

Evaluation des performances et des impacts des enrobés bitumineux tièdes

THÈSE N° 5169 (2011)

PRÉSENTÉE LE 4 NOVEMBRE 2011

À LA FACULTÉ ENVIRONNEMENT NATUREL, ARCHITECTURAL ET CONSTRUIT
LABORATOIRE DES VOIES DE CIRCULATION
PROGRAMME DOCTORAL EN ENVIRONNEMENT

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

Nicolas BUECHE

acceptée sur proposition du jury:

Prof. C. Ancey, président du jury
Prof. A.-G. Dumont, directeur de thèse
Prof. A. Carter, rapporteur
Prof. E. Gnansounou, rapporteur
Dr A. Vanelstraete, rapporteur



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Suisse
2011

RÉSUMÉ

Par la diminution de la température de fabrication et de pose, les enrobés tièdes permettent de réduire la consommation énergétique et les émissions, contribuant ainsi à la politique de développement durable. Des recherches sont cependant nécessaires afin que ces enrobés se positionnent comme une alternative crédible aux mélanges à chaud traditionnels. Le recul sur les performances est limité et certains paramètres critiques ou non vérifiés sont à analyser. De plus, un outil permettant de choisir la technologie la plus adaptée est également nécessaire.

La première phase de la recherche consiste en une analyse approfondie des performances mécaniques d'une sélection représentative de procédés tièdes. Dans un premier temps, une étude de la viscosité des enrobés se concentrant sur le comportement du bitume et du mastic a été conduite. L'évaluation des caractéristiques et performances a ensuite été axée sur les paramètres potentiellement critiques; un accent particulier étant mis sur le processus de montée en performance au cours des trois premiers mois après la fabrication et sur les conditions de stockage des échantillons. Les résultats obtenus mettent en évidence le bon comportement des enrobés avec cire Fischer-Tropsch dans le domaine de sensibilité à l'orniérage. A basse température, l'enrobé est par contre plus fragile que le mélange de référence à chaud. L'enrobé avec additif chimique (agent tensio-actif) démontre des performances comparables à la référence à chaud alors que le mélange avec maîtrise de la teneur en eau s'avère moins performant en raison notamment du vieillissement plus faible de son liant. Les différents essais ne mettent pas en évidence de manière significative un processus de montée en performance des enrobés. De même, un confinement des échantillons dans des sacs plastiques ne semble pas altérer le comportement mécanique des enrobés.

Dans une deuxième phase, un essai de traction indirecte pulsé a été mis en place et évalué. Cet essai offre une variante pertinente et efficace à l'essai traditionnel de module complexe sur éprouvettes trapézoïdales, permettant de déterminer le module sécant d'un échantillon d'enrobé. Une analyse approfondie ainsi que la réalisation d'une série d'essais sur enrobés ont mis en évidence des axes de recherche en vue d'une amélioration de la fiabilité ainsi que du développement de la méthode d'essai.

Une méthodologie d'évaluation multicritère des enrobés bitumineux est proposée dans la troisième partie de la recherche. De nombreux calculateurs de gaz à effet de serre et de consommation énergétique permettant de comparer les projets routiers existent. Cependant, malgré l'important effet du type d'enrobé sur la consommation d'énergie et les émissions, peu de ces outils permettent d'effectuer une comparaison détaillée à l'échelle du mélange. Les performances mécaniques et autres critères qualitatifs ne sont également pas considérés. Le modèle multicritère proposé intègre les émissions, la consommation énergétique et les aspects économiques sur l'ensemble du cycle de vie de l'enrobé. Les performances sont également considérées dans le processus de décision; les données de base étant issues des deux premières parties de la recherche. La méthodologie développée et implémentée s'articule selon quatre niveaux distincts. Dans les deux premiers niveaux, des analyses graphiques permettent d'identifier les processus unitaires dominants ainsi que les éventuels surclassements complets. La notion de préférence et la prise en considération de critères qualitatifs sont intégrées dès le troisième niveau d'analyse où une méthode d'agrégation partielle recourant à des critères flous est proposée. Dans le dernier niveau d'analyse, l'incertitude et la part d'inconnue sur les données de base sont prises en considération de manière innovante. Pour cela, une méthode d'agrégation complète basée sur un algorithme dérivé de la théorie de l'Evidence est choisie. La méthodologie d'évaluation multicritère proposée offre un outil pertinent, flexible et robuste permettant finalement d'affiner le processus de décision et encourager l'innovation.

Mots-clés :

Enrobé tiède, performances, viscosité, essai de traction indirecte, module sécant, inventaire du cycle de vie, méthodes multicritères, agrégation partielle, agrégation complète, théorie de l'Evidence

ABSTRACT

By decreasing the mixing and laying temperatures, warm mix asphalts (WMA) allow a reduction of the energy consumption as well as the emissions, thus contributing to the sustainable development. However researches are necessary for these asphalt mixtures to be considered as a credible option to hot mix asphalts (HMA). The experience regarding mixture behavior is limited and some critical or unverified parameters have to be assessed. Besides, a tool assisting in the choice of the most adapted technology is also necessary.

The first research phase consists in a detailed analysis of the mechanical performances from a representative selection of warm mix asphalts. The mix viscosity has been first evaluated, in particular by focusing on the bitumen and mastic behavior. Then, the evaluation of the characteristics and performances have been devoted to the potential critical parameters, with a special emphasis on the performance increases process during the first three months after production and on the samples storage conditions. The results highlight the high performances of WMA containing Fischer-Tropsch wax in the rutting susceptibility temperature domain. The low temperature behavior of this WMA is however more brittle than the reference hot mix asphalt (HMA). WMA with chemical additive (surfactants) shows performances comparable to the reference HMA while the mixture with moisture control proves to have lower mechanical performances in particular due to the reduced ageing of its binder. The various tests performed do not highlight any significant performance increases of the tested mixtures. Moreover, confining the samples in plastics bags does not seem to affect the asphalt mixtures mechanical behavior.

In a second phase, an indirect tensile test has been setup and assessed. This test offers a relevant and efficient alternative to traditional complex modulus test on trapezoidal samples, allowing determining the secant modulus of an asphalt sample. A detailed analysis as well as the realization of various tests on asphalt mixtures highlighted some research strands in order to improve the reliability and further develop the testing method.

A multi-attribute evaluation methodology of asphalt mixtures has been proposed in the third phase of the research. Various greenhouse gas and energy consumption calculators allowing a comparison of different road projects exist. However, despite the important effect of the asphalt mixture type on the energy consumption and emissions, few of these tools are able to perform a comparison at the asphalt mixture scale. The performances and other qualitative aspects are also not considered. The proposed multi-criteria model takes into account emissions, energy consumption and economical aspects over the whole life cycle of the asphalt mixture. The mechanical performances are also taken into account in the decision process; the databases being provided by the first two phases of the present research. The developed and implemented methodology contains four distinct levels. In the first two levels, some graphical analyses allow identifying the dominant processes and the potential alternatives outranking. The preference and some qualitative criterions are introduced from the third analysis level where a partial aggregation method using pseudo-criterions is proposed. In the last analysis level, data uncertainty and unknown data are considered through an innovative method. To achieve this, a complete aggregation method based on an algorithm derived from the Evidential reasoning approach is selected. The final multicriteria evaluation method proposed offers a pertinent, flexible and robust tool that helps in improving the decision process and thus encouraging innovation.

Keywords :

Warm mix asphalt, performances, viscosity, indirect tensile test, secant modulus, life cycle analysis, multicriteria methods, partial aggregation, complete aggregation, Evidential reasoning approach

REMERCIEMENTS

Par ces quelques lignes, je souhaite exprimer toute ma gratitude envers les différentes personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à cette recherche. Cette liste n'est assurément pas exhaustive et je m'excuse pour l'oubli bien involontaire de certaines personnes.

Je voudrais tout d'abord remercier mon proche entourage et en particulier Fanny qui m'a toujours soutenu de manière inconditionnelle, a consenti à d'importants sacrifices et m'a offert le plus beau des cadeaux avec la naissance de notre fils Roman. Je souhaite également remercier mes parents pour avoir su m'apporter de la motivation et de l'écoute dans les moments difficiles. Je voudrais associer mes grands-parents qui ont joué un rôle crucial, ma sœur et sa famille, ainsi que la famille Di Marzo. Le soutien des différentes personnes et leur attitude positive a été d'une grande aide.

En premier lieu, je souhaite exprimer ma profonde reconnaissance envers mon directeur de thèse, le professeur André-Gilles Dumont, chez qui j'ai tout particulièrement apprécié la motivation et l'ouverture d'esprit lors de la recherche. Ses conseils avisés et sa confiance m'ont permis de progresser dans un cadre professionnel idéal. Je souhaite également associer Michel Pittet pour les nombreuses discussions et l'aide précieuse dans la phase de laboratoire ainsi que Mehdi Ould Henia pour son apport à la fois technique et humain ainsi que sa relecture critique du document.

Toute ma gratitude envers l'équipe du laboratoire pour leur aide ainsi que l'agréable atmosphère de travail : Jean-Claude, Fils-Aimé, Alex, David, Sylla. Je remercie enfin mes collègues et ex-collègues du Lavoc et tout particulièrement : Emmanuel, Dominique, Jean-Jacques, Patrick, M. Pham, Edward et Charles.

Je remercie également les membres du jury, les professeurs A. Carter et E. Gnansounou et le Dr. A. Vanelstraete pour l'intérêt porté à mon travail et le temps consacré à la lecture du document.

Je souhaite remercier les collaborateurs du Laboratoire de Technologie des Composites et Polymères pour la mise à disposition du matériel ainsi que l'assistance dans la réalisation des essais.

Je remercie F. Olard, A. Romier, J.-M. Lefebvre, J.-A. Gonzalez et M. Noelting pour les différentes discussions au sujet des enrobés tièdes ainsi que la mise à disposition de matériaux.

Je voudrais finalement dédier ce travail à Roman qui dans cette intense année 2011 aura constitué une magnifique source de motivation et d'inspiration.

TABLE DES MATIERES

RÉSUMÉ

ABSTRACT

REMERCIEMENTS

TABLE DES ABRÉVIATIONS

1.	INTRODUCTION	15
1.1	Contexte	15
1.2	Motivations de la recherche	16
1.3	Objectifs de la recherche et contenu du mémoire.....	17
1.4	Terminologie et conventions	19
2.	GENERALITES SUR LES ENROBES BITUMINEUX	20
2.1	Enrobés bitumineux.....	20
2.2	Composants de base	21
2.2.1	Composants minéraux.....	21
2.2.2	Liants hydrocarbonés.....	22
2.3	Performances et sollicitations des chaussées	24
3.	LES ENROBES BITUMINEUX TIEDES	26
3.1	Bref historique	26
3.2	Terminologie et principes des enrobés tièdes.....	27
3.2.1	Catégorie A : Modification de la séquence d'enrobage	29
3.2.2	Catégorie B : Introduction d'eau ou maîtrise de la teneur en eau.....	29
3.2.3	Catégorie C : Procédés basés sur la chimie	30
3.3	Survol des technologies tièdes et semi-tièdes	30
3.4	Considérations générales sur les enrobés tièdes.....	32
3.4.1	Type de couche.....	32
3.4.2	Considérations économiques	32
3.4.3	Remise en service.....	34
3.5	Avantages et potentiel des enrobés tièdes.....	35
3.6	Performances mécaniques des enrobés tièdes.....	35

3.7	Enseignements.....	42
4.	APPROCHE PERFORMANTIELLE	43
4.1	Problématique et démarche.....	43
4.2	Sélection des procédés et produits pour la recherche en laboratoire.....	44
4.3	Approche performantielle en laboratoire	47
4.3.1	Définitions.....	47
4.3.2	Méthodologie.....	48
4.3.3	Définition des paramètres fixes et contrôlés.....	50
4.4	Choix des essais de caractérisation et essais performantiels	51
4.5	Caractérisation des composants de base.....	54
4.5.1	Granulats et filler	54
4.5.2	Bitume	55
4.6	Formulation	56
4.6.1	Démarche et conditions de base.....	56
4.6.2	Méthodes de formulation	56
4.6.3	Choix d'une formule.....	61
4.7	Fabrication des enrobés tièdes en laboratoire.....	65
4.7.1	Procédure de fabrication	65
4.7.2	Température de compactage des échantillons	66
4.8	Maîtrise de la viscosité	68
4.8.1	Définition de la viscosité.....	68
4.8.2	Essais de caractérisation sur liants	70
4.8.3	Essais étendus sur liants et mastics	72
4.8.4	Evaluation de la viscosité de l'enrobé	79
4.9	Analyse des résultats d'essais de caractérisation étendus et essais performantiels	81
4.9.1	Essais de caractérisation étendus et essais performantiels.....	81
4.9.2	Analyse de la montée en performance.....	84
4.9.3	Analyse de la méthode de cure.....	97
4.9.4	Analyse complémentaire enrobé EST	100
4.10	Enseignements.....	101
5.	MISE EN PLACE ET EVALUATION D'UN ESSAI DE TRACTION INDIRECTE PULSE.....	104
5.1	Contexte et objectifs	104
5.2	Machine d'essai et capteurs	105
5.3	Bases théoriques.....	106
5.3.1	Calcul du module de rigidité lors d'un essai de traction indirecte	106

5.3.2	Définition du module de l'enrobé.....	108
5.3.3	Relation entre module sécant et module complexe.....	111
5.3.4	Domaine de linéarité des enrobés.....	114
5.3.5	Coefficient de Poisson.....	116
5.4	Configuration de la sollicitation.....	118
5.5	Préparation et conditionnement des échantillons.....	120
5.6	Calibration et vérification de la chaîne de mesure.....	121
5.6.1	Anneau de calibration.....	121
5.6.2	Calibration du système.....	121
5.7	Premiers essais exploratoires sur enrobé.....	124
5.7.1	Type de mélange.....	124
5.7.2	Discussion des résultats.....	124
5.8	Analyses spécifiques.....	130
5.8.1	Analyse des pics.....	130
5.8.2	Facteur de surface de charge et module sécant corrigé.....	136
5.8.3	Axes de mesure.....	141
5.8.4	Température d'essai.....	141
5.8.5	Effets de la géométrie.....	142
5.8.6	Répétabilité et reproductibilité.....	143
5.9	Essais sur enrobé tiède.....	144
5.10	Enseignements.....	148
6.	CONSIDERATIONS ENERGETIQUES ET ENVIRONNEMENTALES EN CENTRALE D'ENROBAGE.....	151
6.1	Données relatives aux centrales d'enrobage suisses.....	151
6.1.1	Enquête de consommation énergétique et émissions des centrales suisses.....	153
6.1.2	Exemple de mesures en centrale d'enrobage.....	155
6.2	Données de la littérature.....	157
6.3	Calculs théoriques.....	159
6.3.1	Energie de chauffage des composants.....	160
6.3.2	Energie de chauffage du malaxeur.....	162
6.4	Analyse paramétrique de la consommation énergétique et des émissions.....	164
6.5	Considérations relatives à l'optimisation des centrales.....	168
6.6	Enseignements.....	170
7.	ANALYSE DU CYCLE DE VIE.....	172
7.1	Contexte et démarche.....	172
7.2	Méthodes de base et normalisation.....	173

7.2.1	Analyse du cycle de vie et inventaire du cycle de vie.....	173
7.2.2	Autres méthodes d'analyse environnementale.....	177
7.2.3	Normalisation et organisations internationales.....	178
7.3	Applications au domaine de la route.....	179
7.3.1	L'ACV dans les projets routiers.....	179
7.3.2	Les calculateurs de gaz à effet de serre pour projets routiers.....	187
7.4	Emissions.....	189
7.4.1	Emissions considérées et conversion.....	189
7.4.2	Législation et valeurs limites.....	191
7.5	Principes et architecture du modèle.....	192
7.6	Sources de données pour le modèle.....	193
7.6.1	Bases de données.....	194
7.6.2	Qualité et incertitudes des bases de données.....	196
7.7	Inventaire du cycle de vie d'un enrobé bitumineux (Partie 1 du modèle).....	198
7.7.1	Paramètres et hypothèses de base.....	198
7.7.2	Définition des objectifs et du système.....	200
7.7.3	Inventaire des émissions et de la consommation d'énergie.....	203
7.8	Etablissement des indices performantiels (Partie 1 du modèle).....	205
7.9	Synthèse des indicateurs et résultats (Partie 1 du modèle).....	209
7.10	Enseignements.....	210
8.	EVALUATION MULTICRITERE DES ENROBES BITUMINEUX.....	212
8.1	Problématique.....	213
8.2	Méthodes multicritères d'aide à la décision.....	214
8.2.1	Agrégation complète.....	215
8.2.2	Agrégation partielle.....	217
8.2.3	Agrégation locale itérative.....	218
8.2.4	Autres méthodes.....	219
8.3	Choix des méthodes.....	220
8.4	Agrégation partielle : Méthode multicritère Electre.....	222
8.4.1	Terminologie et notions de base.....	225
8.4.2	Bases théoriques Electre III.....	227
8.5	Agrégation complète : Théorie de l'Evidence.....	234
8.5.1	Généralités sur la théorie de l'Evidence (théorie de Dempster-Shafer).....	234
8.5.2	Bases théoriques de l'algorithme ER modifié.....	238
8.5.3	Exemple de calcul.....	245

8.6	Méthodologie d'évaluation multicritère (Partie 2 du modèle).....	247
8.6.1	Choix des critères.....	251
8.6.2	Niveau 1 : Analyse Pareto.....	251
8.6.3	Niveau 2 : Analyse graphique.....	252
8.6.4	Niveau 3 : Agrégation partielle.....	254
8.6.5	Niveau 4 : Agrégation complète.....	258
8.7	Enseignements.....	261
9.	APPLICATION DE LA METHODOLOGIE.....	263
9.1	Choix des procédés et hypothèses de base.....	263
9.2	Partie 1 : Etablissement des indicateurs.....	265
9.2.1	Inventaire du cycle de vie.....	266
9.2.2	Indices de performance.....	268
9.3	Partie 2 : Analyse multicritère.....	269
9.3.1	Niveau 1 : Analyse Pareto.....	269
9.3.2	Niveau 2 : Analyse graphique.....	271
9.3.3	Niveau 3 : Agrégation partielle.....	272
9.3.4	Niveau 4 : Agrégation complète.....	278
9.4	Discussion des résultats.....	283
10.	CONCLUSIONS GENERALES.....	285
10.1	Conclusions générales.....	285
10.2	Perspectives de recherches et recommandations.....	288
11.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	290
12.	ANNEXES.....	301
Annexe A.	Approche performantielle en laboratoire (Chapitre 4).....	303
Annexe B.	Mise en place de l'essai de module sécant (Chapitre 5).....	327
Annexe C.	Considérations énergétiques et environnementales (Chapitre 6).....	336
Annexe D.	Modèle multicritère – Partie 1 (Chapitre 7).....	344
Annexe E.	Modèle multicritère – Partie 2 (Chapitre 8).....	349
Annexe F.	Exemple d'application de la méthodologie d'analyse multicritère (Chapitre 9).....	357

TABLE DES ABRÉVIATIONS

A&B/T _{AB}	Point de ramollissement anneau et bille (exprimé en degrés °C)
AASHTO	Association of state highway and transportation officials
ACB	Analyse coûts-bénéfices
ACC	Analyse du cycle des coûts
ACV	Analyse du cycle de vie (=LCA)
AEnEC	Agence de l'énergie pour l'économie (Suisse)
ALT	Accelerated loading testing
AMCD	Aide multicritère à la décision (=MADM)
APA	Asphalt pavement analyzer
BBR	Bending beam rheometer (fluage en flexion à basse température)
CHANGER®	Calculator for harmonised assessment and normalisation of greenhouse-gas emissions for roads
CMA	Cold mix asphalt (enrobé à froid)
CRR	Centre de recherches routières (Belgique)
CV	Coefficient de variation
DS	Dempster-Shafer
DSC	Differential scanning calorimetry (calorimétrie différentielle à balayage)
DSR	Dynamic shear rheometer (rhéomètre à cisaillement dynamique)
EAPA	European asphalt pavement association
ECORCE®	Eco-comparateur routes-construction-entretien
EIE	Etude d'impact sur l'environnement
EIO-LCA	Economic input-output model (pour analyse du cycle de vie)
Electre	Elimination et choix traduisant la réalité
EME	Enrobé à module élevé
EPFL	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
ER	Evidential reasoning (théorie de l'Evidence)
FHWA	Federal highway administration (Etats-Unis)
FT	Fischer-Tropsch
FWD	Falling weight deflectometer (déflectomètre à masse tombante)
GES	Gaz à effet de serre
GWP	Global warming potential (=PRG)
HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
HMA	Hot mix asphalt (enrobé à chaud)
HWMA	Half-warm mix asphalt (enrobé semi-tiède)
HWTD	Hamburg wheel tracking device
IA	Intelligence artificielle
ICV	Inventaire du cycle de vie (=LCI)
IP	Indice de pénétration
IPCC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
IRF	International Road Federation (Fédération routière internationale)
ISO	International organization for standardization (Organisation internationale de la normalisation)
ITSR	Indirect Tensile Strength Ratio
KGO	Karl-Gunnar Ohlson
LAMSADE	Laboratoire d'analyse et de modélisation de systèmes pour l'aide à la décision
LAVOC	Laboratoire des voies de circulation (EPFL)
LCA	Life cycle analysis (=ACV)

LCI	Life cycle inventory (=ICV)
LCPC	Laboratoire central des ponts et chaussées (France)
LTC	Laboratoire de technologie des composites et polymères (EPFL)
LUCREB	Laboratoire universitaire sur les chaussées, les routes et les enrobés bitumineux (ETS, Canada)
LVDT	Linear variable differential transformer
MADM	Multiple-attribute decision making (=AMCD)
MAUT	Multi attribute utility theory (théorie de l'utilité multi-attribut)
MEPDG	Mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures (Etats-Unis)
NAPA	National asphalt pavement association (Etats-Unis)
NAT	Nottingham asphalt testing
NCHRP	National cooperative highway research program (Etats-Unis)
OEIE	Ordonnance relative à l'étude d'impact sur l'environnement (Suisse)
OFEN	Office Fédéral de l'Energie (Suisse)
OFEV	Office Fédéral de l'Environnement (Suisse)
OFROU	Office Fédéral des Routes (Suisse)
OPair	Ordonnance sur la protection de l'air (Suisse)
PAV	Pressure aging vessel
PCG	Presse à cisaillement giratoire
PCI	Pouvoir calorifique inférieur
PCS	Pouvoir calorifique supérieur
Pen	Pénétration (essai de pénétrabilité à l'aiguille)
PG	Performance Grade (méthode SUPERPAVE)
PID	Proportionel Integral Dérivé
PLANET	Potentiel et analyse des enrobés tièdes (projet OFROU)
PRG	Potentiel de réchauffement global (=GWP)
PU	Processus unitaire (pour ACV/ICV)
RAP	Reclaimed asphalt pavement
RPLP	Redevance poids lourds liée aux prestations (Suisse)
RTFOT	Rolling thin-film oven test
SBS	Styrène-butadiène-styrène
STL	Simulateur de trafic lourd (essai sensibilité à l'orniérage)
SETAC	Société de toxicologie et de chimie
SMA	Splittmastixasphalt (béton bitumineux grenu à forte teneur en mastic)
SMI	Schweizerische Mischgut-Industrie (Industrie suisse des enrobés bitumineux)
SUPERPAVE	Superior performance asphalt pavement
TSE	Tambour sécheur-enrobeur
TSRST	Thermal stress restrained specimen test (essai de retrait thermique empêché)
VEL	Viscoélastique linéaire
VSS	Schweizer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (Association suisse des professionnels de la route et des transports)
WAM®	Warm asphalt mixes
WMA	Warm mix asphalt (enrobé tiède)

1. INTRODUCTION

1.1 Contexte

L'homme prend conscience dès la fin des années 1960 de l'ampleur des problèmes écologiques causés par son activité. Ceci se traduit en 1972 à Stockholm, lors du Sommet des Nations Unies sur l'environnement humain, où pour la première fois au niveau international des débats ont lieu sur des questions liées à l'environnement et au développement. L'impact sur l'équilibre environnemental de la forte industrialisation des pays développés est évoqué. C'est le début de différentes conférences et accords sur la problématique. En 1987, le terme « développement durable » apparaît pour la première fois de manière officielle dans le Rapport Bruntland, du nom de son auteure la Norvégienne Gro Harlem Bruntland. Le développement durable est alors défini comme « *un développement qui s'efforce de répondre aux besoins présents, sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs* ».

