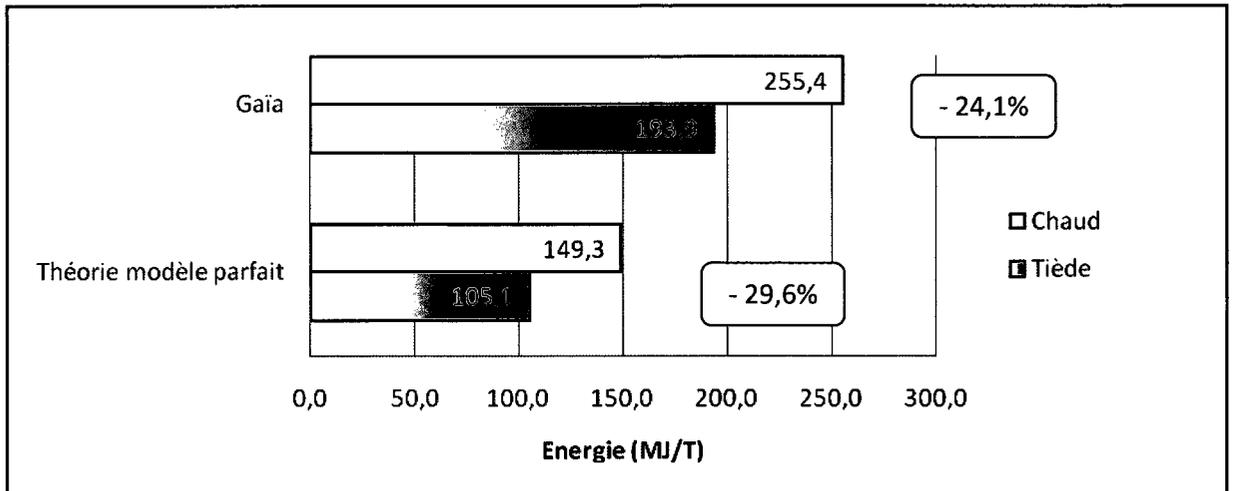


Figure 3.7 Comparaison des résultats (1000 tonnes).

Le recours au procédé d'enrobage tiède faisant baisser la température de 50°C dans les conditions précisées précédemment permet donc en théorie un gain d'énergie compris approximativement entre 24% et 30% par rapport au procédé chaud. En valeur absolue, le gain se chiffre entre 43 MJ par tonne (calcul théorique) et 62 MJ par tonne (Gaïa). C'est le gain brut dû à l'utilisation de l'additif, si la seule consommation étudiée est celle du brûleur.

3.2.2. Calage sur une production réelle

L'entreprise Eurovia a mené un chantier pilote en France en septembre 2009, lors duquel des mesures précises de consommation d'énergie ont été effectuées en centrale. Les relevés d'énergie consommée ont été faits en instantané, en notant l'allure du brûleur au gaz à plusieurs reprises lors de la fabrication. La consommation de gaz en fonction de l'allure du brûleur étant connue, ainsi que le pouvoir calorifique inférieur du gaz, il est possible de comptabiliser l'énergie dépensée au total. Outre les relevés de consommation, des mesures concernant les émissions de la cheminée ont été réalisées par un laboratoire indépendant (Bureau Veritas). À partir des données compilées dans le rapport, il est possible de calculer les gains réels en énergie, ainsi que de les comparer aux résultats que l'on obtiendrait par simulation.

Production réelle

La production de l'enrobé (EB-10 à base de bitume de pénétration 35/50 dosé à 5,3%) s'est déroulée sur deux jours. Le premier jour, le mélange tiède a été fabriqué, le deuxième jour était dévolu au mélange chaud. Les composants de ces mélanges (bitumes et granulats) étaient les mêmes, bien évidemment, mais d'une journée à l'autre, la teneur en eau des granulats a varié. Les teneurs en eau mesurées sont présentées au tableau 3.4.

Tableau 3.4 Teneurs en eau des granulats

Fabrication Evotherm ®				Fabrication à chaud			
Fuseau granulométrique	%	ppc	ω %	Fuseau granulométrique	%	ppc	ω %
6/10 mm	44,1	46,6	1,11	6/10 mm	44,1	46,6	0,93
2/6 mm	24,6	26,0	2,20	2/6 mm	24,6	26,0	1,28
0/2 mm	21,3	22,5	5,52	0/2 mm	21,3	22,5	4,47
filler	4,7	5,0		filler	4,7	5,0	
bitume	5,3	5,6		bitume	5,3	5,6	
<i>Teneur en eau</i>		2,33%		<i>Teneur en eau</i>		1,77%	

C'est la raison pour laquelle deux calculs distincts ont été menés afin de comparer les deux mélanges. Un tenant compte de la différence de teneur en eau, et l'autre non. Afin de comptabiliser la teneur en eau supplémentaire des granulats de l'enrobé tiède, l'énergie supplémentaire nécessaire pour son évaporation a été calculée, en estimant une élévation de température de 12°C à 100°C puis l'évaporation de l'eau. Pour une différence de 0,56 % de teneur en eau, l'énergie supplémentaire par tonne d'enrobé atteint 14,7 MJ.

Les résultats des mesures de consommation d'énergie ainsi que les gains qui en découlent issus des relevés sont présentés au tableau 3.5.

Tableau 3.5 Consommation d'énergie

		Fabrication selon procédé Evotherm® DAT H5	Fabrication à chaud
Température moyenne	°C	118	161
Tonnage produit	tonne	126,9	79,5
Énergie consommée	MJ	19019	15516,2
Consommation d'énergie à la tonne	MJ/t	149,9	195,2
Correction teneur en eau	MJ/t	-14,7	-
Consommation d'énergie à la tonne avec correction	MJ/t	135,2	195,2
Gain énergétique sans correction	%	-23,20%	
Gain énergétique corrigé	%	-30,70%	

Ainsi, en considérant que la teneur en eau entre les deux journées est peu différente, il est possible d'estimer dans un premier temps que les matériaux étaient dans le même état de saturation et que la différence relève d'imprécisions de mesures. La teneur en eau à retenir dans ce cas serait la moyenne des deux valeurs. Dans ce cas, le gain énergétique est de 23,2 %.

Dans un deuxième temps, si l'on considère exactement les deux valeurs de teneur en eau des granulats, et que l'on souhaite comparer les deux procédés, il faut alors ramener l'énergie consommée par les deux procédés aux teneurs en eau de leurs granulats respectifs, soit en retranchant le surplus d'énergie consommée par le procédé tiède. Ainsi les résultats présentés dans ce cas reviennent à considérer une teneur en eau de 1,77% pour chaque procédé. Dans ce cas, le gain est de 30,7%.

Le gain réel se situe donc entre ces deux valeurs. Cependant, d'autres mesures ont été effectuées en centrale à plus long terme, soit quatre journées de production pour le procédé Evotherm® et deux mois pour la production à chaud, incluant les arrêts de production. Les relevés de compteur de gaz indiquent dans ce cas un gain global de 24,5%. Étant donné que les arrêts de production entraînent une surconsommation due à la nécessité de chauffer

le malaxeur sans qu'il ne produise d'enrobé, la deuxième hypothèse apparaît alors plus plausible que la première. Le tableau 3.6 récapitule les résultats obtenus.

Tableau 3.6 Résultats mesurés de consommation d'énergie

		Fabrication selon procédé Evotherm® DAT H5	Fabrication à chaud	Gain
Consommation brute d'énergie à la tonne	MJ/t	149,9	195,2	-23,2%
Consommation d'énergie à la tonne avec correction de teneur en eau	MJ/t	135,2	195,2	-30,7%
Consommation d'énergie à la tonne à long terme (incluant les arrêts de production)	MJ/t	159,8	211,6	-24,5%

Calcul avec le logiciel Gaïa

Les simulations avec Gaïa ne permettant pas de régler la teneur en eau totale des granulats mais uniquement celle de la partie « sable » de 0 à 2 mm, il n'est pas directement possible de comparer les résultats réels à ceux de la simulation. Cependant, plusieurs simulations ont été effectuées, permettant d'encadrer la situation réelle.

Les paramètres de fabrication retenus sont les mêmes que ceux de la réalité, avec toujours une teneur en eau résiduelle de 0,6% pour l'enrobé tiède. Le tonnage rentré dans le logiciel pour les deux cas est de 126,9 tonnes, soit celui de l'enrobé tiède. Le pourcentage de fraction 0/2 mm est de 21,3%. N'ayant pas beaucoup d'information sur le mode de calcul du logiciel, les teneurs en eau suivantes ont été retenues pour le sable :

- 1,77% : teneur en eau globale minimale mesurée pour la production chaude,
- 4,47% : teneur en eau du sable de la production chaude,
- 5,52% : teneur en eau du sable de la production tiède.

Les résultats sont présentés au tableau 3.7, avec les valeurs en MJ/t en grisé.

Tableau 3.7 Résultats de simulation informatique du cas réel

Cas	Unité	Chaud	Tiède	Différence	%
$\omega = 1,77\%$	MJ	31 777	25 041	-6 736	-21,20%
	MJ /t	250,41	197,33	-53,08	
$\omega = 4,47\%$	MJ	33 663	26 865	-6 798	-20,19%
	MJ /t	265,27	211,70	53,57	
$\omega = 5,52\%$	MJ	34 396	27 574	-6 822	-19,83%
	MJ /t	271,05	217,29	53,76	

Il est possible de noter d'après les résultats ci-dessus que la variation de teneur en eau du sable a relativement peu d'effet sur le gain d'énergie entre les deux procédés. Celui-ci est en effet limité à l'énergie sauvée grâce à l'eau résiduelle non évaporée (somme toute limitée) et à un moindre chauffage des granulats. Par conséquent, plus il y a d'eau à évaporer, plus la somme des énergies rentrant en jeu est importante, plus le rapport gain/dépense totale d'énergie est réduit.

Quoiqu'il en soit, cette simulation donne une tendance globale de l'ordre de 20% de gain énergétique et une consommation pour la production à chaud de l'ordre de 265 MJ /t et tiède de 210 MJ /t. Ces résultats donnent, d'une part, des valeurs de consommation d'énergie surévaluées dans tous les cas par rapport à ce qui a été mesuré et, d'autre part, un gain relatif entre le procédé chaud et le procédé tiède inférieur à celui réellement observé.

Calcul théorique

Tout comme il a été possible de faire une simulation avec Gaïa à partir des mesures réelles, il est possible de calculer les consommations théoriques à l'aide du modèle parfait. Les paramètres utilisés pour ce calcul sont présentés à la figure 3.8. Les teneurs en eau des granulats ont été prises à 1,77%, afin de comparer les résultats aux résultats réels corrigés. Tout comme pour le cas des simulations à 1000 tonnes, l'eau résiduelle est évaluée à 0,3%

afin de porter le total à 0,6% avec l'eau de l'additif en solution. Le tableau 3.8 présente les résultats obtenus. Les valeurs grisées y détaillent les calculs d'énergie de vaporisation.

Température	Chaud	161°C	Teneur en eau	Chaud	1,77%	C _p eau	4180	J/kg.°C
	Tiède	118°C		Tiède	1,77%	L _{vap}	2260	kJ/kg
	Ambiante	20°C		Résiduel	0,30%	C _p granulats	800	J/kg.°C
Formule	Bitume	5,3%	Tonnage	Chaud	79,5 t			
	Granulats	94,7%		Tiède	126,9 t			

Figure 3.8 Paramètres du calcul théorique.