Malgré cette prise de conscience, la consommation énergétique ne cesse d'augmenter au fil des années. Selon l'Office Fédéral de l'Energie (OFEN), 877'000 TJ d'énergie sont consommés en Suisse en 2009, alors que 697'000 TJ étaient consommés en 1980 et 100'000 au début du XX^{ème} siècle. De cette énergie consommée en 2009, 33% est issue des carburants pétroliers et 22% des combustibles pétroliers qui sont actuellement les principales sources d'énergie. En parallèle à cette augmentation de la consommation énergétique, les émissions de gaz à effet de serre – CO₂ principalement – augmentent également. La production de CO₂ a diverses origines, mais dans le cas de pays dits industrialisés une part prépondérante peut être imputée aux secteurs de l'industrie et de la construction (25% environ) et des transports (25% environ).

Poursuivant ce souci de développement durable, d'importants moyens sont mis en œuvre au niveau international et national afin de limiter la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre. Par la ratification du Protocole de Kyoto à la Convention des Nations Unies en 2003, la Suisse s'est engagée à réduire de 8% ses émissions de CO₂ et autres gaz à effet de serre entre 2008 et 2012, ceci en comparaison avec la situation de 1990. Suivant cette même logique et dans l'objectif de respecter ses engagements liés au protocole de Kyoto, diverses ordonnances et directives ont fait leur apparition en Suisse. La « Loi sur le CO₂ » (Loi 1999) se concentre sur les émissions dues à l'utilisation énergétique des carburants et combustibles fossiles. La « Loi sur l'énergie » (Loi 1998) vise notamment à encourager le recours aux énergies renouvelables. La « Redevance poids lourds liée aux prestations (RPLP) », en vigueur depuis janvier 2001, est perçue sur les véhicules circulant sur le territoire suisse et dont le poids total maximum autorisé excède 3.5 tonnes. Ces lois, couplées à des mécanismes financiers, encouragent les différents milieux à apporter leur contribution à la réduction des émissions.

La construction routière peut également apporter sa contribution à la réduction de la consommation d'énergie et des émanations polluantes. Les matériaux bitumineux sont d'énormes consommateurs d'énergie lors de leur processus de fabrication. Des enrobés tièdes à consommation d'énergie et émissions réduites ont ainsi été développés. En Suisse, 5.3 millions de tonnes d'enrobés à chaud ont été produites en 2008 selon l'European Asphalt Pavement Association (EAPA). Cette même année, 0.63 millions de tonnes d'enrobé tiède (température de production entre 100 °C et 150 °C selon définition des statistiques EAPA) ont été produites. Le potentiel de développement des technologies tièdes n'est que peu exploité à l'heure actuelle. Il apparaît donc possible de contribuer plus encore à la préservation de l'environnement et des ressources naturelles. Différentes techniques sont en plein développement, mais le recul sur le comportement à long terme des enrobés tièdes est très limité. Une évaluation des performances structurelles et fonctionnelles est indispensable avant une application très large et reconnue de ces procédés. Un bilan énergétique et écologique est nécessaire pour évaluer l'effet positif sur l'environnement. D'autre part le gain économique reste bien difficile à évaluer car dépendant de nombreux facteurs exogènes.

Les progrès technologiques seuls ne sont pas une condition suffisante pour favoriser une large application des enrobés à faibles impacts. Une méthode d'évaluation adaptée, aidant au choix de la technologie appropriée peut apporter un éclairage objectif. L'outil permettant cette évaluation globale spécifiquement pour les matériaux de chaussée n'existe pas, bien que sa nécessité soit reconnue.

1.2 Motivations de la recherche

Ce travail de thèse fait suite à l'implication de l'auteur dans différentes recherches du domaine des enrobés bitumineux. Les travaux menés sur les enrobés avec matériaux recyclés, l'évaluation des performances mécaniques ainsi que plus spécifiquement les projets relatifs à l'analyse des enrobés à faibles impacts énergétiques et écologiques ont permis à l'auteur d'élaborer une première analyse de la situation et des besoins.

Depuis le début des années 2000, la littérature scientifique et technique propose de nombreuses évaluations des performances mécaniques des enrobés tièdes. Ces recherches contiennent souvent une analyse basée sur des essais traditionnels appliqués normalement aux enrobés à chaud. Les enrobés tièdes font appel à des processus de fabrication et mécanismes de réaction particuliers et l'on peut se demander si les méthodes traditionnelles sont représentatives pour une évaluation complète. Les conditions de production, de conservation des échantillons ou de mûrissement ne sont que peu évaluées. Une des premières motivations de la recherche est donc l'analyse des performances potentiellement critique ou non vérifiées des différentes familles d'enrobés tièdes (chapitres 4).

L'évaluation de la durée de vie et les calculs de dimensionnement de chaussée nécessitent la connaissance du module de l'enrobé. En Suisse, sa détermination s'effectue en laboratoire lors d'un essai sur éprouvette trapézoïdale, conformément à la normalisation. La détermination de cette caractéristique nécessite de grands investissements de temps et d'énergie. Une seconde motivation de la recherche est la proposition et analyse critique d'un essai de traction indirecte permettant de déterminer le module sécant d'un échantillon d'enrobé, pour ensuite apporter une contribution à l'évaluation des performances des enrobés tièdes. Le choix du module sécant repose sur les développements de la norme EN 12697-26. Cet essai prometteur pour lequel la confection des éprouvettes est aisée et l'exécution de l'essai rapide, est actuellement en cours de développement dans de nombreux pays (chapitre 5).

Le développement des enrobés tièdes en Suisse est limité. Les gains potentiels de ces enrobés en terme de consommation d'énergie et d'émissions sont largement reconnus. La quantification de ces gains est une condition nécessaire mais pas suffisante afin de promouvoir l'application des enrobés tièdes à plus large échelle. Il est difficile pour le décideur de favoriser une technologie uniquement sur la base d'une analyse du cycle de vie.

Ainsi, la troisième motivation de ce travail consiste à proposer une méthodologie permettant au décideur de comparer différents enrobés et ainsi l'aider dans son choix. Pour être exhaustive, cette analyse devra au moins prendre en compte l'énergie, les émissions et les coûts associés, mais également le comportement mécanique des matériaux. La mise en place d'un modèle multicritère d'aide à la décision permettra de promouvoir le choix de la meilleure technologie selon les exigences des décideurs ainsi qu'évaluer la différence entre les variantes proposées (chapitres 7, 8 et 9).

1.3 Objectifs de la recherche et contenu du mémoire

Les objectifs de la recherche font suite aux motivations et aux besoins répertoriés :

1. Effectuer une analyse approfondie des performances critiques et/ou non avérées des enrobés tièdes selon une approche par équi-compacité.
 - Analyse des spécificités des différentes familles d'enrobés tièdes.
 - Evaluation de la méthode de conditionnement des échantillons.
 - Analyse du processus de montée en performance (cure).
 - Identifier les performances et conditions nécessaires pour l'évaluation des enrobés tièdes.
2. Mise en place et analyse critique d'un essai rapide et discriminant (traction indirecte) pour l'évaluation du module sécant des enrobés tièdes.
3. Proposer une méthodologie d'évaluation globale des performances des enrobés.
 - Prise en compte de différents critères qualitatifs et quantitatifs dont les émissions, l'énergie, les coûts et les performances mécaniques.
 - Développement et mise en place d'un modèle d'analyse multicritère élaboré selon différents niveaux.

L'organisation de la recherche est présentée dans la Figure 1-1 dans laquelle les deux contributions principales sont indiquées dans un encadré rouge. La première contribution concerne l'analyse performantielle en laboratoire des enrobés tièdes et la mise en place de l'essai de traction indirecte. La seconde contribution a pour objectif le développement et la mise en place du modèle global d'évaluation.

La structure du mémoire suit l'organigramme de la recherche. La première partie du rapport fournit les bases de la recherche. Le chapitre 2 consiste en une présentation non exhaustive des matériaux de base

utilisés dans le cadre de cette thèse. Les constituants principaux ainsi que leurs caractéristiques y sont décrits. Une présentation générale des enrobés tièdes évalués dans cette recherche est faite au chapitre 3, ainsi qu'une discussion de leurs caractéristiques principales et du potentiel des technologies tièdes. Une revue des expériences menées à ce jour sur l'évaluation des performances des enrobés tièdes est également proposée dans ce même chapitre.

Dans une deuxième partie, le chapitre 4 présente la méthodologie ainsi que les résultats de l'étude expérimentale concernant l'évaluation en laboratoire des performances des différents enrobés. La mise en place et analyse de l'essai de traction indirecte est ensuite décrite au chapitre 5. Les informations acquises dans cette seconde partie de la recherche permettent de proposer des données d'entrée pour l'élaboration du modèle multicritère qui suivra.

La troisième partie concerne le développement du modèle d'évaluation multicritère des enrobés. Le chapitre 6 propose quelques considérations énergétiques et environnementales sur la base de calculs, mesures et enquêtes auprès de centrales d'enrobage suisses. Le chapitre 7 décrit les bases théoriques de l'analyse et de l'inventaire du cycle de vie. Il propose ensuite la description de la méthode suivie pour l'établissement des indicateurs d'énergie, d'émissions, de coûts et de performances (partie 1 du modèle). Le chapitre 8 contient la méthodologie et la mise en place du modèle d'évaluation multicritère (partie 2 du modèle). La méthode développée est ensuite illustrée par un exemple de calcul (chapitre 9) avant de proposer des conclusions et perspectives de recherches (chapitre 10).

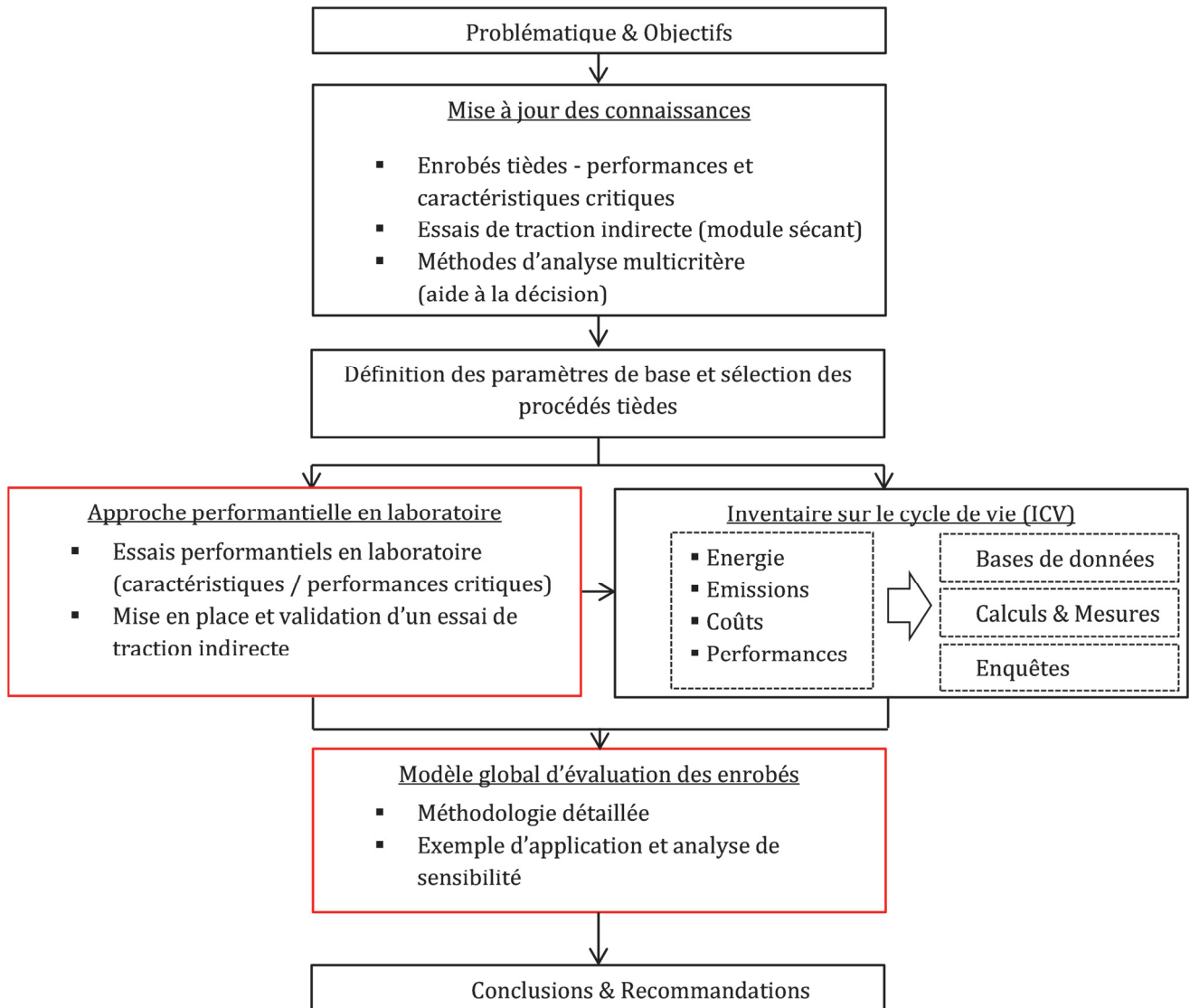


Figure 1-1 : Vue générale de la recherche

1.4 Terminologie et conventions

Sauf mention spécifique, les sollicitations sur enrobé sont définies selon les conventions appliquées en mécanique des sols :

- Positifs en compression (et contraction)
- Négatifs en traction (et extension)

Pour les enrobés testés en laboratoire, la nomenclature suivante est appliquée :

- REF : Enrobé de référence à chaud
- ET-C : Enrobé tiède avec cire Sasobit®
- ET-P : Enrobé tiède avec additif chimique Cecabase RT 945®
- EST : Enrobé semi-tiède LEA®

Sans précision spécifique, le vocable général « enrobé tiède » retenu dans la présente étude comprend les enrobés tièdes (température fabrication >100 °C) et les enrobés semi-tièdes (température fabrication <100 °C).

Les conventions spécifiques à un chapitre sont mentionnées au début du chapitre concerné.

2. GENERALITES SUR LES ENROBES BITUMINEUX

2.1 Enrobés bitumineux

Les matériaux bitumineux utilisés dans les chaussées routières sont un mélange dont les composants principaux sont le liant hydrocarboné (généralement du bitume) et les composants minéraux (filler, sable, gravillons ou gravier, pierres). Les caractéristiques et les propriétés mécaniques des matériaux bitumineux varient selon la composition volumétrique du mélange et sont surtout fonction de la taille du grain maximal, de la teneur en liant et de la teneur en vides du mélange.

La teneur en masse de liant hydrocarboné est en général inférieure à 7%, le reste étant constitué par le squelette granulaire. L'obtention des enrobés par le mélange de granulats et de bitume fait appel aux propriétés de ses constituants que nous décrivons dans la suite du chapitre.

Les différentes couches de matériaux (couche de roulement, couche de base, couche de fondation) constituent la superstructure (Figure 2-3). Cette recherche s'intéresse prioritairement aux couches de bases, très sollicitées mécaniquement par le passage des charges roulantes et qui assurent la transmission des charges à la fondation. Une introduction aux enrobés bitumineux est proposée dans ce chapitre, avant de décrire les spécificités relatives aux enrobés tièdes (chapitre 3).

2.2 Composants de base

2.2.1 Composants minéraux

Le squelette granulaire de l'enrobé est constitué des composants minéraux. Ils représentent plus de 90% en poids de l'enrobé et 80-85% en volume. Le choix des composants minéraux est important et il affecte directement les caractéristiques mécaniques et les performances du mélange bitumineux.

Les composants minéraux peuvent être différenciés selon leur provenance pétrographique (Dumont 2003) :

- Les roches éruptives proviennent de la solidification de la matière en fusion (granite, basalte,...). Elles se présentent sous la forme de massifs et constituent en général de bons matériaux pour la construction routière.
- Les roches sédimentaires sont issues de la lente superposition des dépôts. Leur qualité est variable, les roches siliceuses (sables, grès,...) convenant en général pour les usages routiers.
- Les roches métamorphiques résultent du changement de la nature des roches sédimentaires sous l'effet de la pression et de la température. Ce sont en général de bons matériaux routiers.

La provenance des composants minéraux peut varier :

- Extraction à partir d'une roche mère compacte en carrière. Il s'agit alors de matériaux concassés.
- Creusage d'un gisement de type gravière, alluvion fluviale ou lacustre. On parle dans ce cas de matériaux roulés ou semi-concassés.

Une fois extraits, les matériaux pierreux sont concassés et criblés afin de les fractionner en tranches granulométriques. Ils sont ensuite lavés dans le but de les rendre propres et maîtriser la teneur en éléments fins (filler). Les matériaux utilisés pour les bétons bitumineux sont en règle générale lavés. Sauf dans le cas d'une sensibilité accrue au gel, les matériaux de fondation ne sont généralement pas lavés (Dumont 2003).

Les granulats sont classifiés en différentes classes granulaires selon la taille des éléments. Une classe granulaire (d/D) est répertoriée par la taille du plus petit grain d et du plus gros grain D ; la taille est exprimée en mm. Il est admis qu'une fraction granulaire peut comporter jusqu'à 15% de matériaux excédentaires supérieurs. On peut distinguer les classes granulaires suivantes :

- | | |
|-------------------------------|------------------------------|
| - Filler | <0.063 |
| - Sables | 0/2 ou 0/4 |
| - Gravillons | 2/4, 4/8, 8/11, 11/16, 16/22 |
| - Pierres concassées, ballast | >22 |

Le filler est constitué des éléments très fins, de diamètre inférieur à 63 microns. Il provient du dépoussiérage de granulats ou de production industrielle par mouture de roche. Le filler a une surface spécifique très élevée et il absorbe une part importante du liant. Le mélange du filler avec le liant constitue le mastic qui confère sa stabilité à l'enrobé. L'épaisseur du film de mastic est caractérisée par le module de richesse. La propreté du filler, en particulier sa faible teneur en argile, est primordiale afin de garantir un bon comportement mécanique (Corté et Di Benedetto 2005).

L'arrangement des différentes classes granulaires forme la courbe granulométrique d'un mélange bitumineux. La Figure 2-1 illustre les limites maximales et minimales du fuseau de la courbe granulométrique d'un enrobé AC T 22 pour couche de base (retenu pour notre étude) selon la norme suisse (SN 640431-1b-NA).

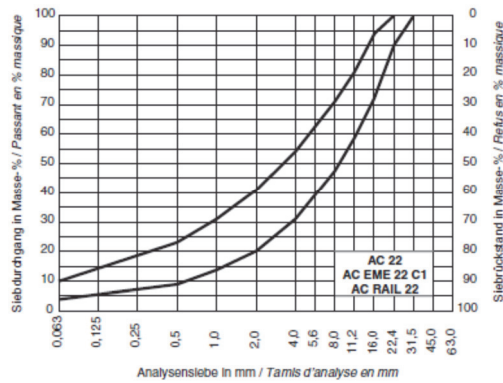


Figure 2-1 : Fuseau des valeurs nominales de granularité pour couche de base type AC T 22 (norme SN 640431-1b-NA)

Différentes caractéristiques et performances des granulats peuvent être évaluées selon les exigences :

- Analyse granulométrique
- Propreté des matériaux
- Forme des granulats ou coefficient de forme (normalisation suisse)
- Coefficient d'aplatissement (norme française)
- Résistance aux chocs
- Résistance au gel
- Compatibilité avec le liant
- Résistance au polissage
- Essai d'angularité

Les granulats (sable et gravillons) doivent présenter des caractéristiques et performances spécifiques selon leur emploi.

2.2.2 Liants hydrocarbonés

(Dumont 2003) définit le bitume comme un mélange d'hydrocarbures naturels ou pyrogénés, liquide, semi-solide ou solide, plus ou moins thixotrope, complètement soluble dans le sulfure de carbone. Ces hydrocarbures proviennent soit d'asphaltes (naturels), soit du raffinage du pétrole brut. Les asphaltes naturels sont des mélanges de bitumes et d'impuretés (limons, argiles ou autres matières minérales). Ils ne sont plus utilisés qu'en faible quantité dans la construction routière. On privilégie les bitumes issus des résidus de la distillation du pétrole brut.

Le bitume est un matériau thermoplastique, c'est-à-dire qu'il conserve ses propriétés après chauffage et que sa consistance varie avec la température. Cette modification de la consistance sur une large gamme de températures est particulièrement exploitée dans la construction routière. Solides à température ambiante, les liants bitumineux doivent être chauffés afin de modifier leur consistance lors de la fabrication et de la pose de l'enrobé. Une autre propriété fondamentale exigée d'un liant hydrocarboné est son pouvoir adhérent en présence d'un granulat minéral.

Les principaux constituants du bitume sont le carbone (79 à 88%) et l'hydrogène (7 à 13%). On note également la présence de faibles quantités d'oxygène (2 à 8%) et d'azote (jusqu'à 8%), ainsi que des traces de nombreux métaux (fer, vanadium, nickel, aluminium, silicium, ...) (Ould-Henia 2005).

Un bitume peut être divisé en deux fractions, selon leur solubilité dans un hydrocarbure léger en grand excès :

- Les asphaltènes : Fraction précipitée par le solvant (masse molaire entre 1000 et 100'000 g/mol). La teneur en asphaltène varie entre 5 et 25% du bitume total (Corté et Di Benedetto 2005).
- Les maltènes : Fraction soluble (masse molaire jusqu'à 1250 g/mol).

La chromatographie sur gel de silice ou d'alumine permet de séparer les maltènes en trois sous-familles en fonction de leur polarité : résines (propriétés adhésives très fortes), huiles saturées, huiles aromatiques.

Les maltènes se comportent comme un fluide parfaitement visqueux (fluide newtonien). La présence des asphaltènes confère au bitume des propriétés caractéristiques de l'état colloïdal. Les asphaltènes ont tendance à adsorber la fraction aromatique la plus lourde de maltènes (les résines) et forment ainsi des corpuscules complexes (les micelles) qui sont en suspension dans une phase continue formée par les maltènes de bas poids moléculaire (les huiles) (Figure 2-2).