Tableau 3.8 Résultats du calcul théorique cas réel

	Unité	Tiède	Chaud	Différence	%
Énergie chauffage eau	MJ	711,3	445,6	-	-
	MJ/t	5,6	5,6	0,0	-
<i>Énergie vaporisation eau</i>	MJ	4807,2	3011,6	-	-
	MJ/t	37,9	37,9	0,0	-
<i>Énergie sauvée à la vaporisation de l'eau</i>	MJ	-814,8	0,0	-	-
	MJ/t	-6,4	0,0	-6,4	-
Total vaporisation	MJ	3992,4	3011,6	-	-
	MJ/t	31,5	37,9	-6,4	-16,95%
Énergie chauffage granulats	MJ	9421,7	8492,3	-	-
	MJ/t	74,2	106,8	-32,6	-30,50%
Total	MJ	14125,4	11949,5	-	-
	MJ/t	111,3	150,3	-39,0	-25,94%

Le gain potentiel obtenu à l'issue de cette simulation atteint approximativement 26%. Dans le cas présent, étant donné qu'il n'y a aucune perte, l'énergie nécessaire pour produire une tonne d'enrobé tiède atteint 111,3 MJ alors qu'il faut 150,3 MJ pour le même enrobé produit selon le procédé à chaud. Le modèle théorique permet de donner une idée de l'endroit où les gains sont réalisés, ce qui n'est pas possible par le biais des deux autres méthodes. Bien entendu, les résultats sont à interpréter à la lumière des hypothèses utilisées pour le

calcul. Mais pour une valeur donnée de teneur en eau il reste néanmoins possible d'estimer la part relative d'énergie consommée pour sécher les granulats et celle nécessaire à les faire monter en température par exemple.

Le graphique de la figure 3.9 et le tableau 3.9 présentent un résumé des résultats obtenus avec les trois méthodes d'évaluation utilisées. Sur le graphique ci-dessous, seules les valeurs donnant le plus fort gain ont été représentées.

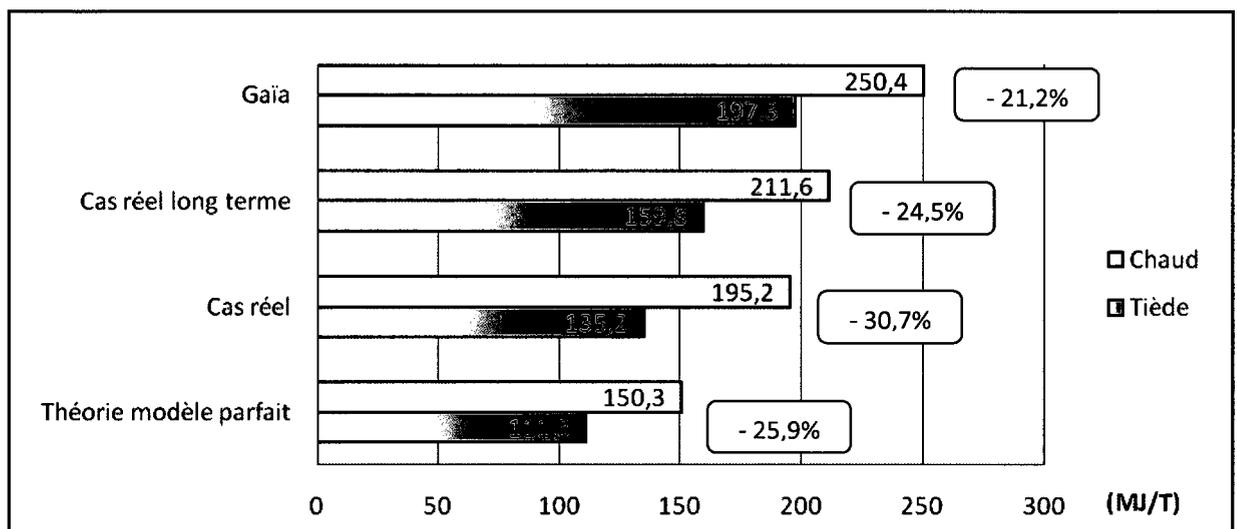


Figure 3.9 Comparaison des résultats obtenus de l'étude du cas réel.

Tableau 3.9 Résumé des gains bruts dans le cas réel

Méthode d'évaluation	Valeur minimale	Valeur maximale
Gaïa	-19,8%	-21,2%
Cas réel	-23,2%	-30,7%
Cas réel long terme	-24,5%	
Théorie	-25,9%	

Il est possible de constater que la tendance reste à peu de chose près la même en terme de gain relatif (%) d'un modèle de calcul à l'autre, ce qui permet de se faire une idée correcte du gain procuré par l'utilisation de l'additif. Toutefois, il faut noter le grand étalement des résultats en termes de valeur absolue, en particulier concernant ceux donnés par le logiciel

Gaïa vis-à-vis de ceux enregistrés dans la réalité. S'il est concevable qu'une bonne différence puisse exister entre la réalité et un modèle parfait, le logiciel éco-comparateur semble surévaluer assez largement les consommations et sous-estimer les gains qui y sont associés. Mais le logiciel étant avant tout un comparateur, il est préférable de retenir les variations existantes entre les résultats de chaque technologie plutôt que les valeurs absolues calculées pour chacune d'entre elle.

Aujourd'hui c'est sur la base de ces valeurs que les industriels communiquent afin de promouvoir les enrobés tièdes. Ils reflètent en effet une réalité, celle de la baisse de la consommation de leur brûleur de centrale, soit de façon plus pragmatique, le gain qui en découle sur leur facture de carburant. De la même façon, les émissions de gaz à effet de serre sont réduites à la sortie de la cheminée de façon plus ou moins proportionnelle. Malgré tout, ils ne reflètent pas tout à fait la réalité des choses, car ils ne concernent qu'une partie des installations industrielles et mettent de côté la fabrication de l'additif. Le chapitre 4 présente l'étude du procédé d'enrobage dans son ensemble.

Il faut noter l'efficacité particulièrement importante du dispositif d'enrobage utilisé. Le calcul du rapport énergie minimale requise sur l'énergie effectivement dépensée, soit la valeur calculée de façon théorique sur la valeur mesurée réellement donne :

- Pour l'enrobé tiède, comparativement à la réalité, une efficacité du brûleur de 82,3%,
- Pour l'enrobé chaud, une efficacité de 77%.

Cela prouve que la centrale étudiée, mise en route il y a moins d'un an, est particulièrement performante et que peu de pertes d'énergie y sont à déplorer.

3.3 Évaluation des gains nets en production

Les calculs précédents ne prenaient en compte que l'énergie utilisée pour sécher et chauffer les granulats, c'est-à-dire celle du brûleur uniquement. Or, dans une centrale d'enrobage, il faut également tenir compte de l'énergie consommée pour monter et maintenir le bitume en température. Cette énergie est consommée dans ce qui s'appelle le parc à liant. Dans ce parc, le bitume est toujours chauffé à la même température (dépendamment de son grade

PG) quel que soit le procédé utilisé, car sinon il ne serait pas assez fluide pour permettre un enrobage correct. Il faut en effet garder en mémoire que les technologies d'enrobage tiède consistent à garder une maniabilité et un enrobage correct de l'enrobé malgré une baisse de température du mélange. Le bitume lui ne peut supporter cette baisse de température. Ceci a pour conséquence qu'aucune réduction de consommation d'énergie ne peut être envisageable concernant ce poste de dépense en centrale.

Bien souvent, les gains en énergie obtenus à l'aide des procédés tièdes sont annoncés par les industriels sur la base de la consommation du brûleur, c'est-à-dire celle calculée précédemment. En effet, l'énergie dépensée pour chauffer le bitume étant la même pour les deux procédés, elle ne fait que réduire le gain relatif calculé précédemment. Afin de tenir compte de cette dépense énergétique et évaluer au mieux les gains réels, il en sera tenu compte dans cette partie. Là encore, il n'existe pas de valeur exacte pour déterminer la consommation d'un parc à liant, c'est pourquoi l'influence du chauffage du bitume sera déterminée en encadrant cette dépense énergétique par une estimation théorique et par la valeur utilisée par défaut dans le logiciel Gaïa.

- Gaïa considère qu'un parc à liant consomme 12,22 kWh par tonne d'enrobé quelle que soit la température d'enrobage, soit 44 MJ/t.
- L'évaluation théorique (sans aucune perte énergétique) considère que le bitume a une capacité calorifique $C_p \text{ Bitume} = 2090 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}$ (source : guide du bitume rhéologie, British Petroleum). Soit pour le cas présent où il faut chauffer le bitume de 20°C à 161°C avec une teneur en bitume de 5,3% dans l'enrobé, il faut compter 15,6 MJ par tonne d'enrobé.

D'autre part, la production industrielle de l'additif en lui-même génère une surconsommation d'énergie à imputer à la technologie tiède. En effet, les produits chimiques utilisés nécessitent de l'énergie pour être fabriqués et transportés. L'enrobé produit à chaud ne fait pas apparaître ces énergies supplémentaires dans son bilan énergétique, puisqu'il ne fait pas appel à ces additifs. Il faut noter que c'est alors la seule source de consommation d'énergie qui diffère entre le procédé chaud et le procédé tiède. En effet, les économies pouvant exister entre les deux technologies ne sont que des variations de consommations sur des postes communs et comparables. Bien que cela revienne à comptabiliser une

énergie de fabrication de matière première dans un bilan de production, en toute logique, afin de comparer un enrobé tiède avec son équivalent chaud, il faut malgré tout en tenir compte dans le bilan de production. Ceci aura pour effet de réduire le gain d'énergie encore une fois.

Le fabricant de l'additif n'a pas encore publié d'étude sur l'impact réel de ses produits. C'est pourquoi Eurovia, dans son logiciel Gaïa, se base sur une estimation de l'impact de l'Evotherm®, en considérant les valeurs disponibles pour les amines à usage industriel proche du principe actif de ce dernier. Ces valeurs sont issues d'une base de données suisse, Ecoinvent, et présentées au tableau 3.10.

Tableau 3.10 Energies de fabrication de l'additif

		Tensio-actif	Eau	Transport	Additif prêt à l'emploi en centrale	Additif prêt à l'emploi en centrale
	Unité	kg	kg	kg	kg	Tonne d'enrobé
Consommation de ressources énergétiques	MJ/unité	23	0,026	1,18	3,96	11,9

Les résultats obtenus dans cette section sont issus des valeurs obtenues dans la section précédente, c'est-à-dire pour le cas réel. Ces valeurs sont corrigées à l'aide des données explicitées ci-dessus.

3.3.1 Simulation Gaïa

Dans une optique de simplification, le cas étudié ci-dessous correspond au cas ayant obtenu les meilleurs résultats lors de la simulation précédente, à savoir le cas avec une teneur en eau de 1,77% pour la fraction 0/2 mm.