Figure 2-2 : Etat colloïdal des bitumes (Dumont 2003)

Si les maltènes contiennent suffisamment d'aromatiques, alors les forces d'adsorption des asphaltènes sont saturées et les micelles sont complètement mobiles au milieu de la phase dispersante (elles sont peptisées). La solution est alors à l'état de « sol ». S'il n'y a pas suffisamment d'aromatiques dans les maltènes, alors les micelles s'attirent mutuellement et deviennent moins mobiles. Elles forment un réseau au milieu de la phase intermicellaire. La solution est alors à l'état de « gel », la structure confère au bitume des propriétés élastiques. L'équilibre entre les états de « sol » ou « gel » dépend en particulier de la proportion en asphaltènes et de l'aromaticité des maltènes (la nature et la masse molaire) qui détermine le pouvoir de solvant des phases huileuses (Dumont 2003).

Les caractéristiques fondamentales d'un liant bitumineux sont (Dumont 2003):

- La viscosité : A la température d'enrobage des granulats, le bitume se comporte pratiquement comme un liquide newtonien. Le bitume doit avoir une viscosité suffisamment faible pour garantir un bon enrobage des granulats.
- L'adhésivité : L'adhésivité mécanique est la force par unité de surface nécessaire pour rompre l'assemblage liant-granulat. Une bonne adhésivité est capitale car elle permet d'enrober les granulats et de les lier. Ce phénomène est relatif à la notion de tension superficielle. Si l'adhésivité n'est pas suffisante, elle peut être améliorée par l'utilisation d'un adjuvant appelé « dope ».
- La cohésion : La cohésion est une qualité importante qui empêche le bitume de se désunir trop facilement sous l'effet des sollicitations subies.

Le type de bitume (classe commerciale) est défini en Europe par les essais de caractérisation suivants (ces essais seront détaillés au chapitre 4) :

- Point de rupture Fraass : Caractérise l'aptitude du liant à résister à la fissuration thermique.
- Pénétrabilité à 25 °C : Caractérise la consistance du liant à température ambiante par la mesure de l'enfoncement d'une aiguille pendant un temps défini.

- Point de ramollissement Anneau et Bille : L'essai permet d'évaluer le ramollissement du bitume lorsque la température s'élève.

D'un point de vue rhéologique, le bitume se comporte comme un matériau viscoélastique. Selon les conditions de sollicitations (température et durée d'application de la charge), sa réaction peut être soit essentiellement visqueuse, soit essentiellement élastique, soit intermédiaire à ces deux comportements extrêmes. Malgré une concentration souvent inférieure à 7% en masse de bitume par rapport à l'enrobé, ses caractéristiques déterminent largement le comportement mécanique du mélange enrobé.

2.3 Performances et sollicitations des chaussées

Performances structurelles ou mécaniques

Les structures de chaussées sont soumises à des phénomènes complexes de nature mécanique, physique, chimique et thermique. Ces phénomènes agissent souvent de manière couplée. Afin d'apporter une résistance et des performances suffisantes, chacune des couches de la chaussée participe à l'effet structurel. Le fonctionnement combiné de la chaussée doit notamment permettre de résister à (Pucci 2000):

- La fatigue mécanique :
La fatigue s'explique par la flexion des couches de chaussée au passage des véhicules (effet du trafic). Les petites tractions (de l'ordre de 10^{-4}) répétées à la base des couches bitumineuses sous l'effet des véhicules créent des « microdégradations » qui s'accumulent et peuvent entraîner la ruine du matériau par la propagation des fissures au travers de la chaussée. La chaussée peut être assimilée à une poutre sur un appui élastique (Figure 2-3).

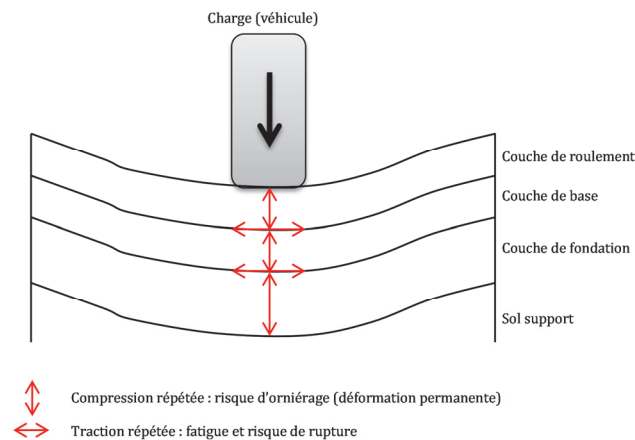


Figure 2-3 : Schéma des sollicitations induites par le trafic

- L'orniérage :
L'orniérage apparaît sous l'effet des compressions verticales répétées dues au passage des charges (Figure 2-3). Le matériau est surcompacté ou se dérobe en formant une déformation de surface de la chaussée et l'apparition de bourrelets. L'orniérage peut aussi être dû au tassement des couches de fondation ou du sol support.
- L'effet thermique :
Les variations de températures provoquent des dilatations-contractions thermiques et la création de contraintes et déformations au sein du matériau. Lorsque les températures sont très basses, des fissures peuvent alors apparaître et se propager. Cette fissuration peut être accentuée par les cycles thermiques journaliers ou saisonniers. Les couches de base traitées aux liants hydrauliques (structures semi-rigides) sont également sujettes au retrait thermique, de

prise et de dessiccation. Ce retrait, empêché par le frottement à l'interface, peut provoquer une fissure dans le revêtement bitumineux. Cette fissure peut ensuite traverser la couche et remonter. On parle de remontée de fissure (Figure 2-4).

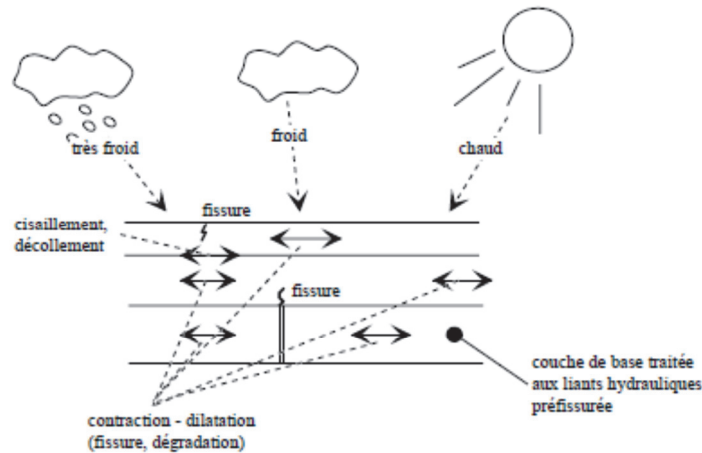


Figure 2-4 : Schéma des sollicitations induites par la température (Pucci 2000)

Les sollicitations chimiques ont un effet moins marqué que les sollicitations mécaniques et thermiques. Elles sont dues à l'oxydation naturelle des liants hydrocarbonés, à l'action des sels de déveglaçage et aux dégradations de surface de la chaussée par les rayonnements UV solaires.

Performances fonctionnelles ou non mécaniques

Les performances fonctionnelles ne seront pas analysées dans le cadre de cette recherche, l'accent étant mis sur le comportement structurel des couches de base. Les performances fonctionnelles concernent l'adhérence, l'uni longitudinal et l'uni transversal. Les propriétés acoustiques ou photométriques (perception visuelle de la surface de roulement par l'utilisateur) ne sont également pas considérées. Les performances environnementales font partie intégrante de la recherche et du modèle multicritère. Elles seront notamment quantifiées par l'énergie, les émissions ainsi que la recyclabilité des enrobés.

3. LES ENROBES BITUMINEUX TIEDES

Ce chapitre provient de la recherche (Bueche, Dumont et al. 2009) et son contenu en est largement inspiré. Ce rapport constitue un état de l'art et a permis d'identifier les besoins en terme de recherche au niveau suisse dans le domaine des enrobés tièdes. La recherche propose également le contenu détaillé d'un large projet appelé PLANET (Potentiel et analyse des enrobés tièdes) lancé en 2011 par l'Office Fédéral des Routes (OFROU). La présente recherche constitue l'un des sept projets spécifiques de PLANET.

3.1 Bref historique

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

Les enrobés tièdes ont connu les premières évolutions significatives au cours de années '90, en Europe. L'objectif principal était bien entendu de répondre aux exigences de développement durable croissantes, par réduction des émissions de gaz à effet de serre et de la consommation énergétique. Dans ce processus, la signature du protocole de Kyoto (ONU 1998) (ouvert à ratification en 1998) a sans aucun doute joué un rôle majeur pour de nombreux pays européens. Un autre facteur ayant favorisé

l'émergence de ces procédés en Europe est le prix croissant de l'énergie ainsi que les exigences environnementales nationales très strictes. Les premiers développements ont tout d'abord concerné des techniques à la zéolithe en Allemagne, en 1995 (Mitteldeutsche Hartsteinindustrie AG, Eurovia). L'année suivante, Shell et Kolo Veidekke commencent à expérimenter en Norvège une technique WAM (Warm Asphalt Mixes). La première chaussée en enrobé tiède utilisant une cire Fischer-Tropsch (Sasobit®) est réalisée l'année suivante, en 1997, à Hambourg. Les développements s'enchaînent alors et c'est en 1999 que les premières poses d'enrobé WAM-Foam® (Shell et Kolo Veidekke) et d'enrobé à l'Aspha-min® sont effectuées (Bistor 2007). Les premiers développements concernant notamment le WAM-Foam® sont publiés lors de la conférence Euraspalt & Eurobitume 2000 qui marque un point de départ pour la publication de différentes recherches dans le domaine des enrobés tièdes (Koenders, Bowen et al. 2000). Par la suite, les développements s'enchaînent, bon nombre dans le cadre de recherches d'entreprises privées (Prowell et Hurley 2007).

Les premiers développements et expérimentations d'enrobés tièdes aux Etats-Unis ont été effectués quelques années après l'Europe. Dans un premier temps, en 2002, une étude de la NAPA (National Asphalt Pavement Association) introduisant les enrobés tièdes aux Etats-Unis est menée. Suite à cela, la FHWA (Federal Highway Administration) et la NAPA formèrent en 2005 le « WMA Technical Working Group » avec pour mission de faire connaître ces procédés, créer une base de données des expériences et développements, les performances, les spécifications,... Un événement charnière dans le développement des enrobés tièdes outre atlantique est le « European Scan tour » initié par la NAPA, FHWA, AASHTO (Association of State Highway and Transportation Officials) et NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) dont l'objectif est de recueillir des informations sur les pratiques européennes afin d'en favoriser l'implémentation aux Etats-Unis (D'Angelo, Harm et al. 2008). (Prowell et Hurley 2007) propose un historique détaillé de l'introduction des enrobés tièdes aux Etats-Unis.

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

D'importants efforts en termes de recherche sont actuellement en cours en Europe et aux Etats-Unis. Les sections in-situ se multiplient ainsi que les essais en laboratoire.

3.2 Terminologie et principes des enrobés tièdes

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

Nous comprendrons sous la dénomination d' « enrobés à faibles impacts » les enrobés tièdes (Warm Mix Asphalt - WMA), semi-tièdes (Half-Warm Mix Asphalt - HWMA) qui tous deux se confondent volontiers sous le vocable général d'enrobé tiède, ainsi que les enrobés à froid (Cold Mix Asphalt - CMA). Ces différents enrobés ont pour objectif d'abaisser la température d'enrobage, tout en conservant une maniabilité suffisante pour la mise en œuvre et le compactage. Il s'agit donc de trouver une méthode, avec ou sans ajout, permettant de maintenir artificiellement une bonne viscosité de l'enrobé durant la période de fabrication, de pose et de compactage. Ces procédés peuvent être classifiés selon différents paramètres tels que la température de fabrication, la consommation énergétique ou encore les

émissions. Un exemple de classification est donné dans la Figure 3-1, cette figure indiquant les ordres de grandeur de consommation de fioul et d'émissions de CO₂ en fonction du type d'enrobé. En considérant la température de fabrication, nous pouvons identifier les domaines suivants :

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

On peut observer la différence conséquente au niveau de la consommation énergétique (et des émissions) entre les enrobés tièdes et semi-tièdes. Le passage du palier de température de 100 °C est important d'un point de vue énergétique. La chaleur latente de vaporisation de l'eau est très élevée (2256 kJ/kg) comparativement à la chaleur massique de l'eau qui est de 4.186 kJ/kg.K. Ainsi, il faut environ 540 fois plus d'énergie pour vaporiser une certaine masse d'eau que pour augmenter la chaleur de cette même masse d'eau de 1 °C. Nous pouvons également relever que l'énergie nécessaire à chauffer le squelette minéral est environ 5 fois plus faible que celle nécessaire afin d'élever la température de l'eau qui est définitivement le plus gros consommateur d'énergie lors de la production d'enrobé. Ceci illustre la nécessité de travailler avec une humidité la plus faible possible des granulats (sables en particulier). Les gains en termes énergétiques pouvant être envisagés avec la fabrication d'enrobé semi-tièdes sont donc sensiblement plus importants que ceux obtenus avec des enrobés tièdes.

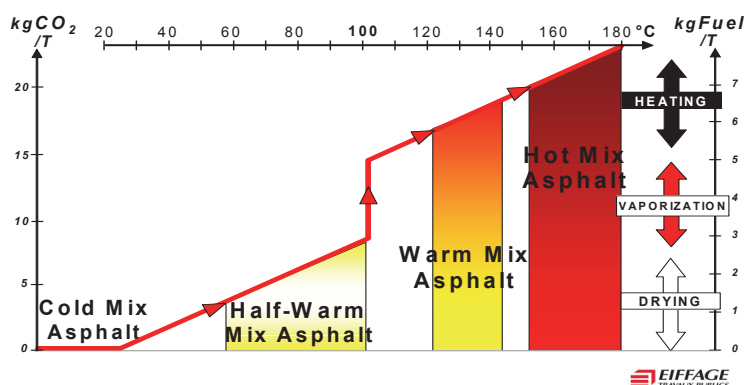


Figure 3-1 : Classification des différents types d'enrobés bitumineux (Source : LEA-Co/Eiffage T.P.)

Au niveau de la consommation de fioul, (Brosseaud et Sicard 2007) évaluent les gains à environ 1 l/t pour les enrobés tièdes et 1.5-3 l/t pour les procédés semi-tièdes, comparativement à un enrobé à chaud consommant 7 à 8 l/t. En ce qui concerne les émissions dans l'air, la réduction est estimée à environ 20% (CO₂, SO₂, NO₂), mais elle peut atteindre 50% selon les procédés. Ces aspects seront davantage détaillés au chapitre 6.

Le principe général de fabrication d'un enrobé à chaud consiste à chasser toute l'eau afin de garantir un enrobage parfait des granulats déshydratés avec le liant. Pour obtenir un séchage complet des minéraux, une température supérieure à 120 °C est nécessaire et l'adhésivité bitume-granulat est ainsi améliorée. Pour des enrobés à chaud, l'humidité résiduelle est en général inférieure à 0.5% à plus de 140-150 °C (Bonvallet 2001).

Le principe des enrobés tièdes consiste à abaisser la température de fabrication. La température étant moins élevée, il est indispensable de garantir une faible viscosité pour une bonne diffusion du bitume (enrobage suffisant) et une bonne maniabilité du mélange. Différents procédés vont permettre de maintenir la viscosité du liant suffisamment basse durant toute la période de fabrication, de pose et de

compactage. La classification entre les principes peut varier selon les auteurs. Nous proposons ici les familles d'enrobés tièdes suivantes:

- Catégorie A. Procédés recourant à une modification de la séquence d'enrobage ou enrobage séquentiel; sans modification des éléments du mélange.
- Catégorie B. Procédés basés sur l'introduction d'eau ou la maîtrise de la teneur en eau afin d'obtenir un moussage in-situ du bitume (appelé effet de "soupe" ou "moussabilité").
- Catégorie C. Procédés basés sur la chimie en agissant sur le liant ou la tension superficielle entre liant et granulat. Ceci comprend l'addition de substances chimiques ou naturelles ainsi que l'utilisation d'un liant de synthèse ou végétal.

Le développement d'enrobés tièdes fera appel à au moins un des principes ci-dessus.

Dans le cas d'enrobés à froid, le concept général est différent puisqu'il consiste à mélanger à température ambiante les granulats avec un bitume préalablement fluidifié, soit par solubilisation dans un solvant ou une huile légère, ou par mise en émulsion dans l'eau. Ces procédés concernent une gamme de performances moins élevées et ils ne seront pas considérés dans la recherche.

3.2.1 Catégorie A : Modification de la séquence d'enrobage

L'origine des procédés d'enrobage séquentiel se trouve dans la méthode KGO (Karl Gunnar Ohlson), développée dès 1976 pour les premiers essais. Le principe consiste tout d'abord à enrober les gros granulats (diamètre supérieur à 2 mm environ) avec la totalité du liant. Ensuite seulement, le reste des granulats, le sable et le filler sont ajoutés. Des variantes à ce procédé (KGO-II) dans lesquelles le filler est ajouté en même temps que le liant ont aussi été développées. L'apparition de la méthode KGO a notamment permis d'abaisser la température de production de 20-30 °C ainsi que diminuer la teneur en liant pour un taux de vides comparable à un enrobé traditionnel. Le mélange bitumineux s'avère ainsi financièrement plus intéressant. Les expériences rapportent également que l'enrobé apparaît plus homogène, avec une maniabilité et compactibilité améliorées. Avec cette technique d'enrobage, les problèmes de ségrégation fréquemment rencontrés ont pu être améliorés de même qu'une meilleure cohésion, tout en maintenant les propriétés mécaniques équivalentes voire meilleures (module, résistance à la traction) (Rode 1983; Ohlson 1988). Les désavantages potentiels se situent notamment au niveau de l'augmentation de la durée de malaxage.

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

3.2.2 Catégorie B : Introduction d'eau ou maîtrise de la teneur en eau

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

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

augmenter d'un facteur 1.67 lors de son passage en vapeur. La répartition du bitume et son adhésion sur l'ensemble des granulats est ainsi plus homogène.

3.2.3 Catégorie C : Procédés basés sur la chimie

Une première famille de procédés est basée sur l'addition de substances organiques à l'enrobé, permettant d'en abaisser la viscosité. La plupart des polymères et hydrocarbures reposent sur un squelette d'atomes de carbones traditionnellement noté C_x , le « x » correspondant à la longueur de la chaîne. Les additifs organiques dont il est question reposent en général sur des chaînes moléculaires de taille supérieure à C_{45} . Les paraffines peuvent être obtenues soit en raffinerie à partir du pétrole (distillation fractionnée en-dessus de 460 °C) ou alors comme sous-produit du procédé Fischer-Tropsch (ex. Sasobit®). Il existe des formes totalement artificielles et plus stables (Fischer-Tropsch) et des cires issues de matière naturelle retravaillée (cires Montan). Les paraffines cristallisent généralement entre 120 °C et 80 °C, modifiant ainsi le comportement du bitume de base par rigidification. La température de fusion de la cire sera régie par la longueur de la chaîne de carbones ; des chaînes longues augmentant la température de fusion. Le choix du type de cire (synthétique ou naturelle) et sa température de fusion sont des éléments primordiaux notamment afin d'éviter des déformations permanentes de l'enrobé aux températures de service. L'utilisation de cire et de liant modifié a été développée depuis la fin des années 1980. Les premières applications pratiques d'enrobés tièdes avec liants modifiés à la cire datent de 1996 (EAPA 2005).

Une seconde famille concerne les additifs d'ordre chimique. De nombreuses sortes existent et sont actuellement en cours de développement. Certaines agissent comme agent tensio-actif à l'interface liant-granat. D'autres réagissent chimiquement avec les molécules saturées du bitume contribuant ainsi à une meilleure adhésivité, cohésion et une bonne maniabilité.

3.3 Survol des technologies tièdes et semi-tièdes

Suivant les grands principes relatifs aux enrobés tièdes, de nombreux produits ont été développés. Ces développements sont principalement issus du secteur industriel, mais également d'universités ou organismes de l'Etat.

Le Tableau 3-1 contient un résumé indicatif de quelques produits utilisés pour la fabrication d'enrobé tiède. Les informations sont issues des sites internet de fabricants, fiches techniques ainsi que des publications suivantes : (Koenders, Bowen et al. 2000; Landa, Kneepkens et al. 2004; Larsen, Moen et al. 2004; Hurley et Prowell 2005; Hurley et Prowell 2005; Carbonneau, Henrat et al. 2006; Hurley et Prowell 2006; Sicard 2006; Bistor 2007; Kristjansdottir, Michael et al. 2007; Prowell et Hurley 2007; D'Angelo, Harm et al. 2008; Grampre, Leon et al. 2008; Middleton et Forfyflow 2009).

Dans ce tableau, la catégorie de procédé fait référence aux grandes catégories d'enrobés tièdes détaillées dans le chapitre 3.2. La rubrique « Additif » concerne les additifs ajoutés en plus des composants traditionnels de l'enrobé. Les enrobés utilisant un moussage ou une maîtrise de la teneur en eau nécessitent souvent un additif (fluxant ou dope d'adhésivité) ce qui peut sensiblement affecter le coût de production. Ce tableau qui ne se veut pas exhaustif est inspiré de (Bueche, Dumont et al. 2009) qui contient les détails et explications complémentaires relatives à la majorité des produits.

Les performances mécaniques et la durabilité de ces différents procédés seront discutées plus loin.

Tableau 3-1 : Comparatif d'enrobés tièdes et semi-tièdes

Cat.	Nom	Compagnie (Pays)	Additif	Températures		Gains potentiels
				Fabrication	Compactage	
A (C)	3E-LT®	Colas-Sacer (FRA)	Liant modifié	125 °C	80-110 °C	GES : 15-25%, énergie : 15-25%
A	3E-DM®	Colas (FRA)	Dope	125 °C	80-110 °C	GES : 20-25%, énergie : 30%
A	3E-DB®	Colas-Sacer (FRA)	non disponible	125 °C	80-110 °C	GES : 20-25%, énergie : 15-25%
B	Advera®	PQ Corporation (USA)	Zéolithe, evt. dope	non disponible	120 °C	CO ₂ , COV, SO _x , NO _x : max 60%
B	Aspha-min®	Eurovia (DEU)	Zéolithe	125-150 °C	100-130 °C	CO ₂ , SO ₂ , NO ₂ : 18-25%, énergie : 20%
B	Double Barrel Green®	Astec Industrie Inc. (USA)	Non	115-135 °C	105-115 °C	CO ₂ : 14-26%, énergie : 14-26%
C	Sasobit®	Sasol Wax (ZAF)	Cire	115-130 °C	80 °C	Energie : 30%, environnement : 20%
C	Asphatan B®	Romonta (DEU)	Oui	130-170 °C	non disponible	non disponible
C	Licomont BS 100® / Sübit®	Clariant (CHE)	Liant modifié	130-170 °C	80-100 °C	Pas d'infos publiées (2009)
C	Evotherm ET®	MeadWestvaco Asphalt Innov. (USA)	Oui	100-130 °C	60-115 °C	CO ₂ , SO ₂ : 40-60%, énergie: 55%
C	Greenseal®	Greenworld (LUX)	Oui	140 °C	105 °C	CO ₂ : 40-50%, énergie: 25-45%
C	Ecoflex®	SCREG (FRA)	Oui	120-130 °C	110-120 °C	GES: 2380 kg CO _{2,eq} /km, énergie: 21'000 MJ/km
C	Ecolastic®	SCREG (FRA)	Oui	120-130 °C	110-120 °C	GES: 2380 kg CO _{2,eq} /km, énergie: 21'000 MJ/km
C	Rediset WMX®	AKZO Nobel (NLD)	Oui	120 °C	non disponible	Fioul: 20%
C	Cecabase RT®	Ceca (Arkema) (FRA)	Oui	120 °C	90-100 °C	CO ₂ , CO, NO : 20-50%, énergie: 20-50%
C	Mexphalte RM®	Shell (NLD)	Non	170-180 °C	150-170 °C	non disponible
B	WAM-Foam®	Shell (NLD), BP (USA)	Evt. dope	100-120 °C	80-100 °C	CO ₂ : 30-40%, COV : 50-60%, énergie: 35%
B	EBE (LEA)®	Eiffage T.P., LEA-Co (FRA)	Evt. dope/ fluxant vég.	90 °C	60-90 °C	GES, NO _x : 50%, COV : 80%, énergie : 50%
B	EBT (LTA)®	Appia, Eiffage T.P.	Evt. dope/ fluxant vég.	90 °C	70-90 °C	CO ₂ : 35-50%, énergie : 35-50%
B	LT Asphalt®	Nynas (NLD)	Oui	90-95 °C	60 °C	Energie: 50%
B	LEAB®	BAM (NLD)	Oui	90 °C	non disponible	Energie: 30-40%

Nous pouvons mentionner encore en addition au tableau ci-dessus :

- Thiopave® (Shell) : Additif se présentant sous la forme de granules de soufre solides incluant de la cire (Fischer-Tropsch).

- SonneWarmix® (Sonneborn) : Additif pour la production d'enrobés tièdes et l'aide à la compaction.
- Hypertherm® (Coco Paving Inc.) : Additif pour bitume.
- Etima® (Malet) : Additif pour bitume.
- Revix® (Mathy techn. & Inc and Paragon technical services) : Additif (tensio-actif) provoquant une réduction de la tension interne entre granulat et liant.
- TLA-X® (Lake Asphalt of Trinidad and Tobago Ltd) : Additif pour liant permettant de modifier le grade du bitume afin de produire l'enrobé à des températures 15 à 30 °C plus basses.
- Aqua-Black® (Maxam) : Système d'injection d'eau pour moussage du bitume.
- Ultrafoam GX® (Gencor) : Système d'injection d'eau pour moussage du bitume.
- Aquafoam® (Reliable) : Système d'injection d'eau pour moussage du bitume.
- Meeker Warm Mix Foam® (Meeker) : Système d'injection d'eau pour moussage du bitume.

En l'état actuel, l'offre pour la fabrication des enrobés tièdes est en développement et évolution perpétuelle avec l'apparition, mais aussi la disparition continue de produits.

3.4 Considérations générales sur les enrobés tièdes

3.4.1 Type de couche

De manière générale et selon les différentes expériences recueillies, les enrobés tièdes peuvent être utilisés pour toutes les couches de chaussée. Ils seront cependant de préférence destinés aux couches de roulement ainsi qu'aux couches de base ou de liaison. C'est pour ces couches que le potentiel d'économie est le plus important. Les couches de base représentent le volume annuel le plus important (54% du tonnage annuel suisse 2007 selon (EAPA 2007)), alors que les couches de surface sont changées à une fréquence plus élevée. L'utilisation de ces enrobés en couche de base requiert de hautes performances mécaniques afin de résister aux différentes sollicitations.

La majorité des procédés tièdes et semi-tièdes permettent de produire les différents types de béton bitumineux: traditionnels, enrobés drainants, macro-rugueux, béton bitumineux grenu à forte teneur en mastic (SMA-Stone Mastic Asphalt), etc.

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

3.4.2 Considérations économiques

Nous considérons ici uniquement le processus unitaire de la fabrication en centrale. Une analyse détaillée sur le cycle de vie est effectuée dans la suite de la recherche (chapitres 7 et 8).

Les coûts additionnels pour le producteur d'enrobés peuvent résulter des modifications de la centrale, de l'achat d'un additif ou des coûts relatifs à la patente si applicable. Sur cette base et considérant les économies potentielles, le producteur peut ensuite évaluer la rentabilité du procédé pour son installation.

Les procédés avec ajout d'un **additif** dans le bitume sont ceux qui nécessitent le moins de modifications de la centrale. Lors d'essais exploratoires, ils peuvent même être produits sans aucune modifications, l'additif étant inséré manuellement, par la trappe à fibres par exemple. Pour une production industrielle de l'enrobé tiède, les modifications suivantes seront nécessaires (variable selon le type de centrale) :

- Ajout d'une cuve de stockage

- Ajout d'une ligne à bitume
- Ajout d'un doseur volumétrique (débitmètre)
- Calibration du brûleur

De telles modifications laissent au producteur une certaine flexibilité et le choix de changer son type d'additif lorsqu'il le souhaite. Selon le procédé choisi, il est également possible d'acheter le liant directement modifié et ainsi s'affranchir de ces modifications en centrale. Le cas échéant une nouvelle cuve à bitume pourrait s'avérer nécessaire. La stabilité et le temps de conservation du liant modifié doivent aussi être pris en considération.

Les procédés recourant à un **moussage** du bitume ou la maîtrise de la teneur en eau nécessitent des investissements plus importants. Le moussage du bitume (WAM-Foam® par exemple) demande l'installation d'une unité de moussage avec un système spécifique d'injection d'eau pour fabrication de la mousse. De plus, l'augmentation de volume du bitume moussé (20 à 25 fois) est à prendre en considération. Les procédés recourant à une maîtrise de la teneur en eau (LEA® par exemple) nécessitent un système de contrôle de l'humidité (sonde hygrométrique), couplé avec un système d'injection d'eau (débitmètre et système d'arrosage) ainsi que des appareils de mesure de la température. Le mode d'introduction du sable humide doit aussi être ajusté (tapis roulants). Ces différents procédés vont également nécessiter une modification ou adaptation du système de commande de la centrale.

Le prix des modifications en centrale est variable :

- Une ligne à bitume coûte approximativement 40 kCHF (état 2011, centrale discontinue Suisse).
- Une unité de moussage Double Green Barrel® coûte environ 115 k\$ (état 2008, USA).
- (Kristjansdottir, Michael et al. 2007) indique des coûts de modification de la centrale et d'installation de 30-70 k\$ pour le WAM-Foam® et de 0-40 k\$ pour l'Aspha-min® et la cire Sasobit®.
- (Middleton et Forfylow 2009) rapporte des coûts de modification de la centrale inférieurs à 5 k\$ pour l'Evotherm® et entre 100-120 k\$ pour le procédé Double Green Barrel®.
- (Bueche, Dumont et al. 2009) indique des coûts de modification de la centrale de 75-100 k\$ pour la mise en place de l'enrobé LEA®.

L'achat des additifs n'est pas à négliger lors de l'analyse des coûts de production des enrobés tièdes. Les quantités d'additifs nécessaires sont variables. Elles peuvent aller de moins de 0.5% de la masse de bitume (agents tensio-actifs) à quelques pourcents de la masse de bitume (4-6% pour une cire par exemple). Le prix des additifs est variable. (Bueche, Dumont et al. 2009) rapporte par exemple un prix de 1.35 \$/kg pour la zéolithe Advera® et 5.20 CHF/kg pour la cire Sasobit®. Le Cecabase RT 945® est vendu au prix de 5.15 €/kg (prix Ceca 2010). Le prix des additifs peut sensiblement varier d'un pays à l'autre ainsi que d'une année à l'autre. La réduction du prix de l'additif est l'un des principaux axes de recherche des fournisseurs. On peut observer que les technologies ne nécessitant pas (ou peu) de modifications en centrale d'enrobage demandent l'achat d'un additif. Par contre, les technologies recourant à un moussage du bitume ou maîtrise de la teneur en eau ne demandent généralement pas d'additif.

Selon les technologies, le coût de la licence pour l'utilisation d'un procédé est à ajouter. (Kristjansdottir, Michael et al. 2007) indique un coût pour le WAM-Foam® de 15 k\$ pour la première année, 5 k\$ par centrale et année, ainsi que 0.30 \$ par tonne d'enrobé.

Ces différents coûts sont à mettre en balance avec les bénéfices ou économies potentielles. Les bénéfices directs majeurs sont en termes d'énergie et de diminution des émissions. (Kristjansdottir, Michael et al.

2007) propose un exemple de calcul (Islande et Hawaii). L'auteur démontre que dans le cas de gains énergétiques de l'ordre de 50% et avec un coût élevé de l'énergie, les gains financiers peuvent alors compenser les coûts additionnels. De manière générale les enrobés tièdes vont s'avérer légèrement plus chers à la production qu'un enrobé à chaud dans une première phase. Les économies sur le fioul ou le gaz naturel (20 à 30 centimes par tonne) ne permettent pas de compenser les dépenses supplémentaires liées à l'ajout d'additifs. Cependant, avec la multiplicité des procédés devant engendrer la baisse de leurs coûts associés, cet équilibre pourrait dans le futur basculer favorablement aux technologies tièdes. L'apport de matériaux de recyclage et le recours à des technologies semi-tièdes devraient permettre de déplacer davantage encore cet équilibre en faveur des enrobés tièdes.

Dans le cas de la Suisse, l'utilisation d'enrobés tièdes en lieu et place d'enrobés à chaud permet également de diminuer voir supprimer les taxes CO₂ pour le producteur. Selon la loi (Loi 1999) une « Exemption des entreprises qui ont pris un engagement formel selon l'art. 9 de la loi » est envisageable sous certaines conditions.

3.4.3 Remise en service

Le temps nécessaire avant remise sous circulation des chaussées est parfois cité comme caractéristique relative aux enrobés tièdes. Les technologies tièdes permettent un compactage à une température plus faibles que les enrobés à chaud et donc une remise en service potentiellement plus rapide selon les cas. Pour autant qu'un temps de cure ne soit pas nécessaire, ceci est un avantage considérable par exemple dans le cas de chaussées d'aéroports (aéroports Logan Boston, Francfort et Doha avec utilisation de cire) ou routes à fort trafic.

La remise en service plus rapide dépend de la technologie tiède utilisée et de l'évolution de la viscosité de l'enrobé en fonction de la température. La Figure 3-2 illustre le refroidissement d'un enrobé de référence à chaud (enrobé à module élevé EME) et d'un enrobé tiède ET-C (cire Sasobit®). Ces mesures ont été effectuées dans la halle d'essai en vraie grandeur des infrastructures routières du Lavoc ($T_{\text{air}}=18-22\text{ °C}$). Chaque série de données correspond à une sonde de température Pt100.

Le gradient de température initial est plus élevé pour l'enrobé à chaud. Il n'y a pas de gradient de température constant lors du processus de refroidissement donc, après 4 heures environ, la température dans les enrobés est sensiblement comparable. La remise sous circulation sera dépendante de la température bien sûr, mais surtout de la viscosité de l'enrobé à cette température. L'ajout de cire augmente la viscosité du mélange lorsque la cire est solidifiée et permet ainsi d'envisager une réouverture plus rapide de la section qu'avec un enrobé à chaud traditionnel. Ceci n'est pas généralisable à tous les procédés tièdes.

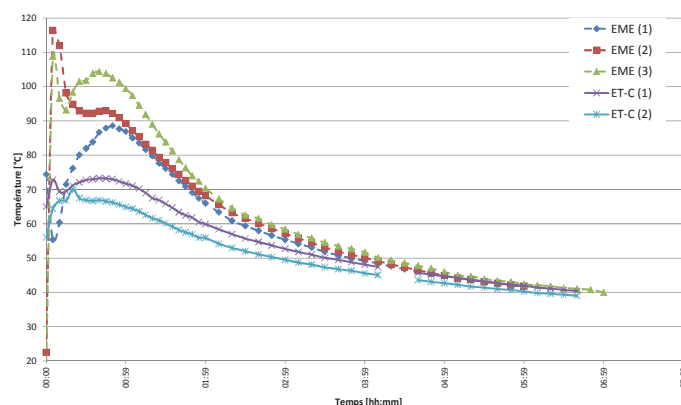


Figure 3-2 : Evolution de la température lors de la pose : Enrobé à chaud (EME) et enrobé tiède avec cire (ET-C)

La remise en service de chaussées avec enrobé tièdes est largement discutée. Cette problématique nécessite d'être approfondie et ceci particulièrement dans le cas des enrobés tièdes avec eau ou maîtrise de l'humidité. La remise sous trafic dépend également du type de couche considérée. Des règles d'applications doivent être élaborées.

3.5 Avantages et potentiel des enrobés tièdes

Les enrobés tièdes permettent une diminution de la température de production de 20 °C à 70 °C (Tableau 3-1). Les avantages suivants sont couramment admis :

- Diminution de la consommation d'énergie (et des coûts énergétiques) à la centrale d'enrobage de l'ordre de 10% à 30%, parfois 50%. Cette diminution dépend du type de centrale, du brûleur (énergie utilisée et calibration), de l'humidité des granulats et de la température extérieure.
- Diminution des émissions à la centrale d'enrobage avec des impacts positifs sur l'environnement et la santé des travailleurs. La diminution des émissions (nocives et non nocives) est de l'ordre de 30 à 40% pour le CO₂ et SO₂, 50% pour les COV, 10 à 30% pour le CO. La diminution n'est pas directement proportionnelle à la réduction de consommation énergétique. Elle dépend également de la calibration du brûleur de la centrale (voir chapitre 6).
- Réduction de la viscosité du mélange, améliorant sa maniabilité et compactibilité.

Ces différents aspects seront considérés dans cette recherche par une analyse des performances en laboratoire et une méthode multicritère de choix de la technologie, basée sur un inventaire du cycle de vie.

D'autres avantages potentiels sont parfois mentionnés. Ces éléments peuvent être discutables et ils ne sont pas généralisables, mais ils démontrent la variété de l'offre pouvant être atteinte avec les technologies tièdes :

- Temps de stockage plus important, distance de transport plus élevée tout en conservant une bonne maniabilité.
- Pose à des températures de l'air plus basses que pour des enrobés à chaud traditionnels.
- Diminution de la gêne pour les ouvriers et des risques (risque de brûlure, sensation de chaleur, diminution/disparition des fumées, diminution/disparition des odeurs).
- Energie de compactage plus faible que pour les procédés à chaud. Ceci n'est pas unanimement reconnu pour tous les procédés et dépend entre autre de la recette ainsi que de la température de l'enrobé.
- Possibilité d'insérer un taux plus important de fraisat d'enrobé que pour des enrobés à chaud. Ceci peut être expliqué par la viscosité plus faible du mélange et le vieillissement moins important du liant permettant de prolonger la durée de service sans soucis de fissuration.
- Possibilité de remise sous circulation plus rapide.
- Préservation des qualités mécaniques.
- Meilleur potentiel de recyclabilité qu'un enrobé à chaud.
- Diminution de la teneur en liant (effet de l'additif et substitution d'une partie du liant).
- Réduction des salissures sur le matériel.

3.6 Performances mécaniques des enrobés tièdes

Une étude de la littérature relative aux performances mécaniques des enrobés tièdes est proposée ici. Les aspects énergétiques, environnementaux et autre cycle de vie seront discutés dans les sections concernées. Le domaine étant en pleine expansion, le nombre de publications concernant les procédés tièdes et semi-tièdes augmente de manière exponentielle. Dans cette section, une présentation des

conclusions principales de quelques recherches représentatives est effectuée ; on pourra également consulter (Bueche, Dumont et al. 2009). Les essais mentionnés et également utilisés dans notre recherche sont décrits en Annexe A.

Différents auteurs s'intéressent à la comparaison entre les types d'enrobés tièdes. Cette méthode sera également suivie au chapitre 4 relatif à l'analyse performantielle en laboratoire.

(Al-Rawashdeh 2008) propose une analyse de trois enrobés tièdes (Evotherm[®], Sasobit[®] et Aspha-min[®]) pour lesquels un essai de traction indirecte est utilisé afin de déterminer la résistance ainsi que le coefficient de Poisson. Ces essais réalisés à basse température (0 °C, -10 °C, -20 °C) mettent en évidence le meilleur comportement de l'enrobé à l'Aspha-min[®] qui présente le risque de fissuration le moins important. L'enrobé avec additif Evotherm[®] montre quant à lui des performances proches du mélange de référence à chaud alors que l'enrobé avec cire Sasobit[®] obtient la rigidité la plus élevée et le fluage le plus faible. Au regard des différents essais réalisés ainsi que d'essais en vraie grandeur, l'auteur identifie l'Evotherm[®] et l'enrobé à l'Aspha-min[®] comme les plus proches du mélange de référence à chaud pour ce qui est des performances mécaniques évaluées.

(Sheth 2010) effectue une analyse en laboratoire de différents enrobés tièdes : Cecabase RT[®], Advera[®] et Aspha-min[®]. Sur la base des essais réalisés (traction indirecte, orniérage, module), l'auteur obtient des performances globalement comparables à la référence à chaud avec l'additif Aspha-min[®], les autres enrobés tièdes montrant des performances moins élevées. Nous pouvons relever que pour la sensibilité à l'eau les différents enrobés tièdes présentent un ratio ITSR inférieur à 50% ; ce résultat très faible est à relativiser car le mélange de référence à chaud obtient des résultats que légèrement supérieures (ratio ITSR de 72%).

Dans le cadre de son Master, (Zaumanis 2010) réalise des essais sur bitume et enrobé avec cire Sasobit[®] et agent tensio-actif Rediset WMX[®]. Les résultats d'essais sur liants (pénétration, température anneau et bille T_{AB}, viscosité dynamique, indice de pénétration) indiquent un effet modéré de l'ajout de Rediset WMX[®] sur les caractéristiques de base du liant, contrairement à la cire qui modifie significativement les propriétés. Les mesures rhéologiques (rhéomètre à cisaillement dynamique - DSR) confirment l'effet des additifs avec une augmentation significative du module de cisaillement complexe G* et diminution de l'angle de déphasage du liant une fois la cire cristallisée. L'auteur réalise également des essais sur enrobé (module de rigidité, fluage dynamique) après un temps de cure de 2 h et 4 h. Les résultats montrent pour l'ensemble des mélanges (y-compris la référence à chaud) une augmentation du module de rigidité lors des quatre premières heures. L'ampleur de cette augmentation de rigidité est fonction du type d'enrobé et de sa température de fabrication. Dans ses conclusions, l'auteur recommande des essais sur le long terme afin d'analyser l'éventuelle évolution des performances, ainsi qu'une évaluation plus approfondie de la sensibilité à l'eau et des performances à basses températures.

(Wasiuddin, Selvamohan et al. 2007; Wasiuddin, Selvamohan et al. 2007) propose une analyse comparative des enrobés tièdes avec additif Sasobit[®] et Aspha-min[®]. Les essais rhéologiques sur liant (DSR) entre 135 °C et 180 °C mettent en évidence la diminution de viscosité avec la cire, réduisant ainsi la température de fabrication de 16 °C. L'Aspha-min[®] modifie très peu le comportement rhéologique du liant et par conséquent la température de fabrication n'est presque pas diminuée (< 5 °C). Les résultats indiquent pour l'enrobé avec Sasobit[®] une amélioration de la stabilité et de la résistance aux déformations dans le domaine des températures de service élevées. L'ajout de cire démontre également un effet plus important sur la réduction de l'ornièr (Asphalt Pavement Analyzer – APA et mesures rhéologiques) comparativement à l'utilisation d'Aspha-min[®], cet effet étant fonction de la quantité d'additif. Une analyse comparative d'enrobé à l'Aspha-min[®] et d'enrobé avec cire Sasobit[®] est également proposée dans la thèse (Gandhi 2008) qui met en évidence le domaine d'action différent de ces additifs.

L'auteur illustre notamment que dans les 60 à 90 minutes suivant l'ajout de l'additif, le liant modifié à l'Aspha-min® présente une viscosité (120 °C et 135 °C) plus élevée que le liant de base en raison de la diminution de l'effet de mousse. Les mesures rhéologiques indiquent un vieillissement plus faible des liants dans le cas des enrobés tièdes et elles mettent en évidence l'importance du type de liant de base.

L'augmentation de la susceptibilité à l'eau dans les enrobés tièdes (avec enrobé recyclé) est illustrée par la réalisation d'essais d'orniérage en conditions humides (Hamburg Wheel Tracking Device - HWTD) sur enrobés avec Sasobit® et Advera® (zéolithe) (Austerman, Mogawer et al. 2009). Dans le cas étudié, les enrobés avec cire Sasobit® présentent une meilleure résistance à l'humidité que les enrobés avec Advera®. Des mesures de viscosité (105 °C à 165 °C) et de classification Superpave des liants (Performance Grade - PG) indiquent également que l'ajout d'Advera® ne modifie pas significativement le liant de base.

Le National Center for Asphalt Technology (NCAT) de l'université d'Auburn a effectué d'importantes études des enrobés tièdes. Une analyse des enrobés avec ajout de cire Sasobit® (Hurley et Prowell 2005) rapporte une meilleure compactibilité des enrobés tièdes (jusqu'à 88 °C) comparativement à la référence à chaud, ce qui selon les auteurs pourrait éventuellement permettre de diminuer la teneur en liant. Les résultats indiquent une diminution de la température d'équivalent de compactage de 18 °C par rapport à la référence à chaud. Par ailleurs, la susceptibilité à l'orniérage (APA) et le module résilient mesuré à 23 °C ne semblent pas affectés par l'ajout de cire. L'augmentation potentielle de la susceptibilité à l'orniérage et une éventuelle sensibilité à l'humidité en raison de la diminution de la température de fabrication (séchage incomplet) et du vieillissement plus faible du liant sont cependant soulevés. Les essais réalisés sur enrobé avec ajout de zéolithe (Hurley et Prowell 2005) amènent à des conclusions semblables. De plus, un temps de cure avant réouverture au trafic n'est pas observé. Les essais menés par les mêmes auteurs sur enrobé tiède avec émulsion Evotherm® (Hurley et Prowell 2006) conduisent globalement à des conclusions similaires que pour l'utilisation de cire et de zéolithe.

Une étude de l'effet sur le liant (Performance Grade - PG) de la cire Sasobit® et de sa teneur est proposée par (Carter, Mainardis et al. 2010), mettant en évidence les limites d'utilisation de la cire pour les climats froids. Les auteurs évaluent également la combinaison du procédé semi-tiède LEA® avec l'ajout de cire Sasobit®, dans le but de réduire davantage la température de fabrication et compactage. L'analyse de compactibilité à la presse à cisaillement giratoire (PCG) indique que le mélange LEA®/Sasobit® peut être compacté jusqu'à une température de 80 °C, tout en respectant les exigences de teneur en vides.

Nous pouvons finalement mentionner (Damm, Bielenberg et al. 2006) qui effectue le suivi de 7 sections tests (Sasobit®, Licomont®, Asphaltan B®, Aspha-min®) ayant une durée de service comprise entre 3 et 6 ans. Par rapport aux références, les différentes sections montrent des performances identiques voire légèrement plus faibles pour la résistance à l'orniérage et le post-compactage. Le comportement à basse température, le vieillissement du liant et la résistance à l'humidité sont également comparables voire légèrement supérieurs pour les sections d'enrobé tiède ; la résistance aux hautes températures étant améliorée.

Enrobés avec cire

Les enrobés avec cire sont parmi les technologies les plus utilisées pour la fabrication des enrobés tièdes. Nous présentons certaines conclusions de recherches jugées significatives.