Les valeurs utilisées sont pour rappel en MJ par tonne d'enrobé produite :

- $P_{\text{max parc à liant}} = 44 \text{ MJ/t}$
 - $P_{\text{min parc à liant}} = 15,6 \text{ MJ/t}$
 - $P_{\text{supplémentaire Evotherm}} = 11,9 \text{ MJ/t}$
- } Soit $P_{\text{moy parc à liant}} = 29,8 \text{ MJ/t}$

Les résultats sont présentés au tableau 3.11.

Tableau 3.11 Consommation d'énergie totale d'après Gaïa

		Consommation en MJ/t			
		Chaud	Tiède	Différence	Gain %
Brûleur seul		250,4	197,3	-53,1	-21,2%
<i>Brûleur + parc à liant</i>	<i>Max</i>	294,4	241,3	-53,1	-18,0%
	<i>Min</i>	266	212,9	-53,1	-20,0%
<i>Brûleur + Additif</i>		250,4	209,2	-41,2	-16,5%
Procédé complet	<i>Max</i>	294,4	253,2	-41,2	-14,0%
	Min	266	224,8	-41,2	-15,5%
	Moy	280,2	239	-41,2	-14,7%

Pour information, le détail de l'influence relative de chaque énergie supplémentaire a été indiqué en caractères grisés afin de pouvoir les distinguer. Il apparaît alors que l'énergie de fabrication de l'additif fait chuter de manière importante le gain relatif gagné lors du séchage des granulats. De 21,2%, celui-ci passe à 16,5% si elle est comptée avec l'énergie du brûleur et entre 14 et 15,5% si l'on considère le procédé d'enrobage au complet (avec le chauffage du bitume). En moyenne, le gain se réduit à 14,7%. Au final, les valeurs à retenir afin de rester cohérent pour ce calcul sont celles dans les cases vertes, car obtenues à partir des valeurs de consommation d'énergie du parc à liant du logiciel.

3.3.2 Mesures réelles

Il a été vu qu'il existait deux façons d'interpréter les mesures effectuées en centrale. À savoir, tenir compte ou pas de la différence de teneur en eau existante entre les granulats utilisés pour le procédé tiède et ceux utilisés pour le procédé chaud. Les deux modes de calculs donnant des résultats assez différents, leurs valeurs respectives ont été utilisées

dans la suite. Les résultats pour les procédés d'enrobage complets sont présentés au tableau 3.12.

Il existe également une estimation de la consommation du brûleur faite sur la base d'une observation à long terme, comme cela a été vu précédemment. Il est possible d'effectuer le même calcul à partir de ces données, même si ces données incluent des arrêts de production, à savoir des phases où le brûleur fonctionne sans rien produire. Les résultats sont présentés au tableau 3.13.

Tableau 3.12 Consommation d'énergie totale d'après les mesures réelles

		Consommation en MJ/t						
		Chaud	Tiède		Différence		Gain %	
			Brute	Corrigée	Brute	Corrigée	Brute	Corrigée
Brûleur seul		195,2	149,9	135,2	-45,3	-60	-23,2%	-30,7%
<i>Brûleur + parc à liant</i>	Max	239,2	193,9	179,2	-45,3	-60	-18,9%	-25,1%
	Min	210,8	165,5	150,8	-45,3	-60	-21,5%	-28,5%
<i>Brûleur + Additif</i>		195,2	161,8	147,1	-33,4	-48,1	-17,1%	-24,6%
Procédé complet	Max	239,2	205,8	191,1	-33,4	-48,1	-14,0%	-20,1%
	Min	210,8	177,4	162,7	-33,4	-48,1	-15,8%	-22,8%
	Moy	225	191,6	176,9	-33,4	-48,1	14,9%	21,5%

Dans le cas présent, les gains s'échelonnent de 14% à 15,8%, soit 14,9% en moyenne si aucune correction n'est effectuée concernant la teneur en eau et de 20,1% à 22,8%, soit une moyenne de 21,5% si la correction de teneur en eau est appliquée. Les valeurs les plus plausibles dans le cas présent sont les valeurs « moyennes » à la dernière ligne du tableau (vert), car elles sont calculées en prenant pour valeur de consommation du parc à liant la moyenne entre la valeur de Gaïa (surestimée) et la valeur théorique (sous estimée).

Tableau 3.13 Consommation d'énergie totale d'après les mesures à long terme

		Consommation en MJ/t			
		Chaud	Tiède	Différence	Gain %
Brûleur seul		211,6	159,8	-51,8	-24,48%
<i>Brûleur + parc à liant</i>	Max	255,6	203,8	-51,8	-20,27%
	Min	227,2	175,4	-51,8	-22,80%
<i>Brûleur + Additif</i>		211,6	171,7	-39,9	-18,86%
Procédé complet	Max	255,6	215,7	-39,9	-15,61%
	Min	227,2	187,3	-39,9	-17,56%
	Moy	241,4	201,5	-39,9	-16,53%

Les résultats obtenus au tableau 3.13 illustrent la consommation réellement mesurée dans la centrale étudiée sur le long terme (4 jours de production tiède et deux mois de production chaude). Ils permettent donc une estimation plus juste de la réalité car ils tiennent compte des arrêts de production et lissent les effets perturbateurs des variations de teneur en eau des granulats. Il s'ensuit que le gain d'énergie se retrouve réduit à cause des périodes où le brûleur préchauffe le malaxeur sans rien produire. Il est toutefois supérieur aux valeurs obtenues sans correction de la teneur en eau, ce qui tend à prouver que ces dernières ne sont pas très vraisemblables. Ici aussi les valeurs à retenir sont plus vraisemblablement les valeurs obtenues avec une puissance moyenne du parc à liant (cases vertes).

3.3.3 Calcul théorique

Le même exercice a été mené avec les résultats du calcul théorique. Dans ce cas, la valeur de consommation d'énergie du parc à liant utilisée par Gaïa n'a pas vraiment de sens, mais elle est tout de même présentée au tableau 3.14.

Tableau 3.14 Consommation d'énergie totale d'après les mesures réelles

		Consommation en MJ/t			
		Chaud	Tiède	Différence	Gain %
Brûleur seul		150,3	111,3	-39	-25,9%
<i>Brûleur + parc à liant</i>	<i>Max</i>	194,3	155,3	-39	-20,1%
	<i>Min</i>	165,9	126,9	-39	-23,5%
<i>Brûleur + Additif</i>		150,3	123,2	-27,1	-18,0%
Procédé complet	Max	194,3	167,2	-27,1	-13,95%
	Min	165,9	138,8	-27,1	-16,34%
	Moy	180,1	153	-27,1	-15,05%

Les résultats donnent une valeur moyenne du gain de l'ordre 15%. Le résultat à retenir ici, comme indiqué au paragraphe précédent serait plutôt celui pour lequel l'énergie du parc à liant est calculée de façon théorique, soit le gain de 16,34%.

3.4 Exploitation des résultats

Le résumé des résultats obtenus dans la section précédente est présenté à la figure 3.10. Les valeurs retenues dans le graphique, afin de coller au mieux à chaque modèle sont respectivement :

- Pour Gaïa : celles calculées avec la valeur maximale de consommation d'énergie du parc à liant (44 MJ/t).
- Pour le cas théorique : celles calculées avec la valeur minimale de consommation du parc à liant (15,6 MJ/t).
- Pour le cas réel : celles calculées avec la moyenne des consommations d'énergie du parc à liant, soit 29,8 MJ /t.

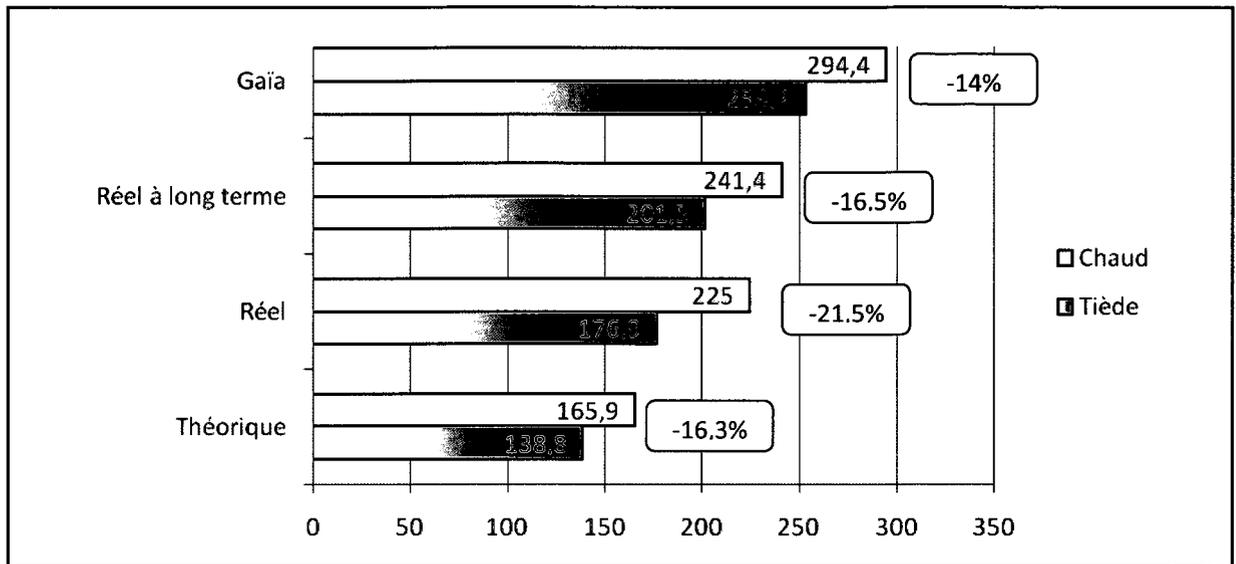


Figure 3.10 Résumé des résultats - Procédé d'enrobage complet.

Finalement, le gain obtenu lorsque toutes les sources consommatrices d'énergie ont été identifiées lors du procédé d'enrobage se situe entre 14 et 21,5 % dépendamment du mode de calcul utilisé. Ce gain représente l'économie procurée par l'utilisation de l'additif Evotherm® lors d'une fabrication tiède sur la consommation d'énergie qui serait faite en centrale pour produire le même enrobé à chaud, tout en tenant compte de la surconsommation induite par l'utilisation de l'additif. Objectivement, ce sont ces chiffres qui devraient être annoncés par les industriels lors de la promotion de cette technologie tiède, bien qu'ils soient moins vendeurs que ceux correspondant aux gains mesurés sur la consommation des brûleurs.