De nombreux types de cires existent : naturelles, artificielles ou partiellement artificielles. Dans son travail de doctorat, (Wagner 2010) effectue une analyse en laboratoire de trois cires (Fischer-Tropsch - FT, amide, montan) et différents dosages. Six liants de base sont analysés, la moitié étant des bitumes de

distillation directe et l'autre moitié des liants modifiés aux polymères. Les essais sur liants montrent pour les différentes cires une nette diminution de la pénétration (25 °C) ainsi qu'une augmentation de T_{AB} . Le durcissement le plus important est obtenu avec la cire Fischer-Tropsch. L'ampleur de la modification de comportement n'est pas directement proportionnelle à la teneur en cire, le dosage idéal se situant entre 2% et 4%. La diminution de viscosité lors de la fusion de la cire est également observée, ceci particulièrement pour la cire FT. Cette diminution de viscosité se fait à des températures plus élevées pour la cire amide (120-130 °C) en raison de sa haute température de fusion (141 °C), ce qui peut engendrer des problèmes lors de la pose et du compactage (rigidification du mélange). Le comportement à basse température des liants avec cire est altéré par une capacité de relaxation plus faible, en particulier pour les cires FT et montan. Cet effet est visible par l'analyse du Performance Grade (voir chapitre 4.9.1). Cependant, la perte au niveau du comportement à « basse » température est moins importante que le gain au niveau du comportement à « haute » température. Les essais sur enrobés corroborent les résultats obtenus sur liants, avec entre autre une amélioration de la résistance à l'orniérage (en particulier avec cire FT) et un accroissement du risque de fissuration à basses températures. Les cires amides présentent le comportement le moins affecté à basse température. (Wagner, Wistuba et al. 2008) fournit des résultats détaillés pour la cire FT. Dans la gamme de températures de pose (120 °C à 150 °C), des diminutions de viscosité de l'ordre de 30% pour un liant 70/100 et 40% pour un liant modifié aux polymères sont mesurées. Le comportement à température intermédiaire (46 °C à 82 °C) et basse température (-24 °C à -6 °C) est discuté dans (Wagner, Stangl et al. 2008). A température intermédiaire, la diminution de l'angle de déphasage et l'augmentation du module de cisaillement complexe G^* lors des essais rhéologiques sur liants avec cire FT sont observés. L'ajout de 6% de cire à un liant 70/100 augmente le module complexe G^* d'un facteur environ 35 à la température de 82 °C.

La recherche (Soenen, Tanghe et al. 2008) propose l'investigation de 10 différents cires commerciales. Une évaluation des cires par calorimétrie différentielle à balayage (Differential Scanning Calorimetry - DSC) met en évidence les températures de fusion et cristallisation ainsi que les différences de comportements, identifiables selon la forme des signaux de cristallisation, leur intensité et le nombre de pics. Certaines cires dont le processus de cristallisation n'est pas terminé en-dessous de 60 °C peuvent péjorer le comportement mécanique de l'enrobé. Les mesures DSC montrent également l'interaction de la cire avec le bitume, diminuant sensiblement la température de cristallisation de la cire. La différence modérée de viscosité entre liants additivés et bruts dans le domaine des températures de pose et de compactage peut être exprimée en termes de température d'équiviscosité. La différence au niveau de la température d'équiviscosité (1 Pa·s) obtenue est de maximum 6 °C. Afin d'augmenter cette différence de température, on pourra recourir à un liant plus mou ou augmenter la teneur en cire. Nous pouvons encore relever la mise en évidence de la sensibilité accrue à la déformation appliquée des liants modifiés avec cire (essais rhéologiques). Par conséquent, le domaine de comportement newtonien est limité aux faibles niveaux de déformations, comparativement aux liants non modifiés pour lesquels le palier linéaire est sensiblement plus large. Sur la base de la viscosité, une méthode pour l'estimation de la diminution de température en fonction du type de liant (pénétration) et de la teneur en cire est proposée.

Nous pouvons encore relever les travaux de Y. Edwards (KTH, Suède) relatifs à l'utilisation de cires dans les enrobés. Dans (Edwards 2009) et (Edwards 2008) l'auteure propose notamment une analyse des cires commerciales FT (Sasobit®) et montan (Asphaltan B®). La recherche illustre l'influence du type de bitume de base et de sa structure chimique sur l'effet de la cire. Les résultats démontrent également la rigidification du liant entre 100 °C et 5 °C, avec en règle générale un effet plus grand pour les cires FT que pour les cires montan. A basse température, la température de rupture de l'éprouvette lors de

l'essai de retrait thermique empêché (TSRST – Thermal Stress Restrained Specimen Test) augmente avec l'utilisation des cires (environ 2 °C), péjorant légèrement les performances du liant. Le comportement du liant vieilli n'est pas (ou marginalement) influencé positivement par l'ajout de cire. Dans (Edwards, Tasdemir et al. 2010), l'effet de la cire sur les bitumes modifiés aux polymères (styrène-butadiène-styrène, SBS) utilisés pour des enrobés grenus à forte teneur en mastic est discuté. Selon l'auteure, jusqu'à une teneur en cire de 4%, la diminution de résistance à basse température ne met pas significativement en danger la résistance de la chaussée.

Enrobés avec ajout ou maîtrise de la teneur en eau

De nombreuses recherches ont été menées, analysant la zéolithe sous ses différentes formes. (Visscher, Vervaecke et al. 2008; Visscher, Vervaecke et al. 2010) évalue l'ajout de différents types et quantités de zéolithe dans un enrobé (AC 0/10). Les zéolithes se distinguent par leur capacité à stocker de l'eau (structure cristalline) ainsi que leur granulométrie. Une étude à la presse à cisaillement giratoire (PCG) met en évidence la diminution de compacité avec la diminution de la température de compactage, permettant d'évaluer la réduction de température de compactage pouvant être atteinte. Pour les enrobés avec zéolithe synthétique spécifique pour chaussées routières (teneur 0.3%), cette température peut être réduite à 120 °C. L'analyse du comportement à basse température (TSRST) ainsi que la sensibilité à l'orniérage ne mettent pas en évidence de comportement altéré des enrobés tièdes (Visscher, Vervaecke et al. 2010). Les essais réalisés illustrent également l'effet de l'humidité initiale des granulats (0.3 à 0.9%) sur les performances de l'enrobé. La résistance à la traction indirecte ainsi que la sensibilité à l'eau (ratio ITSr) sont affectés par l'utilisation de granulats humide comparativement à des granulats totalement secs tel qu'utilisés traditionnellement en laboratoire.

(Barthel, Marchand et al. 2004) rapporte les résultats d'une expérience in-situ avec utilisation de zéolithe synthétique (Aspha-min®) à un taux de 0.3%. L'enrobé fabriqué à 130-145 °C a ensuite été compacté jusqu'à une température de 100 °C, tout en maintenant une bonne maniabilité et une compacité comparable à la référence à chaud, voire meilleure. Les auteurs présentent de nouveaux résultats en laboratoire et in-situ dans (Marchand, Soliman et al. 2008).

L'adhésion entre le liant et les granulats des enrobés à la zéolithe (0.3% de la masse totale) est analysée par (Vasconcelos, Bhasin et al. 2010) qui étudie la matrice fine d'un enrobé (mélange de granulats < 1.8 mm et de liant). L'humidité résiduelle contenue dans les particules de zéolithes est dépendante de la température de fabrication. Les résultats obtenus (mesure de l'énergie d'adhésion par microcalorimétrie) indiquent que l'humidité résiduelle à la surface des granulats lors de fabrications à des températures réduites ne contribue pas significativement à la réduction des performances mécaniques observées (module de cisaillement et résistance à la fatigue). Les auteurs mentionnent aussi l'importance des granulats et de leur porosité sur le comportement des enrobés contenant de la zéolithe.

Une expérience avec le procédé Double Green Barrel®, consistant en une unité de moussage, est discutée par (Middleton et Forfyflow 2009). L'enrobé posé in-situ a été produit à une température de 130-135 °C, des mélanges tièdes avec granulats d'enrobé recyclé (Reclaimed Asphalt Pavement – RAP) à des taux de 15% et 50% étant également évalués. Les résultats indiquent pour les enrobés tièdes un vieillissement plus faible du liant récupéré que le vieillissement RTFOT utilisé traditionnellement. Les différents mélanges ne présentent pas de susceptibilité accrue à l'orniérage (APA). L'ajout de 15% de RAP n'affecte pas le module résilient mesuré (5 °C, 25 °C, 40 °C), alors que la sensibilité à l'eau est améliorée par l'addition de RAP. La faible sensibilité à l'eau des enrobés tièdes est liée à l'humidité résiduelle très basse du mélange enrobé (0.1%). (Wielinski, Hand et al. 2009) rapporte également des résultats d'expérience de deux planches in-situ avec le même procédé Double Green Barrel®. Dans cette étude, le

vieillessement plus faible du liant engendre une diminution de la rigidité et une susceptibilité légèrement supérieure à l'orniérage ainsi qu'à l'humidité. Les différences restent cependant réduites et le comportement de l'enrobé satisfaisant.

L'enrobé WAM-Foam® est présenté pour la première fois dans (Koenders, Bowen et al. 2000) qui rapporte les essais de faisabilité. Des résultats de premières expérimentations réalisées en 1999 et 2000 sont présentés par (Koenders, D.A.Stoker et al. 2002). Les essais réalisés en laboratoire montrent une teneur en vides, résistance aux déformations permanentes (fluage dynamique) ainsi que résistance à l'abrasion comparables à l'enrobé de référence à chaud. Des essais de fluage dynamique sur des carottes prélevées 6 semaines après la pose de sections tests indiquent une résistance légèrement moins élevée que pour les mélanges fabriqués en laboratoire. Les résultats de diverses productions in-situ de WAM-Foam® sont discutés dans (Larsen, Moen et al. 2004). Ces expériences indiquent globalement une compacité et résistance à l'orniérage similaires aux sections de contrôle. Le module de rigidité, la fatigue (Nottingham Asphalt Tester-NAT) et la planéité longitudinale sont également comparables à l'enrobé de référence.

(Gaufrey, Olard et al. 2007) analyse l'influence de la température (20 °C, 70 °C, 90 °C) et de l'humidité initiale (1% à 7%) des granulats sur la qualité du mélange et les performances mécaniques d'un enrobé semi-tiède et d'un enrobé à froid avec moussage du bitume. Les résultats de la recherche montrent l'influence de l'humidité initiale des granulats sur la qualité de l'enrobage. Le module complexe et la sensibilité à l'eau sont largement affectés par une humidité résiduelle trop élevée. L'augmentation de la température initiale des granulats permet finalement d'améliorer la compactibilité, diminuer la sensibilité à l'eau et augmenter le module complexe des enrobés à la mousse.

Développés plus récemment, les enrobés avec maîtrise de la teneur en eau LEA® sont actuellement largement utilisés en Europe (France, Espagne) et aux Etats-Unis. (Romier, Audéon et al. 2006; Romier, Audéon et al. 2006) présente les fondements et caractéristiques de la technologie ainsi que les premiers résultats de laboratoire et in-situ. Les résultats indiquent une résistance à l'orniérage (simulateur de trafic), une sensibilité à l'eau et une compacité PCG comparables au mélange de référence à chaud. (Olard, Noan et al. 2008) présente notamment une analyse spécifique de la formulation et de la sensibilité à l'eau des enrobés semi-tièdes LEA®. La formulation proposée montre une maniabilité (maniabilimètre Nynas), compactibilité et résistance à l'orniérage semblables à l'enrobé de référence à chaud. L'enrobé LEA® est moins performant que la référence pour la sensibilité à l'eau (essai Duriez), le ratio étant de 84% (98% pour la référence). Un plan factoriel réduit d'expérimentation de l'humidité initiale des granulats, de la teneur en RAP et du liant utilisé est également réalisé afin d'optimiser la résistance à l'humidité des mélanges. (Sauzéat, Benedetto et al. 2008) évalue le comportement en fatigue des différents types d'enrobés LEA® par un essai de traction-compression sur éprouvettes cylindriques. L'enrobé LEA2® avec additif est le plus performant des procédés semi-tièdes testés, les performances étant proches de la référence à chaud. Les autres mélanges s'avèrent moins résistants à la fatigue. Relevons cependant des performances générales très faibles de l'ensemble des enrobés évalués dans cette recherche ($\epsilon_6=52.5 \mu\text{m}/\text{m}$ pour la référence à chaud).

Nous pouvons encore mentionner les travaux de K. J. Jenkins (Jenkins 2000) qui s'intéresse au moussage du bitume par une étude détaillée du phénomène et notamment la proposition d'un indice de caractérisation de la mousse (Foam Index). L'auteur considère principalement les enrobés à froid ainsi que certains enrobés semi-tièdes (température de fabrication entre 40 °C et 90 °C). Il effectue également une analyse relative à la formulation des mélanges avec moussage du bitume.

Enrobés avec additif chimique

Le développement des additifs chimiques pour la production d'enrobé tiède a démarré plus tard que les procédés avec eau ou ajout de cire, mais le nombre d'additifs existants a très rapidement augmenté.

(Grampre, Leon et al. 2008) analyse l'additif Cecabase RT®. Des essais réalisés in-situ en 2005 indiquent une teneur en vides légèrement supérieure à l'enrobé de référence à chaud (1.2%), des mesures de macro-texture (technique volumétrique à la tache) ne mettant pas en évidence de différences significatives entre les enrobés. Les essais de compression simple en laboratoire montrent une résistance plus faibles des enrobés tièdes, avec une diminution de la force à la rupture. Dans (Gonzalez, Ligier et al. 2009), les mesures de viscosité ainsi que essais de caractérisation démontrent que l'additif ne modifie pas (ou marginalement) le bitume de base (modifié ou non). L'auteur analyse l'effet de l'additif par des essais sur enrobé (essai Marshall, maniabilité par mesure de couple, orniérage) ; l'enrobé tiède (120 °C) montrant des performances équivalentes à la référence à chaud. Il rapporte également une amélioration de l'adhésion bitume-granulat sur la base de résultats de sensibilité à l'eau. L'additif Cecabase RT® est également analysé dans (Gonzalez-León, Grampre et al. 2009) qui effectue des mesures rhéologiques sur bitume illustrant l'absence de modification du PG par l'ajout de l'additif. La compacité (PCG), teneur à l'eau et sensibilité à l'orniérage montrent des performances de l'enrobé tiède comparables à la référence à chaud. Différentes expériences in-situ sont également mentionnées afin d'illustrer les domaines d'applicabilité (matériaux recyclés, types de liants).

(Kvasnak, West et al. 2009) effectue une analyse de sensibilité à l'eau des enrobés tièdes (15% RAP) fabriqués avec l'émulsion Evotherm DAT®, par la réalisation d'essais de traction indirecte (ratio ITR et calcul de l'énergie absorbée) et d'essai d'orniérage en conditions humides (HWDT). Globalement, les enrobés de référence à chaud montrent une plus faible sensibilité à l'eau que les enrobés tièdes. Pour un mélange identique et une compacité comparable, les enrobés tièdes fabriqués en laboratoire possèdent des performances moins élevées à la traction indirecte que les enrobés tièdes produit en centrale d'enrobage. Les enrobés tièdes fabriqués en laboratoire ne respectent pas les exigences (ratio ITR 80% et ratio d'absorption d'énergie 70%) contrairement aux enrobés prélevés en centrale d'enrobage.

Bilan

La littérature relative aux enrobés tièdes est abondante. Bon nombre de publications sont proposées par les fournisseurs des enrobés, ceci tout particulièrement pour les techniques avec additif chimique pour lesquelles le recul est encore limité.

De manière générale, les essais et méthodes de conditionnement utilisés traditionnellement sur enrobés à chaud sont appliqués pour l'évaluation des enrobés tièdes. L'interprétation des résultats et exigences se fait également de manière analogue aux mélanges à chaud. La majorité des recherches ont pour objectif la comparaison de produits et la compréhension des phénomènes ; la phase d'optimisation devant suivre plus tard. Le recul sur le long terme ainsi que les expériences in-situ font encore défaut. D'un point de vue performantiel, on peut mettre en évidence la potentielle sensibilité à l'eau des enrobés tièdes qui est systématiquement évoquée, avec des résultats divers et variés selon les expériences. Les performances à basse température peuvent également constituer un aspect potentiellement critique selon le type d'enrobé analysé. On notera finalement que peu d'auteurs s'intéressent à l'évolution des performances des enrobés au-delà des toutes premières heures suivant la fabrication. Ces différentes thématiques seront considérées entre autre lors de l'analyse performantielle en laboratoire (chapitre 4).

3.7 Enseignements

Ce chapitre propose une présentation des différentes familles d'enrobés tièdes, de leurs mécanismes, ainsi qu'une analyse de certains aspects particuliers.

Après une première phase très active au début des années 2000, la production d'enrobés tièdes a eu quelque peu tendance à stagner au cours des dernières années. En Suisse, certains industriels commencent à s'équiper en vue d'une production tiède, mais cela demande des investissements conséquents et les choix de technologies ne sont pas aisés. Des besoins en terme de recherche théorique et appliquée sont manifestes, afin de démontrer que les enrobés tièdes présentent une alternative crédible aux enrobés à chaud. Le recours aux enrobés tièdes ne peut pas être motivé uniquement par des réductions d'émissions ou de consommation énergétique. Mais le cumul des différents avantages devrait permettre de faire basculer la décision. Il s'agit donc d'un investissement à considérer sur le long terme.

Les enrobés tièdes sont relativement jeunes et de nombreux avantages potentiels sont mentionnés. Il est nécessaire de vérifier ces aspects de manière complète. Des règles d'applications en fonction des conditions météorologiques (température, humidité, vent) ainsi que des typologies d'utilisation doivent également être proposées. Nous pouvons relever deux des aspects fréquemment mentionnés et qui seront analysés dans cette recherche :

- A ce jour l'évolution des performances est essentiellement évaluée de manière empirique. Le recul sur le long terme manque. Certaines caractéristiques et performances potentiellement critiques sont également relevées dans la littérature. Pour cela, des essais étendus en laboratoire ainsi que des essais accélérés sont à réaliser.
- La quantification des gains énergétiques et écologiques est nécessaire selon une perspective d'analyse du cycle de vie. La prise en compte uniquement du processus de fabrication en centrale n'est pas suffisante. Les impacts écologiques des technologies tièdes doivent être déterminés en prenant en considération l'ensemble du processus, du berceau à la tombe. Une aide à la décision entre les différentes technologies doit également être proposée aux décideurs.

4. APPROCHE PERFORMANTIELLE

4.1 Problématique et démarche

Dans les premiers chapitres de ce travail, les enrobés bitumineux et leurs composants ont été décrits. Un accent particulier a été mis sur les familles d'enrobés tièdes, la description des principaux procédés, le potentiel ainsi que les performances. L'évaluation des performances mécaniques des enrobés tièdes revêt une importance particulière dans cette recherche. Il a été montré précédemment qu'une évaluation approfondie de ces enrobés était nécessaire en vue d'en déterminer les conditions et domaines d'applications ainsi que les éventuelles particularités. Pour être considérés comme une alternative crédible aux enrobés à chaud, les enrobés tièdes se doivent de proposer des performances au moins équivalentes à celles de ces enrobés. En cas de différences significatives, cela pourrait alors modifier la typologie d'application de ces enrobés à faibles impacts. L'évaluation des performances mécaniques des enrobés tièdes est effectuée dans le laboratoire du Lavoc. Cette approche performantielle en laboratoire n'a pas pour objectif de développer un nouveau type d'enrobé tiède. Des produits existants ont été sélectionnés, le but étant d'analyser les grandes familles d'enrobés tièdes utilisées actuellement dans la pratique.

L'approche performantielle en laboratoire permet également de proposer des données d'entrée pour le modèle d'évaluation multicritère qui sera développé dans la seconde partie de la recherche (chapitres 7, 8 et 9).

La première partie de ce chapitre concerne la procédure de sélection des procédés et produits testés ainsi que la description générale de l'approche performantielle. Suite à cela les essais de caractérisation

ainsi que la formulation sont détaillés, avant de présenter et discuter des différents résultats. Un accent particulier est également mis sur la maîtrise de la viscosité, paramètre déterminant des enrobés tièdes.

4.2 Sélection des procédés et produits pour la recherche en laboratoire

Dans la suite nous distinguons les catégories (ou familles) d'enrobés tièdes des produits, qui correspondent à un élément commercial spécifique d'une catégorie d'enrobé tiède.

L'objectif de l'analyse performantielle en laboratoire est d'évaluer les différentes familles d'enrobés tièdes. Pour rappel, nous distinguons les familles suivantes (chapitre 3) : Modification de la séquence d'enrobage, introduction ou maîtrise de la teneur en eau, procédés basés sur la chimie. Parmi ces familles, les enrobés recourant à une modification de la séquence d'enrobage sont relativement peu utilisés et le nombre de produits disponibles est limité comparativement aux autres catégories. Par contre, parmi les enrobés basés sur la chimie, nous pouvons trouver une multitude de produits que l'on peut globalement différencier entre les additifs « chimiques » sous forme liquide à température ambiante et les cires (diverses sortes). Il est choisi dans cette recherche de ne pas utiliser de produits nécessitant une modification de la séquence d'enrobage afin de favoriser les enrobés tièdes basés sur la chimie dont le potentiel et les développements actuels sont très importants.

Les critères suivants sont considérés pour le choix des produits, les deux premiers étant des critères jugés prioritaires :

- Potentiel de gains environnementaux
- Potentiel de gains énergétiques
- Méthode de fabrication, complexité du procédé
- Expérience, recul sur la technologie

Dans le cadre d'une analyse des performances, nous considérons que le critère économique n'est pas déterminant. De plus, le prix est très variable dans le temps ainsi que selon les régions. Les possibilités de coopération et la disponibilité des fournisseurs des produits a également été prise en compte lors du processus de décision. Si l'on considère les différents produits pour enrobés tièdes indiqués dans (Bueche, Dumont et al. 2009) et partiellement repris dans le chapitre 3 de cette recherche, nous pouvons représenter la gamme de température de fabrication des enrobés tièdes (Figure 4-1). Pour une première évaluation, la réduction de température peut être assimilée à des gains énergétiques et écologiques à la centrale d'enrobage. Dans cette figure, « eau » signifie le moussage du bitume par introduction d'eau, une maîtrise de la teneur en eau ou alors l'ajout d'eau sous la forme de cristaux (zéolithe). Rappelons que ces données sont issues de fiches techniques, recherches et publications diverses. Elles doivent donc être considérées comme des ordres de grandeurs.

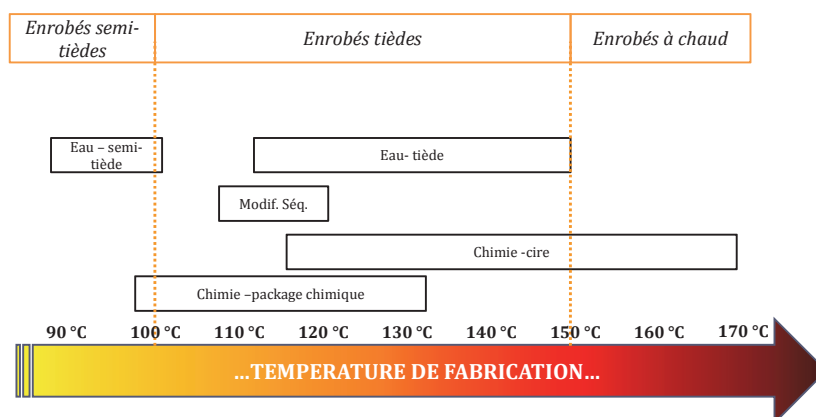


Figure 4-1 : Variation de la température de fabrication selon le type d'enrobé tiède

La température de fabrication des enrobés semi-tièdes est par définition la plus basse car ils sont produits en-dessous de 100 °C. Les enrobés avec additifs chimiques autorisent une diminution considérable de la température de fabrication allant jusqu'à 95 °C – 130 °C ; les enrobés avec ajout de cire et enrobés tièdes avec eau étant généralement fabriqués à des températures légèrement supérieures.

L'expérience est également prise en considération lors du choix des produits, ceci afin de proposer une solution représentative des applications in-situ. Les enrobés tièdes les plus fabriqués, en Europe et dans le monde, sont probablement les enrobés avec cire Fischer-Tropsch (Sasobit®). Ces produits sont parmi les premiers à avoir été développés et ils sont aujourd'hui encore largement répandus. En terme de production élevée (Bueche, Dumont et al. 2009) mentionne également les enrobés avec zéolithe (eau contenue sous forme cristalline), les enrobés avec moussage du bitume (WAM-Foam®, Double Green Barrel®) et les enrobés avec maîtrise de la teneur en eau (LEA®). La famille des enrobés avec additifs chimiques (package chimique) occupe également une place importante du marché, mais ce marché est quelque peu segmenté entre les multiples additifs existants.

Il est finalement choisi d'évaluer en laboratoire les enrobés tièdes du Tableau 4-1, qui représentent chacun un compromis différent.

Tableau 4-1 : Procédés et produits sélectionnés pour la recherche en laboratoire

Famille d'enrobé	Maîtrise teneur eau	Additif : cire	Additif : package chimique
Gains énergie & émissions (estimation)	+++	+	++/+++
Facilité de fabrication	+	+++	+++
Expérience	++	+++	+
Nom produit	LEA®	Sasobit®	Cecabase RT 945®
Code recherche	EST	ET-C	ET-P

Echelle d'évaluation : + faible, ++ modéré, +++ élevé

En plus des deux enrobés tièdes (ET-C, ET-P) et de l'enrobé semi-tiède (EST), un enrobé à chaud de référence (REF) sera également utilisé dans l'ensemble de la recherche en laboratoire. Nous décrivons brièvement ci-dessous les additifs et enrobés utilisés ; les détails de fabrication étant discuté dans la section 4.7.

Enrobé ET-P

Le Cecabase RT 945® est un additif liquide à température ambiante (viscosité 725 mPa·s à 25 °C) à base de polymères (Figure 4-2). Il est produit par la société Ceca (groupe Arkema) qui est l'un des leaders mondiaux dans le domaine des émulsions cationiques. Il s'agit d'un agent tensio-actif. Son processus consiste donc à modifier la tension superficielle à l'interface entre les granulats et le liant. L'additif agit comme un lubrifiant à la friction entre les granulats et non pas par un effet massique, ce qui rend la quantité nécessaire plus faible que d'autres additifs. Même utilisé en faible quantité, l'agent tensio-actif modifie la tension superficielle. Les propriétés des agents tensio-actifs sont dues au fait qu'il s'agit de molécules amphiphiles, ce qui signifie qu'elles présentent deux parties de polarité différente. Selon le fournisseur, Cecabase® n'interagit pas avec le bitume. Ceci sera vérifié lors des essais de laboratoire. Le Cecabase® est une amine, c'est-à-dire un composé azoté dérivé de l'ammoniac par remplacement d'un ou plusieurs atomes d'hydrogène par des groupes carbonés. Le produit dégage d'ailleurs une odeur caractéristique d'ammoniac.

Par définition, les agents tensio-actifs (appelés également surfactants) sont des agents très concentrés et donc potentiellement dangereux. Ses phrases de risque sont, selon la fiche technique et la directive européenne 2001/59/CE :

- R34 : Provoque des brûlures.
- R43 : Peut entraîner une sensibilisation par contact avec la peau.
- R50/53 : Très toxique pour les organismes aquatiques, peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement aquatique.

En raison de la forte concentration, le dosage d'additif dans le bitume est maintenu suffisamment bas, ce qui permet de ne pas trop augmenter le prix de la tonne d'enrobé. Il existe d'autres variantes de Cecabase®, les développements actuels étant focalisés sur l'augmentation de la maniabilité et la diminution de la quantité d'additif nécessaire afin de baisser les coûts. Parmi les développements récents, nous pouvons mentionner le Cecabase RT 975® et le Cecabase RT 965® qui présentent notamment une diminution substantielle de prix par rapport au Cecabase RT 945® testé dans cette recherche (4€40/kg contre 5€15/kg, prix 2010 Ceca).

Parmi les caractéristiques de la fiche de sécurité, nous pouvons encore relever le point de solidification (-10 °C) ainsi que le point éclair qui est indiqué très approximativement (>100 °C). L'additif seul et conservé dans un récipient fermé est stable pour de nombreux mois, voire années. Les fournisseurs utilisent l'additif après 2-3 ans de stockage à température ambiante. Par contre, le bitume additivé doit être utilisé dans les 7 jours si l'on souhaite bénéficier de l'action de l'additif. L'augmentation de la durée de conservation du bitume additivé est également un axe de recherche et développement. Notons encore que les différentes patentes peuvent être consultées en ligne (Office européen des brevets).

Enrobé ET-C

La cire Sasobit® est une cire synthétique de type Fischer-Tropsch, décrite précédemment au chapitre 3. Nous pouvons relever les caractéristiques suivantes issues de la fiche produit :

- | | |
|---------------------------------|-------------------------|
| - Point d'inflammation | 285 °C |
| - Température de solidification | 90 °C |
| - Pénétration à 25 °C | < 1·10 ⁻¹ mm |
| - Pénétration à 65 °C | 7·10 ⁻¹ mm |
| - Viscosité Brookfield à 135 °C | 12 mPa·s |

L'utilisation de cire (Figure 4-2) ne présente pas de danger particulier hormis les précautions relatives à la cire fondue.



Figure 4-2 : Cire pour additif ET-C (gauche) et additif chimique ET-P (droite)

Enrobé EST

Pour l'enrobé semi-tiède, l'enrobé LEA® a été choisi. Le principe de base consiste en la maîtrise de la teneur en eau. Il n'y a pas d'injection d'eau dans le bitume afin de créer un moussage de bitume, l'accent étant porté sur l'humidité de certaines fractions granulaires. Différentes variantes existent. (Olard, Noan et al. 2008) distingue les procédés suivants :

- LEA1 : Une première fraction des granulats est séchée (130-150 °C) avant d'être mélangée avec l'ensemble du liant (170 °C). La partie restante, humide et froide, est ensuite ajoutée à température ambiante et le mélange est alors malaxé.
- LEA2 : La phase de séchage affecte seulement une partie des granulats qui est ensuite mélangée avec la partie restante, humide et froide (température ambiante) avant l'enrobage avec le liant.
- LEA3 : L'ensemble du squelette granulaire est partiellement séché avant le mélange avec l'ensemble du liant chaud.

La différence entre LEA1 et LEA2 se situe au niveau de l'ajout du sable froid qui se fait tout à la fin dans le procédé LEA1. Le procédé LEA1 est choisi, sur la base des éléments suivants et après discussion avec les fournisseurs:

- Les trois procédés LEA sont reproductibles en laboratoire.
- L'enrobé LEA3 est plus adapté aux centrales continues. Il peut poser quelques problèmes en laboratoire.
- LEA2 est spécialement adapté aux centrales continues, il est le plus aisé à fabriquer en laboratoire.
- Les centrales suisses sont majoritairement discontinues et ce type de centrale serait alors plus adapté à l'enrobé LEA1.
- LEA 1 permet un meilleur enrobage dans le cas d'enrobé avec des « gros » grains (D_{\max} 22 mm), ceci car le bitume est en contact avec les gros gains avant l'ajout de la fraction de sable humide.
- Il est important de considérer les bonnes pratiques, représentatives du contexte suisse en l'occurrence. Dans ce cas, LEA1 est presque systématiquement privilégié pour des raisons d'enrobage et de maniabilité. Les émissions de poussières sont également moins importantes avec LEA1 qu'avec LEA2.

La fabrication des enrobés LEA nécessite souvent l'emploi d'un additif (fluxant). Si la formule est peu sensible à l'orniérage ou que l'on utilise des matériaux recyclés, un additif d'origine végétale (Oléoflux®) est recommandé. Par contre, si la formule est relativement sensible à l'orniérage et à l'eau, un additif de type Greenseal® est recommandé (mélange de résine).

Dans la suite de ce travail, les différents enrobés seront mentionnés exclusivement par leur code recherche indiqué dans le Tableau 4-1.

4.3 Approche performantielle en laboratoire

4.3.1 Définitions

En préambule, nous définissons pour le contexte de l'étude quelques notions utilisées par la suite :

- Performances critiques ou non vérifiées : Performances pour lesquelles une faiblesse potentielle des enrobés tièdes est possible. A notre connaissance, cette performance n'a pas (peu) été analysée.

- Essai de caractérisation : L'essai de caractérisation permet de déterminer une caractéristique intrinsèque du matériau (par exemple teneur en vides ou module complexe de l'enrobé), caractéristique qui influencera les performances mécaniques.
- Essai performantiel : Nous définissons un essai performantiel comme un essai dont les résultats permettent d'évaluer le comportement dans le temps et sous sollicitations de l'enrobé. Cet essai fait référence à une performance de l'enrobé, par exemple la résistance à la fatigue ou la résistance aux déformations permanentes.
- Montée en performance (mûrissement) : Evaluation des performances ou caractéristiques à différents pas de temps. La montée en performance est caractérisée par différents temps de cure qui correspondent à la durée de conservation des échantillons avant réalisation de l'essai.
- Compacité : Représente la qualité du compactage, caractérisée par la teneur en vides d'un échantillon à un moment donné. La compacité (C) est directement reliée à la teneur en vides (v) par la relation $100\% = C\% + v\%$
- Compactibilité : Traduit l'aptitude du matériau à se mettre en place, à se compacter. La compactibilité est évaluée par l'évolution de la compacité sur l'ensemble du processus de compactage.
- Maniabilité : Représente la facilité à mettre en place l'enrobé, de manière qualitative ou comparativement à un autre mélange.
- Liant additivé : Le liant additivé correspond au bitume brut dans lequel l'additif a été ajouté. Nous le distinguons du liant modifié qui correspond traditionnellement à des bitumes spéciaux (par exemple modifiés aux polymères).

4.3.2 Méthodologie

De manière générale, l'étude en laboratoire est réalisée selon quatre phases que nous pouvons décrire ainsi :

- A. Sélection des procédés et produits à tester en laboratoire.
- B. Phase préparatoire :
 - Choix des paramètres de base (fixes et contrôlés) et des paramètres variables.
 - Identification des caractéristiques potentiellement critiques/non vérifiées puis sélection des essais de caractérisation et de performance adaptés.
- C. Etude de faisabilité en laboratoire et formulation :
 - Essais de caractérisation des composants de base.
 - Formulation des mélanges.
- D. Evaluation des performances en laboratoire :
 - Essais de caractérisation étendus et analyse performantielle.
 - Analyses spécifiques.

La procédure de rédaction du présent chapitre suit ces différentes étapes. Les deux premières phases sont classiques pour ce genre d'étude. Leurs résultats sont présentés aux chapitres 4.3 et 4.4. Les deux dernières phases sont davantage détaillées; les résultats étant présentés aux chapitres 4.5 à 4.9.

Un contact avec les fournisseurs a été pris en début de recherche afin de valider la procédure de fabrication en laboratoire ainsi que la méthodologie. Ceci permet de garantir des bases communes et reconnues. Une rencontre a également été effectuée en fin d'essais, afin de recueillir les impressions et commentaires ainsi que discuter des résultats obtenus (fournisseurs ET-P et EST).

La formulation et l'analyse performantielle (phases C et D) constituent le cœur de l'étude en laboratoire. Ces phases sont détaillées dans la Figure 4-3 qui contient les différentes caractéristiques et performances évaluées à chacune des étapes. Le choix des essais sera discuté plus loin.

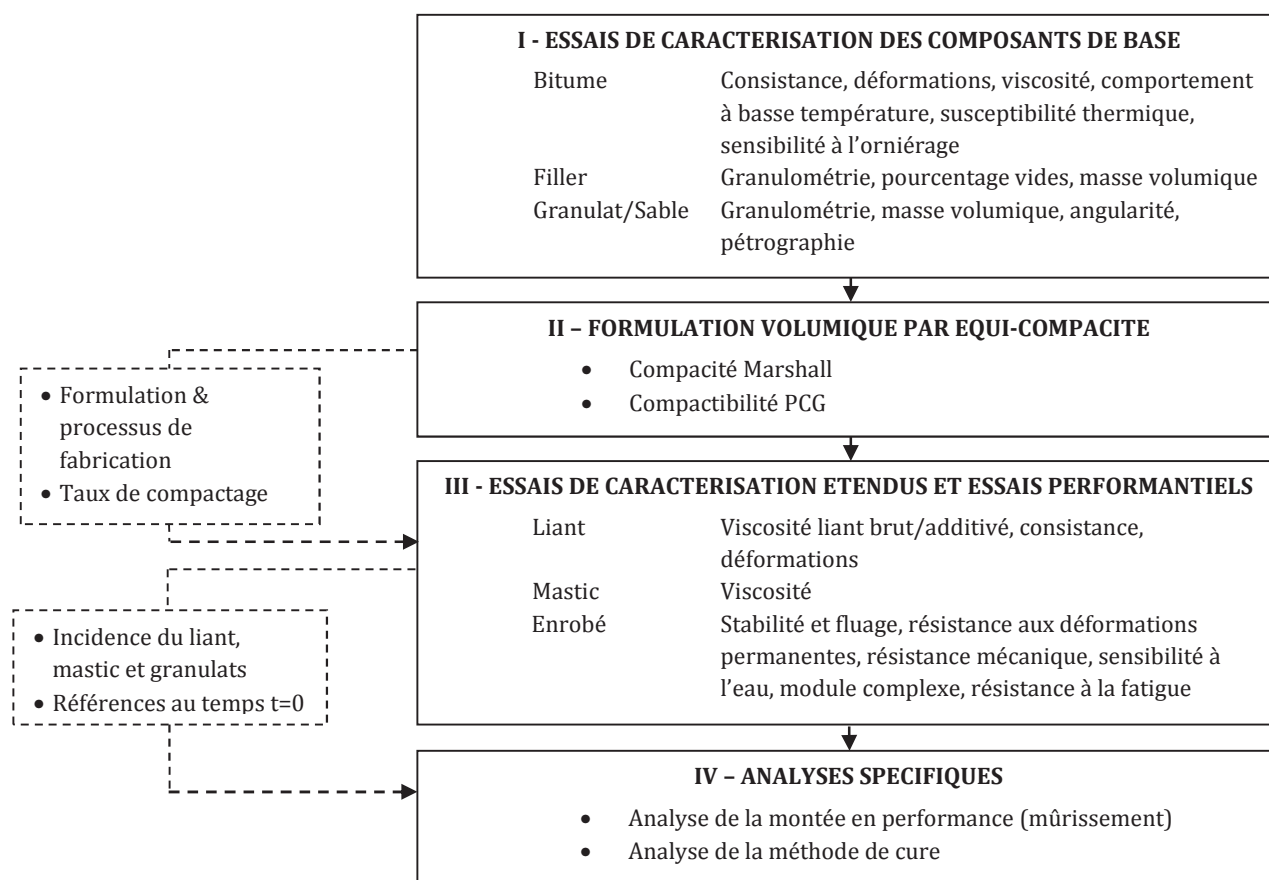


Figure 4-3 : Vue générale de l'analyse performantielle en laboratoire

A formulation identique, la compacité de l'enrobé a une grande incidence sur le comportement mécanique de l'éprouvette. Afin de pouvoir comparer les résultats obtenus avec les différents enrobés, il a été choisi de travailler à équicompatibilité des échantillons (étape II). Pour cela, la température optimale de compactage des différents enrobés tièdes a été définie, température permettant d'obtenir une teneur en vides comparable à la teneur en vides de l'enrobé de référence.

Le choix des performances et caractéristiques à évaluer est basé sur la littérature (Chapitre 3), l'expérience acquise lors des différentes recherches menées au Lavoc (Golaz 2007; Raess et Pittet 2008; Bueche, Dumont et al. 2009), ainsi que de nombreuses séances de travail et contacts avec des spécialistes du domaine. La participation active à différentes conférences et congrès (Bueche 2009; Bueche 2010) a également permis d'affiner les choix. En plus des essais de caractérisation traditionnels, il est choisi de mettre l'accent sur les performances et caractéristiques suivantes (étape III) :

- Viscosité du liant et du mastic.
- Résistance de l'enrobé aux déformations permanentes.
- Résistance de l'enrobé aux températures critiques (extrêmes).
- Sensibilité à l'eau de l'enrobé.
- Résistance à la fatigue de l'enrobé.

L'étape III de l'approche performantielle permet de définir un état de référence des différents enrobés (0 semaine). Sur la base d'une sélection des performances et caractéristiques ci-dessus, les aspects suivants seront tout particulièrement analysés (étape IV):

- Analyse de la montée en performance (mûrissement) : Le processus de montée en performance des enrobés tièdes est parfois cité comme faiblesse potentielle. Ce processus n'est que peu (pas) évalué à notre connaissance. Un enrobé nécessitant une période de mûrissement spécifique demandera une mise sous circulation différée et impliquera des perturbations du trafic et coûts additionnels. De plus, des mélanges peuvent être jugés non conformes alors qu'ils le seront quelques jours après. La montée en performance pourrait donc modifier la typologie d'application des enrobés concernés. Le mûrissement est évalué par la réalisation d'une sélection d'essais à différents instants. Le pas de temps est défini par analogie avec les bétons où la résistance à la compression est mesurée à l'âge de 28 jours. Une évaluation additionnelle à trois mois est ajoutée. Les pas de temps suivants sont finalement choisis pour l'analyse de la montée en performance : 0, 1, 2, 4, 12 semaines.
- Analyse de la méthode de cure : Lors des essais en laboratoire, les échantillons sont traditionnellement conservés à une température de 19-22 °C, à l'air libre. Ceci ne correspond normalement pas aux conditions rencontrées in-situ. Par exemple, un enrobé pour couche de base peut se trouver très vite recouvert par une nouvelle couche d'enrobé. Afin de « reproduire » le confinement de l'enrobé entre les couches, une partie des échantillons a été conservée dans des sacs plastiques (Figure 4-4).



Figure 4-4 : Conservation des échantillons dans des sacs plastiques

4.3.3 Définition des paramètres fixes et contrôlés

Les paramètres suivants sont fixes pour l'ensemble de la recherche en laboratoire :

- Type de couche : Couche de base traditionnelle suisse. Le rôle et la participation de ces couches dans la résistance mécanique de la chaussée est important (essentiellement la fatigue). Les couches de base représentent la majorité de la production d'enrobé en Suisse selon (EAPA 2007), l'industrie suisse des enrobés bitumineux (SMI) indiquant une répartition sensiblement équilibrée entre couches d'usure et couches de base/couches de liaison. Cependant, le volume de la couche de base étant plus élevé pour un chantier donné, ceci permet d'envisager de plus grands gains énergétiques et environnementaux dans le cadre du même chantier. Relevons tout de même qu'il aurait été possible de considérer des couches de roulement aux grains plus fins et dont le renouvellement est plus fréquent, mais les sollicitations mécaniques différentes (participe peu à la résistance à la fatigue, plus sollicitées à l'orniérage).

- Pas de prise en compte de matériaux recyclés. Bien que l'ajout de matériaux recyclés puisse s'avérer bénéfique en termes de performances et de gains énergétiques et écologiques, il n'est pas considéré. La prise en compte de fraisat d'enrobé dans l'analyse des performances est complexe et elle fait l'objet d'une recherche spécifique du Lavoc (Pittet, Bueche et al. En cours).
- Bitume de base : Bitume 50/70 recommandé selon la norme SN 640 431-1b-NA pour les couches de base étudiées.
- Un seul type de granulats, de qualité moyenne.
- Teneur en additifs (sauf indication contraire) :
 - o ET-C : Cire ajoutée en dosage de 3% de la masse de bitume.
 - o ET-P : Additif chimique ajouté en dosage de 0.4% de la masse de bitume.
 - o EST : Fluxant végétal ajouté en dosage de 0.4% de la masse de bitume.

4.4 Choix des essais de caractérisation et essais performantiels

Après la description globale de l'approche en laboratoire, nous détaillons dans ce chapitre les essais sélectionnés à chacune des étapes de la recherche.

Le Tableau 4-2 contient la liste des essais de caractérisation des composants. Il s'agit majoritairement d'essais traditionnels dont le but est d'une part de fournir les données nécessaires à la réalisation de la formulation, mais également de vérifier la bonne conformité des composants. La formulation étant effectuée sur l'enrobé de référence à chaud, les essais de caractérisation sur bitume ne concernent que le bitume de base non additivé. Une description des principaux essais est fournie en Annexe A. Pour chaque essai, le descriptif est axé sur les conditions appliquées dans notre recherche et il contient également des données relatives à la fidélité. Pour davantage d'informations, on pourra consulter la norme relative ou (Dumont 2003; Di Benedetto et Corté 2004; Corté et Di Benedetto 2005).

Tableau 4-2 : Caractérisation des composants

Composant	Essai / Indice	Norme
Bitume base	Essai de pénétration (Pen)	SN 670 511a, EN 1426
	Point de ramollissement A&B	SN 670 512, EN 1427
	Calcul de l'indice de pénétration	SN 670 202-NA, EN 12591
	Point de fragilité Fraass	SN 670 507, EN 12593
	Viscosité dynamique	SN 670 500-5, EN 12596
Filler	Granulométrie	SN 670 902-10b, EN 933-10
	Vides Rigden	SN 670 903-4b, EN 1097-4
	Masse volumique	SN 670 903-7b, EN 1097-7
Granulats	Granulométrie	SN 670 902-1, EN 933-1
	Masse volumique	SN 670 903-6b, EN 1097-6

Les différents essais réalisés dans les étapes « III : Essais de caractérisation étendus et essais performantiels » et « IV : Analyses spécifiques » sont répertoriés dans le Tableau 4-3. Ce tableau indique également le pas de temps auquel les essais sont réalisés, une description des essais étant disponible en annexe. Nous pouvons relever les éléments suivants :

- L'évaluation du comportement aux températures extrêmes (ou critiques) est effectuée par l'essai de compression diamétrale (détermination de la résistance à la traction indirecte des

éprouvettes bitumineuses). Cet essai est traditionnellement réalisé à une température située entre 5 °C et 25 °C (norme EN 12697-23). Pour évaluer le comportement aux températures critiques, nous effectuons l'essai à -10 °C et 40 °C ainsi qu'à la température de référence de 15 °C. Ce choix de températures est basé sur les valeurs extrêmes attendues dans une couche de base. La méthode appliquée pour la réalisation de l'essai est celle proposée par le Lavoc dans (Assef-Vaziri, Pigois et al. 1984). Selon cette recherche, la vitesse de chargement est adaptée en fonction de la température d'essai : 18 mm/min à -10 °C, 48 mm/min à 15 °C et 40 °C. Le chargement plateau (sans barre de chargement) est également préféré car il permet de diminuer la dispersion des résultats.