À partir des résultats obtenus pour le calcul théorique précédent, il est possible de représenter graphiquement la répartition des énergies consommées lors du processus d'enrobage, et de visualiser les gains obtenus grâce au recours au procédé tiède. Les figures 3.11, 3.12 et 3.13 montrent respectivement la répartition des consommations d'énergie pour le brûleur seul, le brûleur et le parc à liant et enfin le procédé d'enrobage au complet avec l'énergie de fabrication de l'additif. L'interprétation de ces anneaux se fait de la manière suivante :

- Un anneau complet (360°) représente la totalité de l'énergie mise en œuvre pour fabriquer une unité d'enrobé selon le procédé chaud classique, car c'est le procédé le plus énergivore.
- Les couleurs chaudes (segments de l'anneau attachés) représentent l'énergie mise en œuvre pour fabriquer la même unité d'enrobé selon le procédé tiède.
- Les segments de l'anneau éclatés (bleus) représentent les gains obtenus par le recours à une baisse de température grâce au procédé tiède relativement au procédé chaud.
- Dans le dernier graphique, le segment bleu à 7,2% représente la surconsommation d'énergie due à la fabrication de l'additif. Cette consommation n'existant que pour l'enrobé tiède, puisque le procédé chaud n'utilise pas d'additif, sa représentation sur un graphique comparatif est délicate. Il a été décidé arbitrairement de représenter ce segment comme s'il grevait le gain fait sur le chauffage des granulats. Ainsi, en comparant la figure 3.13 avec la figure 3.12, il est possible de retrouver la valeur de 19,6% de gain de chauffage des granulats de la figure 3.12 en faisant la somme du même gain de la figure 3.13 (12,4%) et de la surconsommation due à l'additif (7,2%). La somme des pourcentages des segments éclatés de la figure 3.13 est bien de 16,3%, c'est-à-dire égale au gain calculé au tableau 3.14 pour le cas théorique.

En se basant sur la similitude des résultats entre la méthode de calcul théorique et les résultats obtenus dans le cas réel à long terme, voire même pour le cas réel, il est possible d'extrapoler la répartition des consommations évaluée de façon théorique à ce qui se passe dans la réalité. Ces interprétations ne sont valables que si l'on considère que les pertes énergétiques qui s'ajoutent aux énergies calculées dans le modèle théorique sont réparties proportionnellement à chaque segment. Ainsi il est possible de constater comment chaque paramètre du procédé d'enrobage influe sur la consommation d'énergie.

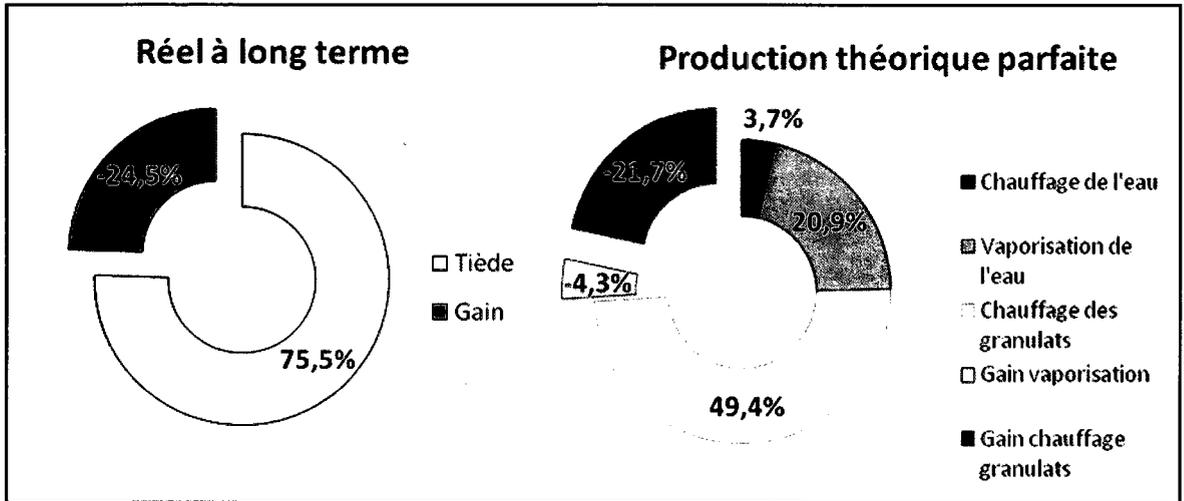


Figure 3.11 Répartition des consommations d'énergie - Brûleur seul.

Les graphiques de la figure 3.11 illustrent la part économisée par l'entreprise sur sa consommation de fioul/gaz dans le brûleur du malaxeur lors d'une fabrication d'enrobé tiède comparativement à un même enrobé chaud. Sur l'anneau de droite, la somme des gains atteint 26%, représentant les 25,94% calculés théoriquement aux erreurs d'arrondis près. Pour rappel, les gains estimés réellement étaient de 30,7% en corrigeant la teneur en eau et 24,5% sur le long terme (anneau de gauche).

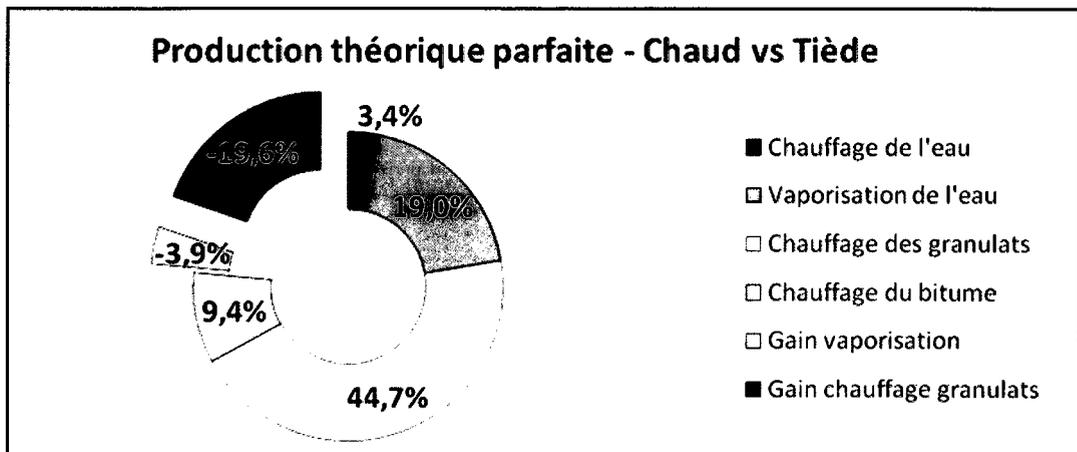


Figure 3.12 Répartition des consommations d'énergie brûleur + parc à liant.

Sur la figure 3.12, les gains représentés illustrent les gains totaux de l'entrepreneur sur sa facture d'énergie en centrale, quelle qu'en soit la source (fioul, gaz, électrique), puisqu'ils tiennent compte du chauffage préalable du bitume.

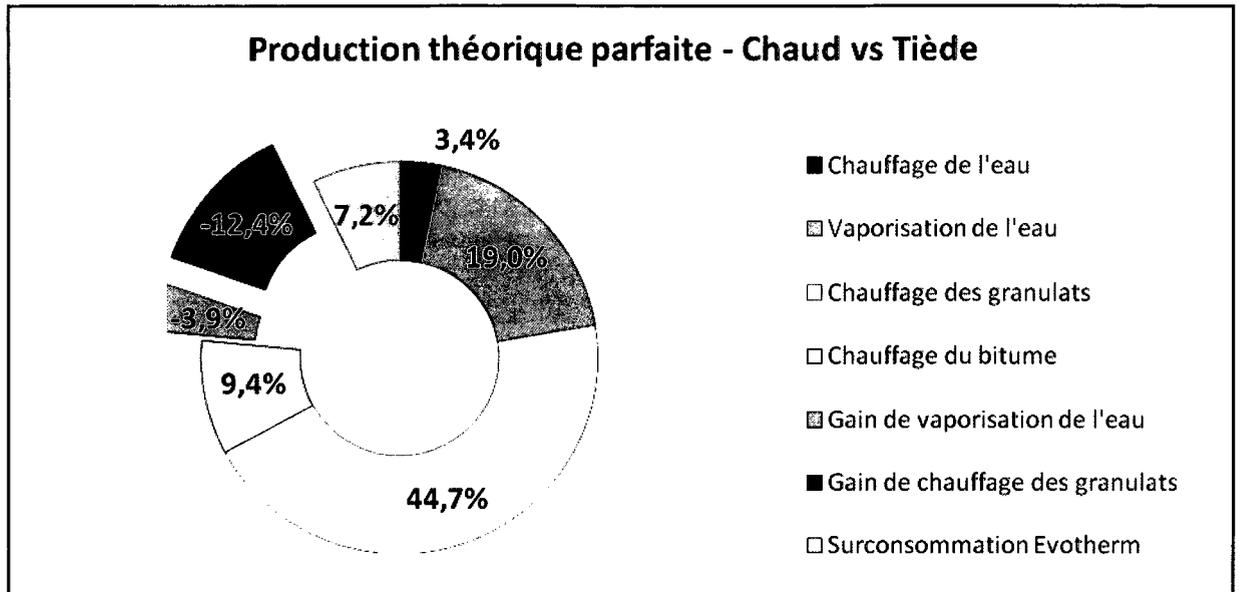


Figure 3.13 Répartition des consommations d'énergie procédé complet.

Enfin, l'anneau de la figure 3.13 illustre le gain d'énergie global qui résulte de l'utilisation d'Evotherm®. Cette valeur représente en quelque sorte les ressources naturelles en énergie qui ont été préservées sur les activités d'enrobage d'une centrale. C'est ce qui pourrait s'appeler le gain « environnemental ».

3.5 Activités de DJL au Québec

La firme DJL au Québec a entamé un processus d'expérimentation du procédé tiède Evotherm®. La centrale utilisée lors du chantier de Saint-André Avellin n'ayant pas été instrumentée, il n'y a pas eu de relevés de consommation d'énergie. Il n'a pas été possible pour des raisons diverses de procéder à d'autres mesures exploitables dans cette étude. Les résultats obtenus en France sont donc les seuls actuellement à être disponibles afin de comparer la technologie tiède à l'Evotherm® et le procédé classique à chaud.

3.6 Autres gains environnementaux

Les mesures d'émission à la sortie de cheminée réalisées sur la centrale du chantier pilote français de 2009 ont permis de vérifier que le recours aux enrobés tièdes faisait logiquement baisser la quantité de gaz à effet de serre émis, dans la mesure où ce procédé est moins énergivore ainsi que celle d'autres gaz, tels que ceux présentés dans la revue de littérature. Ces mesures (transformées par après en gramme par tonne d'enrobé pour tenir compte de l'allure de la centrale) ont été réalisées par un bureau de vérification indépendant d'Eurovia. Les résultats sont présentés au tableau 3.15.

Tableau 3.15 Émissions mesurées lors du chantier pilote

Paramètre	Unité	Valeurs mesurées		Différence	%
		Chaud	Tiède		
Dioxyde de carbone	kg/t	12,85	8,8	-4,05	-31,5%
Oxyde de soufre	g/t	12,32	0,05	-12,27	-99,6%
Oxyde d'azote	g/t	11,49	6,05	-5,44	-47,3%
Monoxyde de carbone	g/t	2,93	2,71	-0,220	-7,5%
COV non méthanique	g/t	1,285	2,847	1,562	121,5%

La réduction d'émission de CO₂ de 31,5 % concorde avec les gains d'énergie calculés précédemment. Les oxydes de soufre ont quasiment disparu et les oxydes d'azote ont vu leur quantité réduite de moitié. La seule augmentation observée concerne les COV. Cette augmentation peut s'expliquer entre autres par le fait que l'enrobé tiède produit un effet d'hydrodistillation quand l'additif en solution est introduit dans la ligne de bitume chaud. Les particules volatiles du bitume seraient alors plus facilement entraînées avec les vapeurs d'eau lors du processus d'enrobage. C'est pourquoi cette mesure en cheminée est plus forte pour le procédé tiède que le chaud. Il faut noter toutefois que ces valeurs sont très faibles et près de quatre fois inférieures au seuil de la réglementation française en vigueur.