- La viscosité du mastic ne peut être mesurée avec le viscosimètre cône et plaque du Lavoc. Un rhéomètre à plans parallèles du Laboratoire de technologie des composites et polymères (LTC) de l'EPFL a été utilisé. Ces mesures ainsi que l'appareillage seront détaillés au chapitre 4.8.
- Les essais de classification des bitumes selon la normalisation SUPERPAVE (Performance Grade-PG) utilisée en Amérique du nord ont été réalisés au Laboratoire universitaire sur les chaussées, les routes et les enrobés bitumineux (LUCREB) de l'École de technologie supérieure de l'Université de Québec (ETS), sous la direction du Prof. A. Carter.
- Une série limitée d'essais de module sécant a été réalisée selon la procédure d'essai de traction indirecte IT-CY (EN 12697-26). La mise en place de l'essai ainsi que les résultats obtenus sur enrobés tièdes sont discutés au chapitre 5.

Tableau 4-3 : Récapitulatif des essais de caractérisation étendus, essais performantiels et analyses spécifiques

	Composant	Essai	Norme	Temps depuis fabrication [sem]					
				0	1	2	4	12	
Phase III : Essais de caractérisation étendus et essais performantiels	Liant brut/additivé	Essai de pénétration (Pen)	SN 670 511a EN 1426	X					
		Point de ramollissement A&B	SN 670 512 EN 1427	X					
		Calcul de l'indice de pénétration	SN 670 202-NA EN 12591	X					
		Viscosité dynamique	SN 670 500-5 EN 12596	X					
		Performance Grade (SHRP)	AASHTO PP6	X					
	Mastic	Viscosité dynamique	EN 12596	X					
	Enrobé	Compression Marshall	SN 670 434a EN 12697-34	X					
		Orniérage LPC	SN 670 422a-NA EN 12697-22	X					
		Compression diamétrale (-10 °C, 15 °C, 40 °C)	SN 670 423 EN12697-23	X					
		Essai de sensibilité à l'eau ITSR	SN 670 412a-NA EN 12697-12	X					
		Module complexe	SN 670 426 EN 12697-26			X			
Fatigue		EN 670 424a EN 12696-24					X		
Phase IV : Analyses spécifiques	Analyse de la montée en performance								
	Enrobé	Compression diamétrale (-10 °C, 15 °C, 40 °C)	SN 670 423 EN12697-23	X	X	X	X	X	
		Essai de sensibilité à l'eau ITSR	SN 670 412a-NA EN 12697-12	X	X	X	X	X	
		Orniérage LPC	SN 670 422a-NA EN 12697-22	X				X	
		Module complexe	SN 670 426 EN 12697-26			X		X	
	Liant récupéré	Essai de pénétration (Pen)	SN 670 511a EN 1426		X			X	
		Point de ramollissement A&B	SN 670 512 EN 1427		X			X	
		Calcul de l'indice de pénétration	SN 670 202-NA EN 12591		X			X	
	Analyse de la méthode de cure								
	Enrobé	Compression diamétrale (-10 °C, 15 °C, 40 °C)	SN 670 423 EN12697-23	X	X	X	X	X	

Dans le cas d'essais sur enrobé, le pas de temps « 0 semaine » signifie que l'essai est effectué directement après la fabrication, mais toujours dans le respect de la normalisation lorsque un temps de repos est requis.

D'autres essais auraient pu être sélectionnés afin d'étudier le comportement des enrobés et des liants bitumineux. (Pucci 2000) propose différentes méthodes permettant d'évaluer le comportement à basse température des enrobés. Prenant en considération les nombreux cas (montée en performance, conditionnement) lors des analyses spécifiques, l'essai de compression diamétrale nous a semblé le plus adapté à l'étude réalisée.

Lorsque normalisés, les différents essais sont réalisés selon les standards en vigueur. L'objectif de l'étude n'est pas de vérifier la conformité des essais, mais d'évaluer les caractéristiques et particularités des enrobés tièdes. Sans indication spécifique, nous considérons également que les performances ou caractéristiques mesurées respectent les exigences de la normalisation.

4.5 Caractérisation des composants de base

Les essais de caractérisation des composants sont menés afin de vérifier la conformité aux exigences ainsi que pour fournir les données de base nécessaires à la phase de formulation. Une identification des granulats, filler et du bitume de base est menée. Dans l'ensemble de la recherche, les mêmes granulats ainsi que le même filler et bitume de base sont utilisés.

4.5.1 Granulats et filler

Les granulats utilisés et leur arrangement dans l'enrobé jouent un rôle prépondérant sur le comportement mécanique, notamment la résistance à l'orniérage. Les granulats proviennent de la gravière BERAG à Rubigen (canton Berne). Il s'agit globalement de granulats durs de bonne qualité dont les composants principaux sont du calcaire alpin (38% en masse), des grès durs (26%) et du quartz (10%).

La granulométrie ainsi que la masse volumique réelle des différentes fractions de sable et gravillons est indiquée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4-4 : Analyse granulométrique et masse volumique réelle de sable et des gravillons

Passant [mm]	Sable 0.063/2	Gravillon 2/4	Gravillon 4/8	Gravillon 8/11.2	Gravillon 11.2/16	Gravillon 16/22.4
0.063	4.00%	1.50%	0.40%	0.20%	0.20%	0.20%
2	95.10%	5.90%	1.00%	0.25%	2.86%	0.22%
4	100.00%	92.70%	5.60%	0.30%	5.61%	0.25%
8	100.00%	100.00%	94.30%	7.20%	11.10%	0.30%
11.2	100.00%	100.00%	99.90%	92.50%	15.50%	7.26%
16	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	98.50%	17.70%
22.4	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	99.80%
Masse volumique réelle [Mg/m ³]	2.650	2.700	2.710	2.700	2.700	2.690

Pour certaines fractions granulométriques, les granulats concassés utilisés sont de qualité moyenne. Des investigations supplémentaires effectuées dans le cadre du projet (Pittet, Bueche et al. En cours) ont montré que les fractions granulométriques inférieures à 16 mm présentent des arêtes parfois

émoussées. Ceci est illustré par la Figure 4-5 qui rapporte les résultats d'un essai d'écoulement (normes SN 670 902-6a, EN 933-6) sur la fraction de sable 0.063/2 mm. Il n'y a pas d'exigences normatives concernant le temps d'écoulement. On peut cependant remarquer que la fraction de sable évaluée a un temps d'écoulement de 34 s, ce qui correspond à un comportement semi-frottant (performances moyennes à faibles). Des arêtes quelques peu émoussées peuvent être la source d'un moins bon comportement à l'orniérage, en particulier dans le cas de couches de roulement pour lesquelles des matériaux nobles sont nécessaires. Les fractions granulométriques > 16 mm sont par contre meilleures.

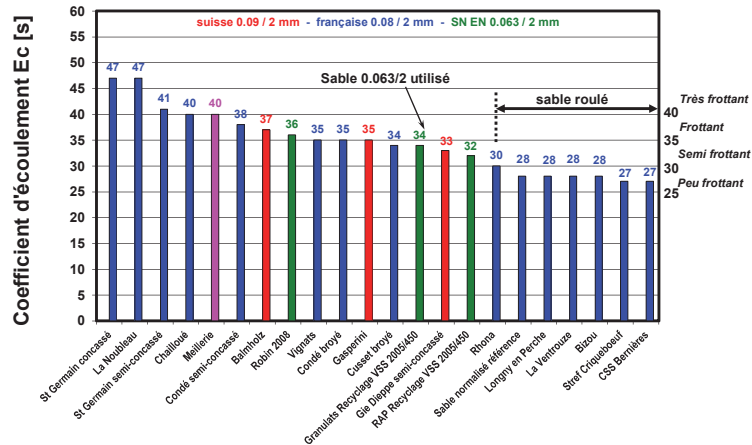


Figure 4-5 : Résultats de différents essais d'écoulement sur fractions sable (ouverture diaphragme Ø 12 mm) (Pittet, Bueche et al. En cours)

Pour la fabrication des enrobés en laboratoire, le filler est tamisé à 63 microns. Ceci permet de maîtriser la teneur en filler qui est un point déterminant de la granulométrie. Les caractéristiques suivantes du filler ont été déterminées :

- Masse volumique réelle : 2.670 Mg/m³
- Porosité intergranulaire du filler sec compacté (vides Rigden) : 30%

4.5.2 Bitume

Le bitume utilisé a été prélevé dans une centrale d'enrobage lors de sa livraison en provenance de Karlsruhe (Allemagne). Un bitume 50/70 est choisi car il est le plus adapté et le plus utilisé pour le type de couche considérée dans cette recherche (voir formulation).

Tableau 4-5 : Caractéristiques du bitume 50/70 de base

	Bitume 50/70
Température anneau & bille [°C]	51.9
Pénétration à 25 °C [10 ⁻¹ mm]	55
Indice de pénétration IP [-]	-0.5
Point de fragilité Fraass [°C]	-11
Viscosité à 60 °C [10 ⁻¹ Pa.s]	2662
Viscosité à 90 °C [10 ⁻¹ Pa.s]	115
Viscosité à 110 °C [10 ⁻¹ Pa.s]	24
Viscosité à 130 °C [10 ⁻¹ Pa.s]	6.4
Viscosité à 150 °C [10 ⁻¹ Pa.s]	2.5

4.6 Formulation

4.6.1 Démarche et conditions de base

L'objectif de la formulation est de proposer une courbe granulométrique standard appliquée en Suisse. Elle n'est donc pas réalisée dans un souci d'optimisation des performances. La formulation est effectuée uniquement pour l'enrobé de référence à chaud, la recette étant ensuite utilisée également pour les enrobés tièdes. La seule différence entre les enrobés se situe au niveau des additifs et parfois de l'humidité des fractions granulaires lors de la fabrication. L'utilisation d'une seule courbe granulométrique permet de limiter les paramètres variables et ainsi focaliser l'analyse au niveau des techniques d'enrobage. Notons que l'optimisation de la formulation des enrobés tièdes fait l'objet d'une recherche actuellement en cours au Lavoc (Paquet de recherches PLANET).

Un enrobé pour couche de base à sollicitations sévères de type AC T 22S est utilisé. Les limites du fuseau granulométrique sont indiquées dans la Figure 4-6. Le type de bitume généralement utilisé pour ce genre de couche et de sollicitations (sévéres) est un bitume 50/70.

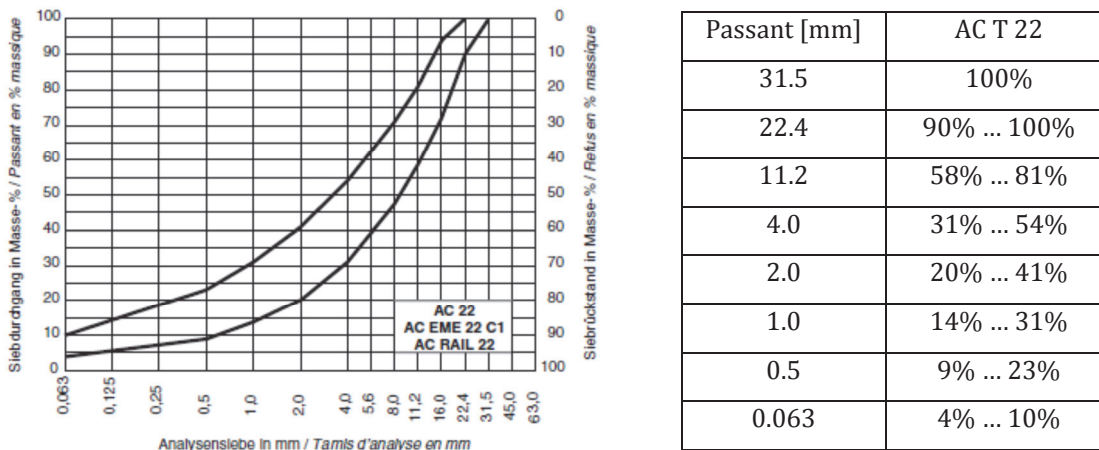


Figure 4-6 : Fuseau granulométrique pour enrobé AC T 22S selon SN 640 431-1b-NA

Comme nous le verrons par la suite, la normalisation suisse n'impose pas de méthode de formulation. Elle fixe cependant les exigences suivantes en terme de composition de l'enrobé AC T 22S :

- Valeur limite de teneur en vides des éprouvettes Marshall : 4.0% ... 7.0%
- Teneur minimale en liant sur enrobé : $\geq 4.0\%$ massique

4.6.2 Méthodes de formulation

Généralités

La formulation a pour objectif de déterminer la composition (optimale) des constituants de l'enrobé afin de résister aux sollicitations mécaniques et climatiques sur l'ensemble de la durée de vie de la chaussée. Différentes propriétés sont recherchées selon le type de couche bitumineuse considérée. De manière générale, les paramètres suivants doivent être particulièrement analysés afin de garantir un bon comportement mécanique du mélange :

- Teneur en vides.
- Teneur en liant.
- Qualité des matériaux de base.
- Fractions granulométriques fines (≤ 4 mm).
- Module de richesse.

Le module de richesse caractérise l'épaisseur du film de liant et donc la lubrification du mélange. Il sera discuté plus loin. Abstraction faite de considérations économiques, le cas idéal comprend un module de richesse relativement élevé, une teneur en bitume élevée et un module de rigidité également élevé. Une augmentation de la teneur en liant de l'enrobé augmente la durabilité du mélange, mais diminue son module d'élasticité. Le principe de la formulation consiste donc à effectuer un compromis entre ces paramètres. (Delorme, Brosseaud et al. 2005) illustre ceci en résumant l'effet de différents facteurs de formulation sur les performances (orniérage, fatigue, fissuration, ...).

De nombreuses approches pour la formulation des enrobés bitumineux existent. Ces approches peuvent être basées sur des essais empiriques, des calculs analytiques, une méthodologie empirico-analytique, recourir à des essais fondamentaux, performantiels ou de caractérisation,... Dans un état de l'art complet, (Luminari et Fidato 1998) distingue six différentes méthodes de formulation ; méthodes pouvant être combinées :

- Formulation par recette :
Méthode basée sur l'expérience de mélanges traditionnels ayant fourni de bons résultats sous certaines conditions spécifiques.
- Formulation par des essais empiriques :
Le concept de base consiste en la sélection de la teneur en liant sur la base de l'optimisation de différentes variables qui ne constituent pas une mesure directe des performances. La méthode Marshall appliquée en Suisse est une méthode empirique de formulation, utilisant une méthode d'essai ne mesurant pas les propriétés fondamentales du matériau. L'appréciation est basée sur des corrélations entre résultats d'essais de laboratoire et comportement observé dans les chaussées en service.
- Formulation par des calculs analytiques :
Cette méthode permet le calcul volumétrique des différents composants du mélange exclusivement sur la base de calculs analytiques. La méthode ne demande pas de préparation d'éprouvettes d'essais. La méthode belge de formulation que nous décrivons plus loin applique ce principe, mais le couple également avec la réalisation d'essais en fin de formulation.
- Formulation volumétrique :
Dans ces méthodes, la teneur en liant ainsi que la granulométrie sont obtenues par analyse des volumes de vides, liant et granulats pour un mélange compacté en laboratoire selon une méthode reproductrice des conditions in-situ. Les propriétés mécaniques ne sont pas testées.
- Formulation par des essais reliés aux performances :
Dans ces méthodes, les mélanges respectant les critères volumétriques sont compactés et testés afin d'évaluer les propriétés reliées aux performances de l'enrobé et ainsi déterminer le mélange optimal sur la base de ces critères additionnels de performances. Ceci est par exemple le cas de la méthode française de formulation.
- Formulation basée sur les performances :
Dans cette méthode, la formulation est réalisée dans un premier temps avec l'une des méthodes précédemment décrites. Le mélange est ensuite testé par des essais performantiels ainsi qu'un système complet d'évaluation afin de déterminer le comportement du mélange sur sa durée de vie et ainsi l'accepter ou le rejeter. Les échantillons compactés sont testés afin de déterminer les propriétés fondamentales reliées aux performances utilisées comme données d'entrée dans les modèles de comportement mécanique.

Nous décrivons par la suite brièvement les méthodes française et belge de formulation ainsi que l'approche suisse et le module de richesse. Ceci permet de fournir les éléments de base avant la réalisation de la formulation pour notre étude.

Méthode française de formulation

La méthode française de formulation se caractérise par une approche basée le plus possible sur les performances du mélange. Il ne s'agit pas d'une méthode par recette, les considérations volumétriques étant fondées sur la presse à cisaillement giratoire qui est un de piliers de la méthode. Lors de l'épreuve de formulation, une séquence d'essai est choisie selon le niveau d'épreuve requis (Figure 4-7). Ce niveau d'épreuve va du plus simple au plus complet et il dépend notamment du type de couche, de son épaisseur, des prévisions de trafic et de la nature des couches inférieures. Par exemple, le niveau 1 concerne les spécifications relatives au pourcentage de vides (PCG) et à la résistance à l'humidité (Duriez). Il est suffisant dans le cas d'applications à faible niveau de sollicitation. Pour davantage d'informations sur la méthode française, on pourra consulter (Delorme, Brosseau et al. 2005).

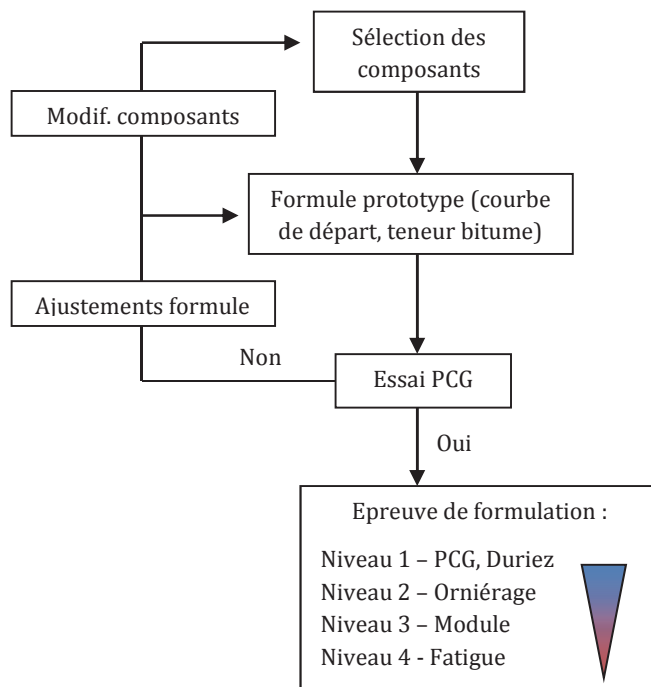


Figure 4-7 : Méthode française de mise au point des mélanges (repris de (Delorme, Brosseau et al. 2005))

Approche suisse de formulation

Il n'existe pas de méthode spécifique suisse de formulation des enrobés bitumineux, la méthode Marshall étant traditionnellement recommandée. Cette méthode Marshall est principalement utilisée afin de déterminer l'optimum de la teneur en bitume pour une composition granulométrique prédéterminée. Différentes éprouvettes sont compactées (compactage Marshall) avec différentes teneurs en liant, puis le pourcentage de vides est déterminé. Un essai de stabilité et fluage Marshall est ensuite effectué sur les éprouvettes une fois compactées. La teneur en liant optimale est déterminée sur la base de ces résultats.

Pour la granulométrie, différentes enveloppes (fuseaux) sont fournies par la normalisation selon le type de mélange et le degré de sollicitation (dicte le choix du bitume). Dans le cadre de l'épreuve de formulation, une série d'essais ou procédures permettant de déterminer les performances de l'enrobé est effectuée. Les exigences formulées concernent: teneur en liant, granulométrie, teneur en vides, sensibilité à l'eau, propriétés Marshall de stabilité et fluage, résistance aux déformations permanentes et parfois résistance à la fatigue ainsi que module de rigidité (enrobés à module élevé). Nous pouvons également relever que la normalisation suisse recourt au module de richesse pour les enrobés à module élevé. Dans (Junod et Dumont 2005), une méthode de formulation basée sur la méthode belge,

complétée par certains essais de laboratoire (module complexe, fatigue, ...) est proposée. Nous utilisons une approche du même type dans cette recherche, avec la limitation des essais de performance et caractérisation puisque l'on ne procède pas à une optimisation des mélanges.

Méthode belge de formulation

Cette méthode de formulation analytique a été développée en Belgique par le Centre de Recherches Routières (CRR). Dans un premier temps, la méthode classe les mélanges en trois familles distinctes, selon leur teneur en filler (< 63 μm), sable (63 μm à 2 mm) et pierres (> 2 mm). La détermination de la famille de mélange se fait à l'aide du diagramme triangulaire (Figure 4-8). La méthode développée ensuite s'adresse aux mélanges à squelette sableux et aux mélanges à squelette pierreux.

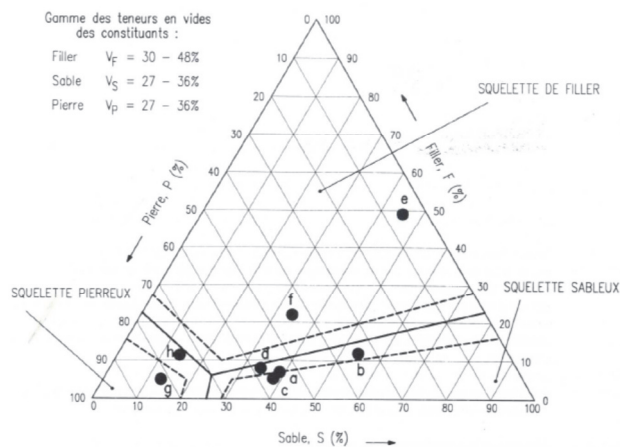


Figure 4-8 : Diagramme triangulaire de distinction entre les mélanges selon leur squelette minéral (Steuperaert et Vanelstraete 1997)

La particularité de la méthode est de reposer à la fois sur des observations expérimentales et sur des essais en laboratoire. Le principe consiste à effectuer une formulation volumique analytique, les résultats étant traduits en masse dans une ultime étape. Le travail en volume permet notamment d'éviter un sur-remplissage des vides du squelette minéral par le mastic, condition indispensable mais non suffisante à de bonnes performances de l'enrobé. Dans cette méthode, les essais de laboratoire sont utilisés comme moyen de vérification des valeurs obtenues par la formulation volumique. La procédure de formulation développée se décompose en trois phases représentées dans la Figure 4-9.

- Phase 1 - Choix et caractérisation des matériaux : Choix des matériaux de base et la détermination des caractéristiques, tel que proposé au chapitre 4.5.
- Phase 2 - Formulation : Les données issues de la première phase sont utilisées ainsi que la définition de la courbe granulométrique cible et ses limites. Pour la formulation, le pourcentage de vides à atteindre ou la teneur en liant cible peuvent être choisis. La composition en volume puis en masse est ensuite calculée (pierre, sable, filler, bitume).
- Phase 3 - Essais : L'utilisation d'essais en laboratoire permet de vérifier les résultats obtenus lors de la formulation analytique. Si nécessaire, la formulation (composition et/ou matériaux) sera corrigée jusqu'à l'obtention d'une composition en adéquation avec les exigences.