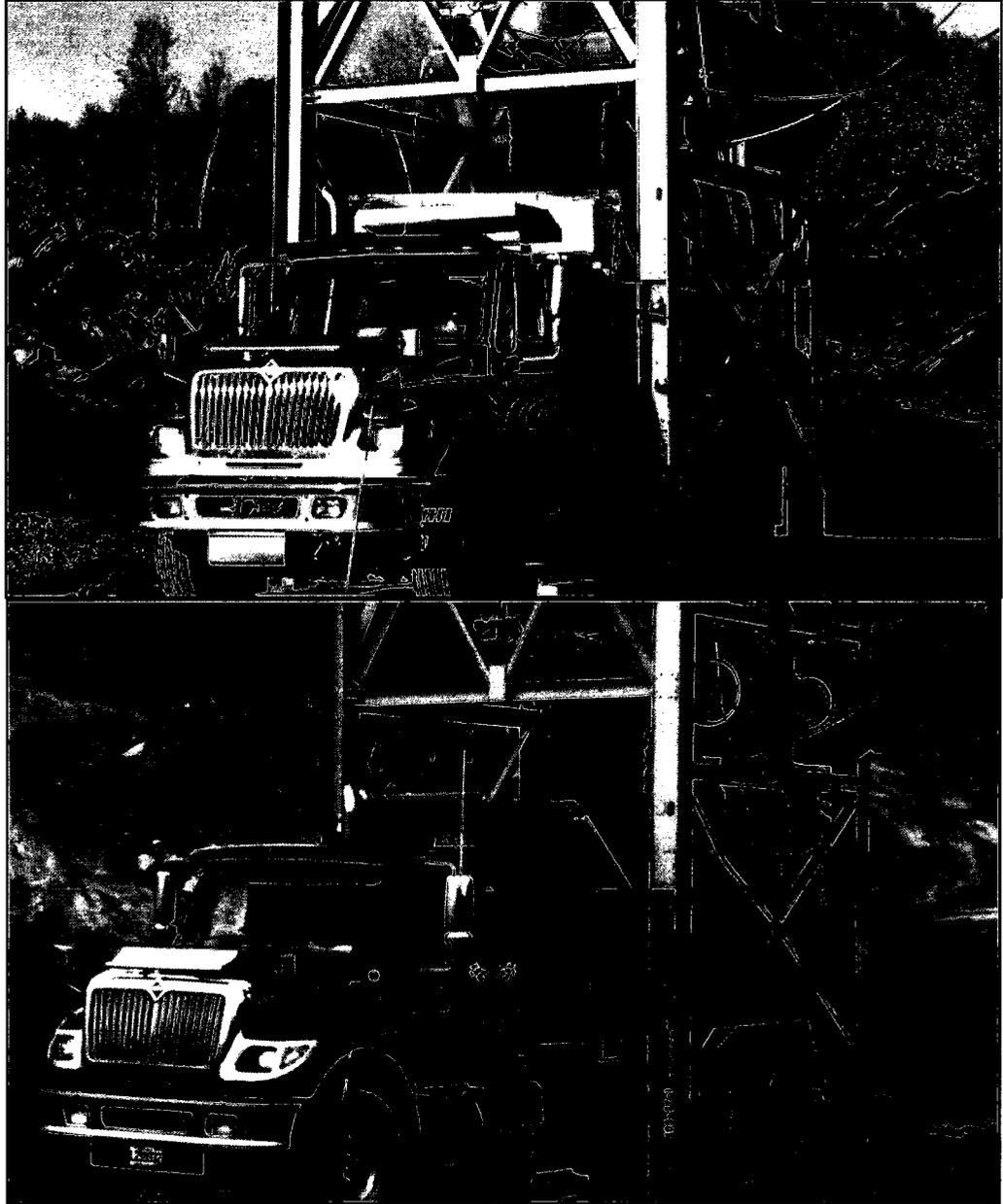
Le tableau 3.16 présente les résultats de la simulation Gaïa. Le logiciel ne calcule que les valeurs concernant le dioxyde de carbone (gaz à effet de serre) et les oxydes de soufre (responsables de l'acidification atmosphérique). La valeur obtenue concernant la réduction

des gaz à effet de serre correspond aux valeurs de réduction calculées pour la consommation d'énergie également, en étant encore une fois sous estimée par rapport à la réalité. Pour le CO₂, les valeurs sont calculées avec et sans l'impact supplémentaire de la production de l'additif. Les variations pour les oxydes de soufre sont négligeables.

Tableau 3.16 Émissions calculées par le logiciel Gaïa

Paramètre		Unité	Valeurs calculées		Différence	%
			Chaud	Tiède		
CO ₂	Sans impact additif	kg/t	11,883	9,015	-2,868	-24,1%
	Avec impact additif		11,883	9,472	-2,411	-20,3%
Oxyde de soufre		kg/t	0,102	0,079	-0,023	-23,1%

À titre d'illustration de la baisse des émissions, les deux photographies de la figure 3.14 montrent la différence existante entre le chargement d'un camion en enrobé chaud à 160°C (en haut) et tiède 120°C (en bas).



**Figure 3.14 Chargement d'enrobé
Saint-André Avellin, QC 15 octobre 2009.
Glen Philpott (2009)**

CHAPITRE 4

DISCUSSION

4.1 Essais en laboratoire

Comme cela a été vu dans le chapitre de présentation des essais de laboratoire, il n'est pas possible d'affirmer sur la base des résultats obtenus que les enrobés tièdes performant aussi bien que les enrobés chauds, malgré ce qui est affirmé régulièrement dans les brochures commerciales, voire dans la littérature. Les paragraphes qui suivent apportent quelques éléments d'interprétation de ces résultats.

4.1.1 PCG

En ce qui concerne l'aptitude à la maniabilité et au compactage des enrobés, mesuré à l'aide de la PCG, les résultats obtenus lors des essais en laboratoire n'ont pas montré d'inaptitude particulière lorsque la température était baissée de 50°C par rapport à la température recommandée à chaud. Il faut malgré tout prendre ces résultats avec précaution, car la PCG a la réputation d'être assez peu sensible à la température des mélanges.

Deux mélanges tièdes, ceux de l'usine de Saint-Bruno de Montarville, ont toutefois présenté un pourcentage de vides supérieur à la limite supérieure préconisée par la norme et à ceux de leur homologue chaud. Mais les mêmes mélanges à chauds avaient des valeurs égales à cette même limite, et un point supérieur à la valeur visée par la formule. La fraction grossière des granulats utilisés étant très anguleuse, il se peut que le mélange présente des difficultés de compactage. En effet, des analyses post compactage sur ces éprouvettes n'ont pas permis de mettre en évidence une différence flagrante ni dans la granulométrie ni dans le pourcentage de bitume utilisé par rapport à la formule initiale.

4.1.2 Désenrobage

Les résultats obtenus à partir de ce test de désenrobage sont sans appel, il n'y a aucun problème d'accrochage des bitumes sur les granulats utilisés dans les enrobés. Les enrobages au bitume modifié à l'Evotherm® sont quasiment parfaits après 24h d'agitation des granulats dans l'eau.

4.1.3 Tenue à l'eau

Tous les résultats obtenus à l'issue de l'essai de tenue à l'eau, propre au Québec, ont montré, d'une part, que les mélanges tièdes avaient un ratio illustrant leur sensibilité aux dégâts causés par l'eau inférieur à celui des mélanges chauds. Pour rappel, ce ratio se calcule comme le rapport de la résistance des éprouvettes conditionnées vingt-quatre heures dans l'eau sur celle des éprouvettes témoins trempées trente minutes. D'autre part, les valeurs de résistance en elles-mêmes chutaient de façon importante, jusqu'à 55% dans certains cas, relativement à celles des mélanges chauds mis dans les mêmes conditions.

Ainsi, seuls deux mélanges tièdes passent officiellement ce test (voire trois selon l'interprétation), alors que tous les mélanges chauds respectent les exigences requises. De ces résultats il est possible de tirer deux observations. Premièrement, l'inquiétude selon laquelle ces mélanges tièdes à base d'additif en solution aqueuse sont plus vulnérables à l'eau semble se confirmer. Deuxièmement, ces mélanges sont beaucoup plus ductiles que leurs équivalents chauds.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces pertes de performance. Tout d'abord, si l'enrobé tiède contient un peu d'eau résiduelle, elle provient uniquement de l'additif, car les conditions d'expérimentation en laboratoire font que les granulats sont complètement secs lors du malaxage. Cette eau, bien que présente en faible quantité, tendrait à diminuer le module résilient du bitume qui assure la cohésion de l'enrobé. En effet, le mécanisme qui permet entre autre un enrobage aisé des granulats par effet d'émulsion (dispersion de microgouttelettes d'eau dans le bitume), fait que le bitume, s'il contient encore de l'eau après le compactage du mélange, va présenter un caractère moins visqueux. Le laboratoire d'Eurovia en France avance une perte de 15 à 20 % sur le module du bitume modifié. Ce

phénomène pourrait être identique à celui observé avec les émulsions de bitume, qui nécessitent un temps de cure avant d'atteindre leur degré de performance optimale.

Les tests de désenrobage ainsi que les observations après l'écrasement des éprouvettes n'ont pas montré une tendance particulière du bitume à se décrocher des granulats, bien au contraire. La raison de la perte de performance est donc à chercher ailleurs. En tout état de cause, il est certain que l'interface granulat/bitume est perturbée lors de la fabrication d'un mélange tiède. Car malgré l'usage de tensio-actifs permettant une meilleure adhésion du bitume à des granulats près de 50°C plus froids, le bitume, du moins sa fraction la plus légère, ne peut en toute rigueur pénétrer et diffuser aussi bien dans les pores des granulats que dans le cas d'un enrobé chaud. Dans le cas d'une pareille hypothèse, même si le bitume ne se décolle pas des granulats, la cohésion qu'il assure doit s'en trouver affectée. De plus, sa température plus basse fait que le bitume de l'enrobé tiède a en outre tendance à moins perdre ses constituants légers. Qualitativement, l'odeur plus forte qui se dégage des mélanges chauds tend à le prouver lors des manipulations. Il en résulte que le bitume effectif de l'enrobé tiède (celui entre les granulats, qui assure le collage par opposition au bitume absorbé) contiendrait alors proportionnellement plus de maltènes que d'asphaltènes et serait donc plus mou que celui de l'enrobé chaud pour un même bitume à l'origine. Toutes ces causes peuvent expliquer la baisse de résistance observée.

En ce qui concerne la baisse de ratio, il se peut que les agents tensio-actifs de l'additif, couplés à l'eau résiduelle fassent qu'au jeune âge, l'enrobé tiède soumis aux agressions de l'eau et en comportant lui-même un peu, dégradent le comportement du bitume, d'où un ratio abaissé. Il est toutefois hasardeux dans l'état actuel des connaissances et à la simple lecture des résultats d'avancer une explication sûre concernant d'une part la baisse de ratio et de l'autre la baisse de module. Ces phénomènes sont dus à diverses causes dont les effets s'accumulent (voire peut-être s'annulent), et les deux phénomènes observés ne sont pas forcément indépendants.

Il convient malgré tout de souligner que deux mélanges passent le test et un troisième atteint un ratio de 69,24% pour une limite à 70%, ce qui n'est pas non plus catastrophique.

4.1.4 TSR

Les résultats du test américain TSR concernant la sensibilité aux dégâts dus à l'humidité donnent paradoxalement de meilleurs résultats que le test de tenue à l'eau, car bien que plus sévère, les mélanges tièdes le passent presque tous sans exception. Le seul mélange posant souci étant le mélange de Saint-Bruno de Montarville contenant des fraisats recyclés car son ratio atteint 78,6% au lieu des 80% exigés.

Les pertes de résistance sont également proportionnellement moins importantes entre les deux procédés que lors du test précédent. Une explication de cette observation peut venir du fait que les éprouvettes sont fabriquées à la PCG pour le test américain et au marteau Marshall pour le test québécois, ce dernier étant réputé plus sensible aux variations de températures pour l'obtention d'une bonne compaction. Le procédé de compactage Marshall impose un certain nombre de coups à donner sur l'éprouvette, alors que le procédé PCG impose une hauteur à atteindre. Le compactage PCG permet donc de fournir autant d'énergie que nécessaire alors que le procédé Marshall fournit une énergie équivalente quel que soit l'enrobé étudié.

D'autre part, les temps de cure imposés par le protocole expérimental semblent bénéficier aux enrobés tièdes, comme s'ils gagnaient toute proportion gardée plus de résistance que les enrobés chauds. Ceci rejoint les commentaires précédents concernant la nécessité d'une cure pour les enrobés à l'Evotherm® du moins tels qu'ils sont préparés en laboratoire.

4.1.5 Orniérage

Le test d'orniérage a été mené afin de vérifier si l'enrobé tiède présentait une tendance à recouvrir ses propriétés de maniabilité accrue, et donc à se déformer à la longue en fatigue sous les charges roulantes des véhicules lorsqu'il était soumis à des températures élevées, proches de celles auxquelles il a été compacté. Les résultats n'ont mis en évidence aucune tendance de la sorte. Mais il faudrait certainement explorer plus en profondeur ce problème auquel actuellement personne n'apporte de réponse satisfaisante, que ce soit le fabricant de l'additif ou les revendeurs du produit. Car le test a été mené de façon exploratoire et qualitative plutôt que d'utiliser un test dédié (qui a priori n'existe pas) et quantitatif.

Pour des raisons de temps, d'autres essais d'orniérage n'ont pas été possibles. La question de la tenue aux hautes températures estivales reste donc en suspens. Pour y répondre de façon plus objective et rationnelle, il faudrait, d'une part, développer des essais spécifiques à ce problème pour les enrobés tièdes et, d'autre part, en tirer de nombreux résultats à différentes températures afin de mieux cerner le comportement des enrobés tièdes soumis à de hautes températures de service. Au moment de cette étude, ceci était impossible.

4.2 Simulations énergétiques

Les économies d'énergies permises par les enrobés à base d'Evotherm® sont bien réelles. Les mesures in situ et les simulations le démontrent. Il convient malgré tout de rappeler quelques notions.

Les simulations, comme les essais en laboratoire et le chantier pilote d'où sont issues les valeurs mesurées ont été obtenues avec des baisses de températures d'au moins 40°C (43°C au chantier et 50°C au laboratoire). Il va de soi que si la température des mélanges tièdes n'est pas maintenue assez basse, il y aura une valeur de température à partir de laquelle le procédé tiède sera globalement plus énergivore que le procédé chaud, même s'il est fabriqué à une température plus basse. Car non seulement, plus la température augmente, moins il y a d'eau résiduelle dans le mélange, ce qui signifie plus d'énergie à fournir en plus du chauffage supplémentaire, mais surtout, le gain potentiel apporté par une température plus basse se retrouvera moins important que l'énergie nécessaire à la fabrication de l'additif.

L'Evotherm®, bien que son fabricant n'ait pas divulgué à l'heure actuelle le bilan énergétique de sa fabrication, ne présente pas, si l'on se base sur celui de produits similaires, de surplus de consommation de nature à rendre l'enrobé tiède plus polluant que le même enrobé chaud, si les conditions d'utilisation sont cohérentes. Le doute est permis concernant d'autres types d'additifs (non étudiés ici), qui donnaient des gains bruts plus faibles au départ et qui de plus nécessitaient plus d'énergie à fabriquer. Ce doute est aujourd'hui levé pour l'Evotherm® DAT H5.

Concernant le niveau de performance énergétique que procure cet additif, il paraît bien exagéré dans la littérature et dans les documents commerciaux. En effet, comme indiqué dans la revue de littérature, le gain annoncé dans ces documents est compris entre 35% et 55%. À aucun moment il n'a été possible de retrouver ces valeurs, même en focalisant l'étude sur le brûleur uniquement, là où sont réalisées les économies. Lorsque seul le brûleur était considéré, la valeur maximale mesurée était de 30,7%, et plus certainement avoisinant une valeur entre 25 et 30% dans des conditions de fabrication optimales. Comme cela a été vu, cette baisse ne reflète pas réellement le gain de production du procédé, puisque certains postes de dépenses sont volontairement mis de côté. Il est plus vraisemblable que le gain de fabrication effectif pour l'environnement se situe autour des 16% pour ce chantier en particulier, lorsque l'on compte le chauffage du bitume, la fabrication et le transport de l'additif. Ce qui reste soit dit en passant un gain appréciable. La généralisation d'un tel résultat à d'autres centrales pour des conditions de fabrication similaires ne semble pas farfelu étant donnée la cohérence des résultats des simulations et des mesures in situ. Ainsi au Québec, il devrait être possible de réduire le recours aux ressources énergétiques dans les mêmes proportions pour les chantiers de la province. Bien entendu c'est une valeur moins intéressante commercialement parlant, mais il serait incongru de croire que les autres procédés existants soient aussi bons qu'ils le promettent.

La baisse de température annoncée étant de 45°C à 60°C, les essais ont été menés à -50°C, température visée par DJL pour ses chantiers à venir. À la lecture des résultats d'essai en laboratoire, une baisse supplémentaire de 10°C pourrait devenir problématique pour certains mélanges en ce qui concerne la validation des exigences des normes, bien que procurant un gain d'énergie supplémentaire. C'est aussi tout le défi des enrobés tièdes, à savoir trouver un compromis entre la baisse de consommation (en centrale du point de vue de la firme de construction, et globale du point de vue environnemental) et le maintien de performance acceptable de la chaussée. Car si la chaussée dure moins longtemps, et qu'il devient nécessaire de la réparer plus fréquemment, à terme le bilan risque d'être défavorable.

Il faut aussi avoir à l'esprit qu'afin de tirer un maximum de profit des enrobés tièdes, ils doivent être utilisés sur des chantiers de tonnage relativement importants. Car dans le cas d'une centrale qui ne ferait que de « l'épicerie », soit des petites productions sans y être

adaptée (telle que celles du type tambours sècheurs-enrobeurs) les pertes à la mise en route anéantiraient les gains attendus.

C'est pourquoi, le type de centrale utilisée a tout intérêt à être bien adapté à la production requise, et il faudra certainement veiller à en tenir compte dans le futur si les technologies tièdes tendent à se généraliser. Au sujet des centrales, il a été vu que celle étudiée était particulièrement performante comparativement à la théorie alors que Gaïa donnait des résultats moins bons. Les gains absolus qu'il est possible d'obtenir en maîtrisant les pertes dans une centrale semblent être au moins aussi importants qu'entre le procédé chaud et le procédé tiède. Il suffit de comparer les énergies mesurées sur la centrale récente et performante à ceux de Gaïa, représentatifs d'une centrale moyenne. La question qui se pose alors revient à se demander s'il ne vaudrait pas mieux veiller à acquérir une bonne efficacité des centrales que de modifier les produits qui en sortent. Mais cela touche à des considérations qui dépassent le cadre de cette étude.

4.3 Impact environnemental

La moindre consommation de carburant du procédé tiède implique de fait une réduction des émissions gazeuses et particulaires. Cela se vérifie par les mesures effectuées en centrale et par le logiciel de simulation Gaïa. Globalement, le pourcentage d'émission de gaz à effet de serre suit à peu près la valeur de baisse de consommation d'énergie en centrale. Il ne faut toutefois pas oublier dans ce cas aussi que la fabrication de l'additif et son transport émettent aussi du CO₂.

À l'échelle de l'industrie de la construction routière, les quelques 20 à 30% d'émission de gaz à effet de serre ainsi économisés représentent au final une quantité importante. En 2005, le MTQ a annoncé avoir utilisé 2 732 000 tonnes d'enrobés au Québec. Si la fourchette d'économie se situe entre 2,4 et 4 kg de CO₂ par tonne, il serait théoriquement possible de sauver entre 6 500 et 11 000 tonnes d'émission de CO₂ par an dans cette seule province.

Concernant les autres types d'émission, les résultats mesurés recourent les observations faites dans la revue de littérature. Seules les émissions de COV ont montré des variations

surprenantes, mais explicables. Le recours aux enrobés à l'Evotherm® est malgré tout bénéfique à l'environnement, leur bilan écologique montrant des réductions des principaux polluants montrés du doigt aujourd'hui.

4.4 Observations diverses

Au cours des manipulations en laboratoire comme en chantier lors de son application, il est flagrant de constater à quel point l'enrobé tiède améliore les conditions de travail. Le mélange ne colle presque pas aux outillages et sent beaucoup moins fort que les mélanges chauds. Toutefois, notamment à Saint-André Avellin lors du chantier pilote de DJL en octobre 2009, des nuances ont été apportées par les râteleurs, soit les personnes qui répandent l'enrobé au râteau pour les finitions derrière le finisseur, concernant la maniabilité du produit, qui n'est pas aussi bonne que celle du même mélange chaud.

Au niveau des performances de l'enrobé, il existe de réelles interrogations quant à la pertinence des essais en laboratoire tels qu'ils sont menés aujourd'hui. En effet, bien souvent avec les enrobés tièdes, les mélanges fournissent de piètres performances en laboratoire, alors que fabriqués en condition réelle ils ne présentent pas le caractère prononcé des défauts de laboratoire. Cela s'explique entre autres par le fait que les normes utilisées pour tester les mélanges tièdes sont des normes pour enrobés chauds, et que rien n'est encore prévu pour tester spécifiquement les enrobés tièdes, en tenant compte de leurs particularités physico-chimiques, en particulier la maîtrise de leur teneur en eau résiduelle. Aussi, les méthodes de préparation des matériaux en laboratoire diffèrent beaucoup des conditions réelles. Car si en laboratoire les matériaux sont chauffés et séchés uniformément et à cœur en étuve, en centrale, les granulats subissent plutôt un choc thermique extrême au contact d'une flamme à plusieurs centaines de degrés et n'ont pas forcément la même température en surface et au cœur au moment où ils rentrent en contact avec le bitume. Ainsi, il se pourrait que, si en moyenne la température des granulats est la même en laboratoire et en centrale, la température en surface soit plus élevée en centrale qu'en laboratoire, d'où une interaction granulat/bitume différente, et des comportements différents de l'enrobé. C'est pourquoi des essais comparatifs de module résilient sont en cours sur le mélange de Saint-André Avellin fabriqué en laboratoire et des échantillons carottés sur la route 323.

CONCLUSION

L'objectif de cette étude était de déterminer de manière précise et objective les gains énergétiques réels de des enrobés tièdes comparativement à ce que l'industrie et la littérature avancent. À travers une série d'essais en laboratoire, de simulations et une comparaison avec des mesures sur le terrain, l'étude a permis de mettre en lumière les caractéristiques techniques et les gains environnementaux qu'il est possible d'attendre des enrobés tièdes à base d'Evotherm® quand ils sont fabriqués 50°C en dessous de la température normale.

Il est apparu que concernant les performances techniques en laboratoire, les enrobés tièdes fabriqués donnent des résultats dans la majorité des cas inférieurs à ce que montrent les enrobés fabriqués à chaud. Cependant, il ne faut pas occulter le fait que la plupart des mélanges étudiés répondent parfaitement aux exigences des différentes normes selon lesquelles ils ont été testés. D'ailleurs, en chantier, ils semblent performer de la même façon que les enrobés chauds. Il en découle que si les protocoles de fabrication et d'essai utilisés en laboratoire pour tester les enrobés chauds sont représentatifs de leur comportement dans la réalité, cela ne semble pas être le cas pour les enrobés tièdes à l'heure actuelle. De nouveaux protocoles expérimentaux et de nouvelles normes sont sans doute nécessaires pour caractériser au mieux en laboratoire ces enrobés nouveaux, que ce soit au niveau de leur fabrication ou de leurs propriétés mécaniques. Des recherches sont toujours en cours afin de caractériser au mieux ces matériaux somme toute récents, et dont les technologies de fabrication évoluent rapidement. Les principaux problèmes soulevés par les résultats obtenus sont une baisse de module, donc de résistance des mélanges tièdes, et une sensibilité plus marquée aux dommages causés par l'humidité, malgré de très bonnes performances aux tests de désenrobage et peu de dommages visuels rapportés lors des essais de tenue aux dégâts de l'eau.

Les conséquences résultant de la mise en service de chaussées dont l'enrobé présente une sensibilité certaine aux dommages causés par l'eau et un faible module, même si cela ne concerne que la couche de surface, peuvent être sérieuses. En effet, si la couche de surface se dégrade rapidement, elle altère le confort des usagers, mais surtout elle met en

péril la structure même de la chaussée en permettant, par exemple, des infiltrations d'eau au cœur de l'ouvrage. À la longue, ces infiltrations si elles sont trop sévères risquent de causer la ruine de la chaussée en affaiblissant les fondations. De même, l'utilisation de matériaux moins rigides, comme le cas des enrobés tièdes de laboratoire, dans les couches inférieures entraînerait des performances nettement moindres en terme de durée de vie de la chaussée.

Beaucoup d'interprétations de ces phénomènes liés à la sensibilité à l'humidité sont possibles. Il faudrait isoler les causes potentielles de ces baisses de performance de manière plus précise. L'influence de l'eau résiduelle en particulier et la nécessité potentielle d'un temps de cure, au moins en laboratoire, sont des pistes qu'il faudrait explorer. Une étude des différences entre les phénomènes intervenant lors de l'enrobage en centrale et en laboratoire pourrait permettre également de mieux cerner les doutes qui planent aujourd'hui à propos des différences de comportement observées. Car il reste hasardeux de juger de la performance des enrobés tièdes sur la base d'essais qui ne représentent pas la réalité de leurs capacités.

Cela pose un problème vis-à-vis de leur image et de l'opinion que peuvent se faire les donneurs d'ouvrage concernant ces produits. En effet, les entreprises proposant ces enrobés ne sont pas en mesure de prouver leur exacte équivalence avec les enrobés chauds, d'après les normes en vigueur et les résultats de laboratoire qui y sont associés. Comment alors inciter à investir dans un enrobé écologique, s'il ne dure pas aussi longtemps sur papier ? D'autant plus que ces enrobés présentent un surcoût de l'ordre de 3 à 5 %. Maintenant que les performances écologiques sont vérifiées, tout le défi des années à venir consistera à élaborer des essais permettant de mesurer réellement les performances mécaniques de ces enrobés. Une fois que les retours d'expériences en terme de durée de vie seront assez fournis, il risque de s'avérer nécessaire d'effectuer des analyses plus poussées concernant les cycles de vie globaux des chaussées faites d'enrobés tièdes. C'est-à-dire concernant les fréquences de rénovations souhaitables, dans le cas où les enrobés tièdes n'aient pas les mêmes durées de vie que les enrobés conventionnels. Car si finalement les phases de rénovations des chaussées se doivent d'être plus rapprochées, alors peut être que ces enrobés « écologiques » ne le seront plus à long terme.

En ce qui concerne le bilan environnemental pour une production d'enrobés tièdes à l'Evotherm®, il est apparu que les gains obtenus étaient d'une part théoriquement justifiés et d'autre part biens réels en chantier. Les simulations ont permis de mieux modéliser les sources d'économie d'énergie, ainsi que de tenir compte de toutes les dépenses d'énergie rentrant en compte dans la fabrication de ces enrobés « verts ». Ainsi, d'une part, les entrepreneurs fabricant des enrobés tièdes réduisent leur consommation d'énergie fossile, et réduisent également leurs rejets de gaz à effet de serre, et d'autres gaz nocifs pour l'environnement. Toutefois, les gains calculés (aux alentours de 16 % pour les paramètres retenus) ont permis de relativiser les chiffres qui sont annoncés sur les documents commerciaux. Les énergies annexes telles que celles nécessaires à la fabrication des additifs ne sont pas négligeables, lorsque le bilan énergétique global est dressé et, si les enrobés à l'Evotherm® ont effectivement un bilan positif, dépendamment de leurs conditions de fabrication, il n'est pas certain qu'il en soit de même pour tous les autres.

Un des objectifs de cette recherche, qui était de quantifier les bénéfices du point de vue de la santé n'a par contre pas pu être effectué. Peu de données sont effectivement disponibles, et les mesures dans ce domaine sont délicates à effectuer. Malgré tout, comme cela a été constaté en chantier, les conditions de travail sont améliorées par la baisse de température ressentie par les ouvriers et la quasi absence d'odeur, phénomène constaté en laboratoire également.

Aujourd'hui, les enrobés tièdes produits par la firme DJL sont donc en mesure d'être appliqués en chantier en respectant les normes du Québec et en préservant l'environnement et les ressources énergétiques. Il reste dorénavant à convaincre et persuader les donneurs d'ouvrages que ces matériaux méritent d'être utilisés à plus grande échelle afin d'en réduire les coûts de fabrication. Car si des économies financières sont réalisables grâce aux réductions des consommations d'énergie, ces enrobés écologiques, comme toute nouveauté et innovation coûtent encore un peu plus cher que les produits classiques. Des économies d'échelle sont nécessaires afin de rentabiliser les investissements, mais surtout pour rendre viable le procédé d'un point de vue environnemental tel que cela a été discuté.

ANNEXE I

Mesure du point de ramollissement bille-anneau

L'essai de mesure du point de ramollissement bille-anneau consiste à placer une bille de 3,5 g et 9,5 mm de diamètre sur un disque de bitume qui a été coulé auparavant dans un anneau de 19,8 mm de diamètre intérieur, et à mesurer son temps de chute jusqu'à une plaque située 25,4 mm sous la face inférieure du disque de bitume. Le tout se fait dans un bain d'eau thermostaté (figure A1-1).

La température initiale du bain est maintenue à 5°C, puis dès que le test commence, elle augmente régulièrement de 5°C par minute. Le point de ramollissement bille-anneau correspond à la température à laquelle le bitume touche la plaque.

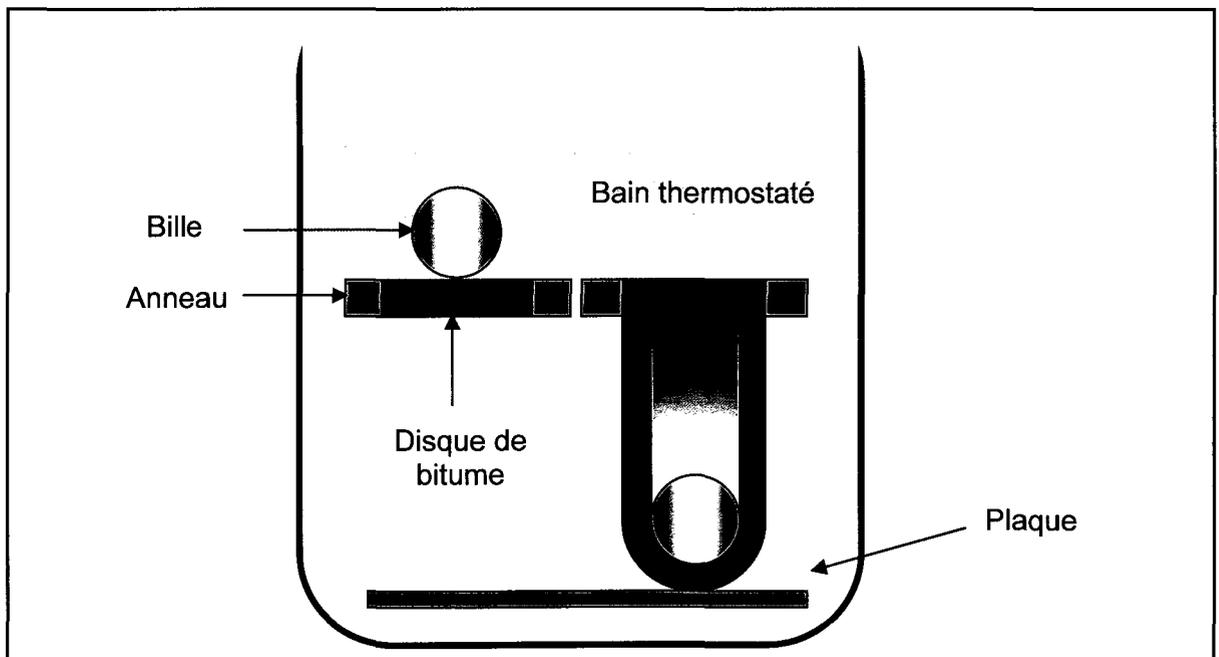


Figure-A I-1 Dispositif expérimental de mesure du point de ramollissement bille-anneau.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Billard, Jean. « Abrégé d'histoire des routes ». En ligne. 11 pages.
<http://www.lcpc.fr/fr/sources/hist_routes/hr_09.dml>. Consulté le 13 novembre 2009.
- Binet, S., A. Pfohl-Leszkowicz, H. Brandt, M. Lafontaine et M. Castegnaro. 2002. « Bitumen fumes: review of work on the potential risk to workers and the present knowledge on its origin ». *The Science of the Total Environment*, n° 300, pages 37-49.
- Bitume Info. 2005. «Les archives de Bitume.info». In
<http://www.bitume.info/imports/pdf_mag_archives/Bitume_info_HS_juin_2005.pdf>.
En ligne. Consulté le 23 mars 2010.
- Brandt, H.C.A et P.C. de Groot. 1999. «A laboratory rig for studying aspect of worker exposure to bitumen fumes». *American Industrial Hygiene Association Journal*, n°60, pages 182-190.
- British Petroleum. «Guide du bitume : rhéologie». In
<http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/bitumen/bp_bitumen_france/STAGING/local_assets/downloads_pdfs/g/guide_du_bitume_rheologie_fr.pdf>. 8 pages. Consulté le 16 mars 2010.
- Brosseaud, Yves et Michèle St-Jacques. 2007. « Les enrobés de demain se feront-ils autrement : État du développement des enrobés tièdes en France ». In 23e Congrès mondial de la route. AIPCR, Paris, France, 21-27 septembre 2007.
- Corrigan, Matthew. 2008. «Warm mix asphalt technologies and research». In
<<http://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/wma.cfm>> 8 pages. Consulté le 25 mai 2009.
- D'Angelo, John, Eric Harm, John Bartoszek, Gaylon Baumgardner, Matthew Corrigan, Jack Cowser, Thomas Harman, Mostafa Jamshidi, Wayne Jones, Dave Newcomb, Brian Prowell, Ron Sines et Bruce Yeaton. 2008. *Warm-Mix Asphalt: European Practice*. « International Technology Scanning Program », FHWA-PL-08-007. Alexandria (VA) : American Trade Initiatives, 68 p.
- Davidson, J. Keith. 2005. a. «EVOTHERM TRIAL : AURORA ONTARIO, August 8 2005 ». En ligne. 16 p.
<<http://www.meadwestvaco.com/mwv/groups/content/documents/document/mwv002757.pdf>>. Consulté le 3 décembre 2009.
- Davidson, J. Keith. 2005. b. «EVOTHERM TRIAL : RAMARA TOWNSHIP ROAD 46, OCTOBER 4,5 2005». En ligne. 15 p.
<<http://us.meadwestvaco.com/mwv/groups/content/documents/document/mwv003427.pdf>>. Consulté le 3 décembre 2009.

- Davidson, J. Keith. 2005. c. «EVOTHERM TRIAL : City of Calgary, September 28 2005». En ligne. 12 p.
<<http://www.meadwestvaco.com/mwv/groups/content/documents/document/mwv004317.pdf>> Consulté le 3 décembre 2009.
- Documentation technico-commerciale Shell Bitumes. In <http://www-static.shell.com/static/fra/downloads/bitumen/products_wam_commercial_documentation.pdf> En ligne. Consulté le 20 avril 2010.
- Documentation technico-commerciale Eurovia. «Gamme d'enrobés tièdes TEMPERA®». En ligne. <http://www.eurovia.fr/EuroviaMedia/m2/10/1047-1fr.fichetempera_bd.pdf> Consulté le 19 août 2009.
- Documentation technico-commerciale Eurovia. «Gamme d'enrobés tièdes TEMPERA® : EVOTHERM® DAT». En ligne. <http://www.eurovia.fr/EuroviaMedia/m2/10/1034-1fr.ficheevotherm_bd.pdf> Consulté le 19 août 2009.
- Documentation technico-commerciale Eurovia. «Gamme d'enrobés tièdes TEMPERA® : ASPHA-MIN®». En ligne. <http://www.eurovia.fr/EuroviaMedia/m2/10/1030-1fr.ficheaspha_min_bd.pdf> Consulté le 19 août 2009.
- Dorchies, Pierre. 2003. Présentation Visuelle «Tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur le bitume, et que vous n'avez jamais osé demander». Journée Bitume Québec 2003. In <http://www.bitumequebec.ca/assets/application/events/files/fcff6ca5ce422b3_file.pdf> En ligne. Consulté le 10 septembre 2009.
- EAPA, 2009. « The use of Warm Mix Asphalt : EAPA Position Paper ». En ligne. 12 p. <http://www.eapa.org/START/positionprs_publications/papers/The_use_of_Warm_Mix_Aspphalt_June_2009.pdf>. Consulté le 4 sept 2009.
- Eurovia. Juin 2007. « Méthodologie et Sources de Gaïa ». 18 pages.
- Eurovia. 2009. « Présentation de la gamme TEMPERA® ». Diapositives Powerpoint. 12 pages.
- Eurovia Management. «Indicateurs du procédé Evotherm DAT». Document interne.
- Gaudefroy, Vincent, Valérie Viranaïken, Régis Paranhos, Agnès Julien et Chantal de La Roche. 2005. «Laboratory assessment of fumes generated by bituminous mixtures and bitumen ». *Roads Materials and Pavement Design*, Volume X, N° XI/2005.
- Hurley, Graham C. et Brian D. Prowell. 2006. Evaluation of Evotherm® for use in Warm Mix Asphalt, « NCAT Report », 06-02, Auburn (AL) : National Center for Asphalt Technology, Auburn University, 23 p.
- Hurley, Graham C. et Brian D. Prowell. 2005. a. « Evaluation of Aspha-Min® Zeolite for use in Warm Mix Asphalt », NCAT Report 05-04, Auburn (AL) : National Center for Asphalt Technology, Auburn University, 30 p.

- Hurley, Graham C. et Brian D. Prowell. 2005. b. « Evaluation of Sasobit® for use in Warm Mix Asphalt », NCAT Report 05-06, Auburn (AL) : National Center for Asphalt Technology, Auburn University, 27 p.
- Hurley, Graham Craft. 2006. « Evaluation of new technologies for use in Warm Mix Asphalt ». Master of Science, Auburn University, Alabama, 231 p.
- Klincevicius, Mary, Patricia Maillard-Nunes, Anne Dony, Liedi Bernucci, Rosangela Motta, Claudio Del Priore, Yves Brosseaud, Vincent Gaudefroy et Johan Colin. 2009. « Warm Mix Asphalt : Laboratory evaluation of two mix design methods ». 15 p.
- Kristjansdottir, Olof. 2006. « Warm Mix Asphalt for Cold Weather Paving ». M. Sc., University of Washington, 92 p.
- Kumar Akisetty, Chandra Kiran. 2008. « Evaluation of Warm Asphalt additives on performance properties of CRM binders and mixtures ». Thèse de doctorat, Clemson University, SC, 191 p.
- Le Goff, Yves, Yves Martineau et Alain Romier. 2009. « Enrobés « basses calories » : Innovations et procédures d'évaluation, un mariage fécond ». *RGRA : Revue générale des routes*. N°875, avril, pages 33-39.
- Leroy, Christine, Henri Molleron, Vincent Grosshenny, Stéphane Quint, David Fallone, Serge Krafft, Marc Jakubowski, Estelle Brosselier, François Verhée et Philippe Venambre. 2010. « SEVE, le nouvel outil des entreprises routières ». *RGRA : Revue générale des routes*. N°883, mars, pages 28-33.
- Lombardi, Bernard. 2007. « Liant hydrocarbonés ». En ligne. 14 pages. < www.techniques-ingenieur.fr >. Consulté le 9 mai 2010.
- Mazé, Michel, Frédéric Delfosse, S. Faucont Dumont, Everett Crews, Claude Giorgi. 2008. « Development of the Tempera®/Evotherm DAT™ Process in Europe: A Collaboration Between Eurovia and MeadWestvaco ». En ligne. 13 p. <<http://www.meadwestvaco.com/mwv/groups/content/documents/document/mwv011338.pdf>>. Consulté le 20 octobre 2009.
- Meadwestvaco Speciality Chemicals Asphalt Innovations. 2009. Information sheet. « Evotherm™ H5 DAT® Concentrate : General Procedure for Laboratory Preparation ». 3 p.
- Meadwestvaco. Evotherm H5 DAT Material Safety Data Sheet Version 1. 2008. 6 p.
- Meadwestvaco Speciality Chemicals. 2009. « MWV Evotherm™ Pavement Durability: Results of Laboratory and Field Testing ». En ligne. 31 p. <<http://www.meadwestvaco.com/mwv/groups/content/documents/document/mwv017263.pdf>>. Consulté le 20 janvier 2010.

- Muench, Steve. 2003. « Selection of optimum asphalt binder content example (from Roberts et al., 1996) ». En ligne.
<http://pavementinteractive.org/index.php?title=Superpave_Mix_Design>.
- Newcomb, Dave. « An Introduction to Warm-mix Asphalt ». En ligne. 7p.
<http://fs1.hotmix.org/mbc/Introduction_to_Warm-mix_Aspphalt.pdf>. Consulté le 3 septembre 2009.
- Olard, François et Claude Le Noan. 2008. « Les enrobés à basse température ». *Routes-Roads 2008*, N° 336/337.
- Olard, François, Claude Le Noan et Alain Romier. 2006. « Les enrobés basse énergie EBE® et basse température EBT® ». En ligne. 11 p. <www.lea-co.com>.
- Organisation internationale de normalisation. 2006. *Management environnemental - Analyse du cycle de vie – Principes et cadre*, 2è éd. Norme internationale, ISO 1404:2006(F). Suisse : ISO, 30 p.
- Paranhos, Régis. 2007. « Approche multi-échelles des émissions d'un procédé d'élaboration des enrobés à chaud ». Thèse de doctorat, Université de Rouen, France, 295 p.
- Prowell, Brian D., Graham C. Hurley et Everett Crews. 2007. « Field Performance of Warm-Mix Asphalt at National Center for Asphalt Technology Test Track ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n° 1998, pages 96–102.
- Purdy, Keith M. 2008. « Warm Mix Asphalt Technology ; A comparative study of Evotherm™ and conventional Hot Mix Asphalt ». Master of engineering, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, 143 p.
- Sasol Inc. Site internet. Rubrique « Modification du bitume ». En ligne.
<http://www.sasolwax.com/fr/Applications/Modification_du_bitume-p-16/Am%C3%A9rique_du_Nord-p-281/Sasolwax_Flex.html>. Consulté le 3 décembre 2009.
- Site internet Aspha-min GmbH. Rubrique « Product : Effect and application ». En ligne.
<<http://www.aspha-min.com/effect-and-application.html>>. Consulté le 16 avril 2010.
- Site internet Environnement Canada. Rubrique « Principaux contaminants atmosphériques et polluants connexes ». En ligne.
<<http://www.ec.gc.ca/Air/default.asp?lang=Fr&n=7C43740B-1>>. Consulté le 10 mars 2010.
- St-Jacques, Michèle. 2008. *Éléments de matériaux de construction : le bitume et les enrobés bitumineux*. Notes de cours CTN-104. Montréal : École de Technologie Supérieure, 127 p.

- USIRF. 2009. Synthèse de la Convention d'Engagement Volontaire. En ligne. <www.usirf.com/content/download/1352/13793/file/Synthese_convention_route_du_24_mars_09.pdf>. Consulté le 12 mars 2010.
- Ventura, Anne, Agnès Jullien et Pierre Monéron. 2007. « Polycyclic aromatic hydrocarbons emitted from a hot-mix drum, asphalt plant: study of the influence from use of recycled bitumen ». *Journal of Environmental Engineering and Science*, Vol 6, Novembre, pages 727-734.
- Witier, Pierre, Gérard Platret, Hieu-Thao Huyn, Fabienne Farcra, Véronique Boueiller, Daniel André, Yves Mouton et Jean-Marie Antoine. « Analyse et caractérisation de matériaux de construction ». En ligne. 27 pages. < www.techniques-ingenieur.fr >. Consulté le 9 mai 2010.