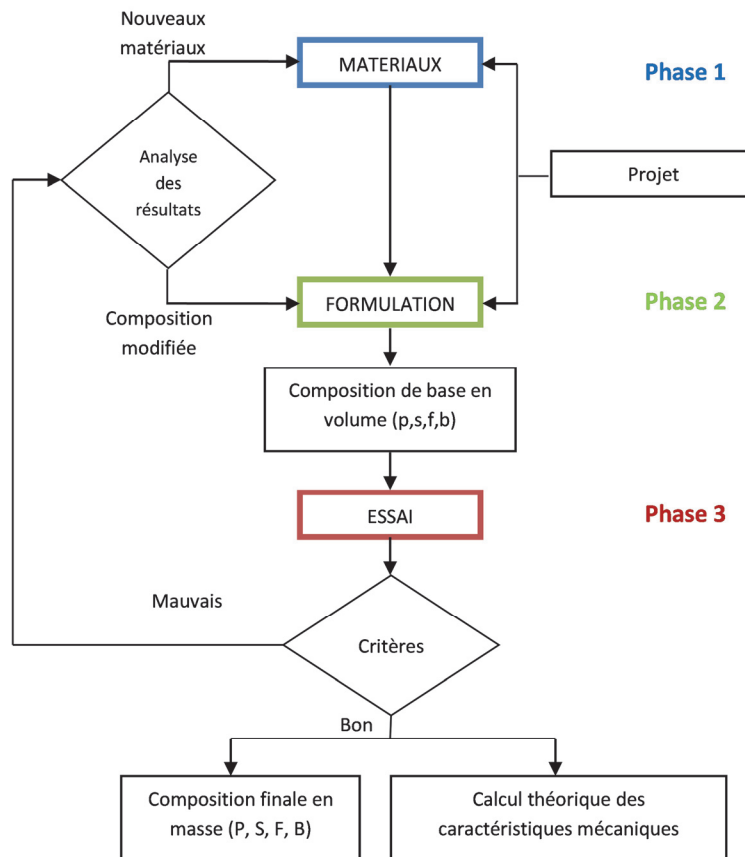


Figure 4-9 : Structure de la méthode belge (CRR) de formulation des enrobés bitumineux (repris de (Steuperaert et Vanelstraete 1997))

La méthode belge de formulation est implémentée dans le logiciel PradoWin 1.3 que nous utilisons dans cette recherche. Ce logiciel dispose également d'un module de prévision des performances selon différents modèles (module complexe de l'enrobé, fatigue, module du liant, déformations permanentes, dilatation thermique, vieillissement attendu, ...). Ce développement ne sera pas utilisé ici. Davantage de détails sur la méthode belge de formulation peuvent être trouvés dans (Franken et Vanelstraete 1993; Steuperaert et Vanelstraete 1997).

Module de richesse

Le liant bitumineux transmet son comportement visco-élastique à l'ensemble du mélange. Il est important d'avoir dans le mélange la quantité de liant strictement nécessaire afin d'enrober tous les grains d'un film de liant suffisant. L'enrobage des grains par le film de liant peut être caractérisé par le module de richesse K . Il caractérisera également la viscosité et la maniabilité de l'enrobé. Le module de richesse est calculé à partir de la surface spécifique des granulats Σ , exprimée en m^2/kg , qui représente la surface développée qu'auraient les granulats assimilés à des sphères. On calcule la surface spécifique selon l'approximation suivante (Delorme, Brosseaud et al. 2005) :

$$100\Sigma = 0.25G + 2.3S + 12s + 150f$$

- G Proportion d'éléments supérieurs à 6.3 mm
- S Proportion d'éléments compris entre 6.3 mm et 0.250 mm
- s Proportion d'éléments compris entre 0.250 mm et 0.063 mm
- f Proportion des éléments inférieurs à 0.063 mm

La norme suisse SN 640 431-1b-NA utilise également la notion de module de richesse (pour les EME). La définition est identique à celle-ci-dessus, avec cependant la prise en compte du passant à 4 mm au lieu de 6.3 mm pour la détermination de G et S.

Le module de richesse K est indépendant de la masse volumique du mélange granulaire et relié à la teneur en liant TL par la relation suivante :

$$TL = K \cdot \alpha \sqrt[3]{\Sigma}$$

α Coefficient correcteur relatif à la masse volumique des granulats, $\alpha=2.65/\rho_g$, avec ρ_g masse volumique des granulats exprimée en g/cm³ (moyenne pondérée)

Σ Surface spécifique des granulats [m²/kg]

Le module de richesse est un paramètre important dans le cadre d'une procédure de formulation. Il permet d'évaluer la teneur en liant optimale de l'enrobé et ainsi réduire le nombre de gâchées nécessaires lors de l'épreuve de formulation. Cette notion est utilisée notamment dans la méthode française de formulation.

4.6.3 Choix d'une formule

Après avoir défini les paramètres de base, présenté les méthodes de formulation et introduit la notion de module de richesse, nous pouvons procéder à la formulation. Comme indiqué précédemment, la formulation se fait sur l'enrobé de référence, sans optimisation par la compactibilité (variation de la teneur en liant).

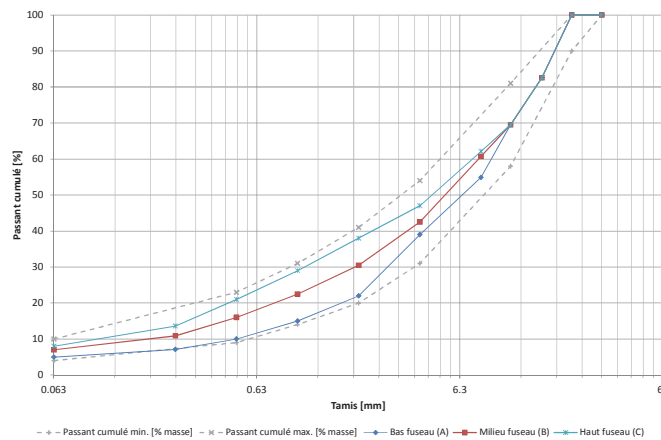
La démarche de formulation est la suivante :

- L'enrobé pour couche de base évalué est un enrobé ACT 22S. La courbe granulométrique se situe traditionnellement en milieu de fuseau (Figure 4-6). La fraction granulométrique des sables (0.063-4 mm) et la teneur en filler ont une grande incidence sur le comportement mécanique et les performances de l'enrobé. Pour cela, trois différentes granulométries balayant le fuseau admissible sont testées dans un premier temps (variation des composants inférieurs à 4 mm) :
 - A. Bas de fuseau
 - B. Milieu de fuseau
 - C. Haut de fuseau
- Pour chacune de ces courbes granulométriques, la teneur en liant cible est calculée sur la base du module de richesse visé.
- La formulation est ensuite réalisée avec l'outil PradoWin afin de vérifier l'applicabilité et effectuer une estimation des tendances de la teneur en vides. Si nécessaire, les formules sont alors corrigées jusqu'à l'obtention d'une recette satisfaisante.
- Lorsqu'une formulation satisfaisante est obtenue, une gâchée test en laboratoire est réalisée. Les vides Marshall et la compactibilité PCG sont déterminés, et le respect des exigences de la normalisation suisse vérifié (teneur en liant, teneur en vides).
- Sur la base de ces trois courbes et des résultats obtenus, la courbe granulométrique finale est déterminée.

La granulométrie des trois courbes testées initialement est indiquée dans le Tableau 4-6 et la Figure 4-10. Ces recettes, qui se distinguent par les fractions de granulats inférieurs à 4 mm, respectent le fuseau limite de la norme suisse.

Tableau 4-6 : Courbes granulométrique de base (bas-milieu-haut fuseau), enrobé AC T 22S

Tamis [mm]	Passant cumulé [% masse]			
	Bas fuseau (A)	Milieu fuseau (B)	Haut fuseau (C)	Exigences SN
31.5	100.0	100.0	100.0	100.0
22.4	100.0	100.0	100.0	90.0 ... 100.0
16	82.6	82.6	82.6	-
11.2	69.5	69.5	69.5	58.0 ... 81.0
8	54.9	60.7	62.1	-
6.3	50.8	53.0	55.7	-
4	39.0	42.5	47.0	31.0 ... 54.0
2	22.0	30.5	38.0	20.0 ... 41.0
1	15.0	22.5	29.0	14.0 ... 31.0
0.5	10.0	16.0	21.0	9.0 ... 23.0
0.25	7.1	10.9	13.6	-
0.063	5.0	7.0	8.0	4.0 ... 10.0

**Figure 4-10 : Représentation des courbes granulométriques de base (bas-milieu-haut fuseau), enrobé AC T 22S**

Sur la base de ces courbes granulométriques, la teneur en liant est estimée en fonction du module de richesse visé. (Dumont 2003) indique que le module de richesse varie de 2.75 pour les enrobés donnant le maximum de résistance aux déformations à 3.5 pour les enrobés les plus souples. Les enrobés pour couche de base AC T doivent avoir un bon comportement à la fatigue et donc être relativement riches en bitume, tout en proposant également de bonnes performances mécaniques à l'orniérage. Pour les différentes formulations un module de richesse de 3.1 est visé dans un premier temps, ce qui correspond à un mélange relativement compact et fermé. Il est a priori moins dommageable d'avoir une teneur en vides légèrement trop faible. Le Tableau 4-7 indique les résultats du calcul de la teneur en liant. Le module de richesse est calculé selon la méthode de formulation française (plus récente) ; la différence avec la méthode issue de la normalisation suisse est négligeable.

Tableau 4-7 : Calcul de la teneur en liant en fonction du module de richesse imposé (K=3.1)

	Bas fuseau (A)	Milieu fuseau (B)	Haut fuseau (C)
Module de richesse visé K	3.10	3.10	3.10
Surface spécifique [m ² /kg]	8.884	12.048	13.747
Masse volumique des granulats [g/cm ³]	2.700	2.700	2.700
Teneur en liant sur granulat [%]	4.71	5.00	5.14
Teneur en liant sur enrobé [%]	4.50	4.76	4.89

Une fois la granulométrie et la teneur en liant définies, un calcul avec l'outil PradoWin est fait afin de vérifier l'applicabilité des formules et estimer les tendances de la teneur en vides. Une gâchée est ensuite réalisée pour chaque formulation. Le passage entre la courbe granulométrique et la masse nécessaire de chaque composant pour la fabrication en laboratoire est fait à l'aide d'une feuille de calcul spécialement développée. Ce solveur, adaptable à tous les types d'enrobés, permet de considérer si nécessaire l'ajout de matériaux recyclés ou additifs divers (voir Annexe A). Les résultats de teneur en vides PCG et Marshall, ainsi que la teneur en vides calculée selon la méthode belge sont indiqués dans le Tableau 4-8.

Tableau 4-8 : Teneurs en vides pour les courbes granulométriques de base (bas-milieu-haut fuseau)

	Bas fuseau (A)	Milieu fuseau (B)	Haut fuseau (C)
Teneur en liant sur enrobé [%]	4.50	4.76	4.89
Marshall 50/50 – vides hydrostatiques [%]	7.40	3.40	3.60
PCG – vides géométriques 80 girations [%]	9.70	5.40	4.10
PCG – vides géométriques 200 girations [%]	6.80	3.00	2.60
PCG – vides hydrostatiques 200 girations [%]	4.10	1.50	1.30
Prado – volume des vides calculés [%]	7.71	0.08	2.71

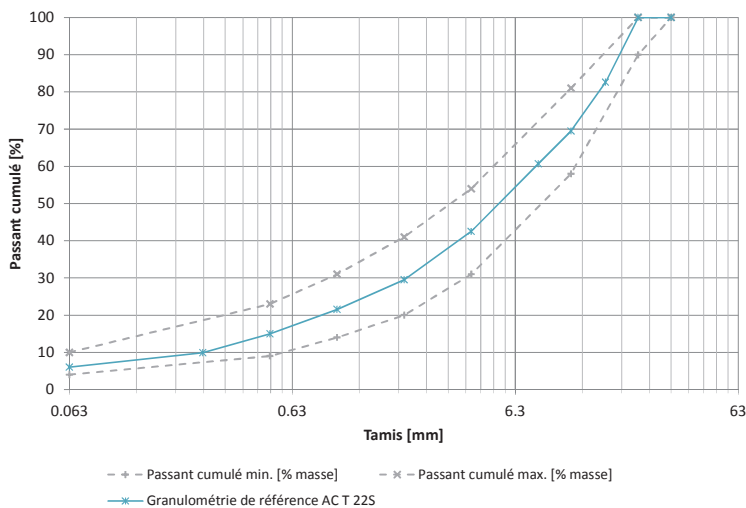
Nous pouvons observer :

- Les exigences de la norme SN 640 431-1b-NA sont de 4% à 7% pour la teneur en vides Marshall 50/50 et $\geq 4\%$ pour la teneur en liant sur enrobé.
- Avec le module de richesse imposé (K=3.1), les teneurs en liant calculées respectent les exigences.
- La teneur en vides Marshall est trop importante pour la formule de bas de fuseau et légèrement trop faible pour les deux autres formules (milieu-haut de fuseau). L'optimum pour la teneur en vides Marshall semble se situer entre la courbe milieu de fuseau et la courbe bas de fuseau.
- Pour la PCG, on estime généralement que 10 girations de compactage correspondent à environ un centimètre d'enrobé in-situ. L'épaisseur recommandée pour les AC T 22S est de 65 à 100 mm (SN 640 430b). Afin d'utiliser une valeur représentative, l'hypothèse est faite que la formulation est destinée à une couche de 80 mm d'épaisseur. Pour cela, la compacité à 80 girations est également indiquée. Les vides PCG à 200 girations ne sont pas spécifiquement utilisés pour l'analyse.
- Le volume des vides calculés avec l'outil PradoWin fournit également des indications quant aux tendances générales. On observe un biais entre PradoWin et les vides (Marshall) obtenus en laboratoire. Ceci est compréhensible étant donné que la méthode volumétrique a été développée

initialement pour des matériaux belges. De plus, les hypothèses lors de la modélisation (granulats anguleux, pas de pertes de fines provenant des sables et des pierres, ...) ne sont pas nécessairement adaptées au cas réalisé. Dans notre analyse, une approche par module de richesse a été privilégiée à l'indicateur de rigidité du mastic utilisé dans la méthode belge. Cet indicateur évalue le pouvoir rigidifiant du filler en fonction de l'accroissement de la température anneau et bille associé à un volume de filler ajouté à du bitume. Le changement de consistance du mastic dépend du pourcentage de vides du filler sec compacté (essai Rigden) et du rapport filler/bitume. Dans le cas de bitumes purs, l'expérience indique que l'accroissement du point de ramollissement anneau et bille doit être compris entre 12 et 16 °C pour garantir une bonne rigidité du mastic.

L'utilisation de PradoWin dans cette étude est essentiellement dans le but de limiter les essais de laboratoire, une fois le biais entre valeurs théoriques et essais de laboratoire identifié. On travaille donc en relatif. La méthode est particulièrement utile dans le cas d'une optimisation de la formulation afin d'éviter la multiplication des fabrications avec différents teneurs en liant.

La formulation finale est basée sur les résultats obtenus avec les trois gâchées test, ainsi que sur une gâchée additionnelle réalisée avec matériaux écrêtés (granulats tamisés) permettant de maîtriser parfaitement la granulométrie. Le choix final de la recette doit respecter les exigences de teneur en vides et teneur en liant. Cette courbe se situe entre les formules milieu et bas de fuseau. On observe également le rôle très important des fractions fines. Afin d'augmenter légèrement la teneur en vides par rapport à la courbe de milieu de fuseau, une teneur en filler intermédiaire de 6% est choisie. De plus, la teneur en liant est diminuée de 0.4% par rapport à la formule de milieu de fuseau. Avec une teneur en liant sur granulats de 4.60% (4.40% sur enrobé), le module de richesse reste suffisamment élevé (2.92) pour garantir un enrobage satisfaisant des granulats. La formule de référence pour laquelle une teneur en vides Marshall 50/50 de 5.6% est obtenue est finalement représentée dans la Figure 4-11.



Tamis [mm]	Passant cumulé [% masse]
22.4	100.00
16.0	82.60
11.2	69.50
8.0	60.70
4.0	42.50
2.0	29.50
1.0	21.50
0.5	15.00
0.063	6.00

Figure 4-11 : Courbe granulométrique AC T 22S pour réalisation des essais de laboratoire

Cette courbe granulométrique ainsi que la teneur en liant de 4.40% sur enrobé (4.60% sur granulats) seront conservés pour l'ensemble de la recherche. La formulation proposée correspond bien aux formules trouvées généralement en Suisse (milieu inférieur du fuseau de la norme).

4.7 Fabrication des enrobés tièdes en laboratoire

4.7.1 Procédure de fabrication

La méthode de fabrication des enrobés tièdes en laboratoire est définie en fonction du type de malaxeur utilisé (Guedu à hélice horizontale, gâchée maximale de 42 kg). Chacune des méthodes de fabrication (conditionnement des composants et séquence d'enrobage) a été préalablement discutée avec les fournisseurs et validée, ceci afin d'être représentatif de la bonne pratique. Les températures de conditionnement des différents composants et de compactage des échantillons sont consignées dans le Tableau 4-9.

Tableau 4-9 : Récapitulatif des conditions pour la fabrication et le compactage des enrobés

		REF	ET-C	ET-P	EST
Formule		AC T 22S	AC T 22S	AC T 22S	AC T 22S
Additif		-	Cire	Chimique	Fluxant
Teneur additif		-	3%/b.	0.4%/b.	0.4%/b.
Conditions de fabrication					
Température granulats		155 °C	130 °C	130 °C	150 °C
Température sable		155 °C	130 °C	130 °C	150 °C*
Température filler		155 °C	130 °C	130 °C	150 °C
Température bitume		155 °C	135 °C	130 °C	150 °C
Température malaxeur		155 °C	125 °C	125 °C	105 °C
Confection des éprouvettes					
Eprouvettes PCG	Durée conditionnement	50 mn	50 mn	50 mn	50 mn
	Température compactage	150 °C	120 °C	120 °C	100 °C
Eprouvettes Marshall	Durée conditionnement	50 mn	50 mn	50 mn	50 mn
	Température compactage	135 °C	120 °C	120 °C	100 °C

* : 75% du sable, 25% à température ambiante et humide (6%)

Nous pouvons encore préciser :

- Le choix de la température de compactage des échantillons d'enrobé tiède est expliqué dans la suite de ce chapitre. Pour l'enrobé à chaud, les recommandations de la normalisation sont utilisées.
- Le conditionnement des granulats, sable et filler se fait durant 14h à 18h. Le conditionnement du bitume se fait sur une durée de 3h à 5h.
- Les additifs sont mélangés avec le bitume environ 20-30 mn avant fabrication de l'enrobé. Pour garantir un bon mélange de la cire, une étuve thermo-ventilée avec hélice rotatrice tournant à une vitesse de 250 t/min est utilisée.
- Après fabrication, l'enrobé est stabilisé en étuve durant 50 mn à la température de compactage, avant confection des éprouvettes. Le vieillissement appliqué correspond approximativement au vieillissement RTFOT du liant (vieillessement à court terme).

La fabrication des enrobés REF, ET-C et ET-P se fait selon la séquence d'enrobage suivante :

1. Préchauffage du malaxeur.
2. Mise en route du malaxeur.
3. Insertion des granulats et du sable dans le malaxeur.
4. Ajout du bitume.
5. Ajout du filler.
6. Malaxage.

La durée totale de fabrication d'une gâchée (points 2. à 6.) est de 5 mn environ.

L'enrobé EST nécessite une légère modification de la séquence de fabrication. Les granulats et le sable chaud (75%) sont insérés au point 3. Le sable restant (25%), froid et humide (6% humidité), est inséré après l'ajout du filler. Afin de garantir un bon enrobage, la durée de malaxage est augmentée d'une minute dans le cas de l'EST. Cette augmentation du temps de malaxage est également requise sur des centrales discontinues équipées de malaxeurs « classiques ». Pour pallier à ceci, des malaxeurs plus puissants avec un poids de gâchée supérieur sont installés sur les centrales. A titre d'illustration, une séquence d'enrobage en centrale discontinue pour le même type d'enrobé EST est indiquée dans la Figure 4-12 (temps indiqué en secondes).

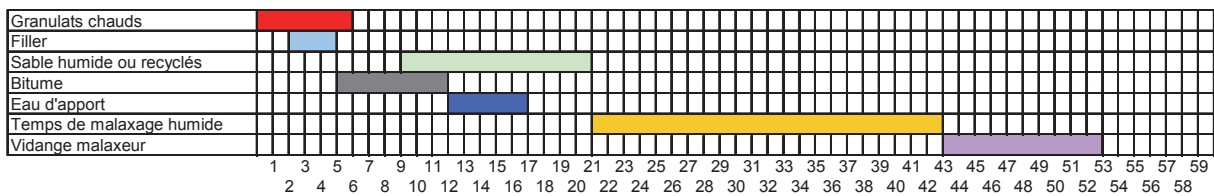


Figure 4-12 : Exemple de séquence d'enrobage en centrale (enrobé EST)

Le conditionnement des différentes fractions, la séquence d'enrobage précise ainsi que la mesure de la température de l'enrobé sont consignés dans des protocoles pour chacune des fabrications. Un exemple est fourni en Annexe A.

4.7.2 Température de compactage des échantillons

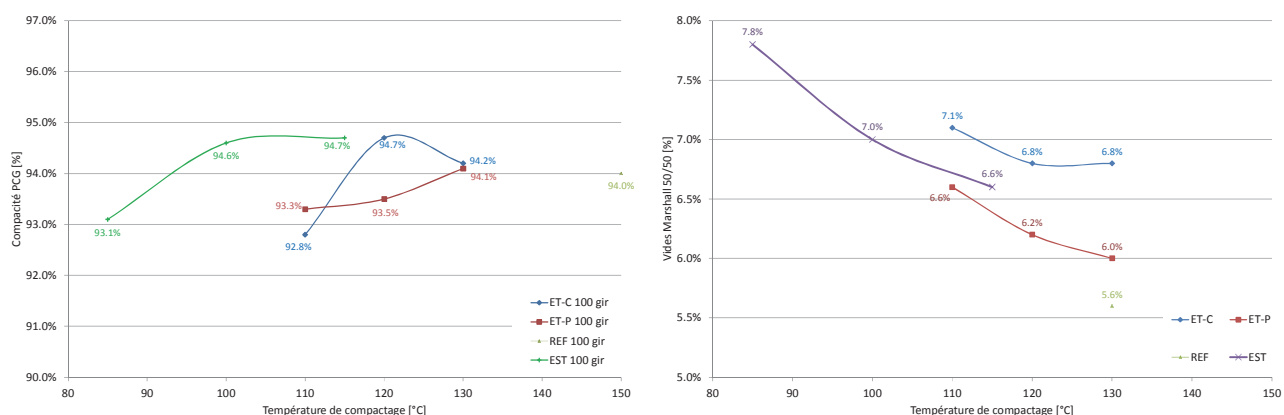
La température de compactage des échantillons d'enrobé à chaud est définie dans la normalisation. L'utilisation de températures semblables (135 °C pour le compactage Marshall et 150 °C pour le compactage PCG) n'a pas de sens dans le cas d'enrobés tièdes. La température de compactage propre à chaque technologie doit donc être déterminée. Une approche par équi-compacité est réalisée. Cette méthode est également décrite dans les recommandations allemandes concernant les enrobés tièdes (Radenberg 2006).

Soit la référence à chaud et la compacité Marshall, respectivement PCG. Pour les enrobés tièdes évalués, des échantillons Marshall et PCG sont compactés à différentes températures afin de déterminer la température optimale (i.e. minimale) de compactage permettant d'atteindre une compacité comparable à celle obtenue pour la référence à chaud. La gamme de températures de compactage est définie sur la base de la littérature et de recommandations des fournisseurs. Les résultats bruts sont indiqués dans le Tableau 4-10. La Figure 4-13 représente la compacité PCG et les vides Marshall en fonction de la température de compactage.

Tableau 4-10 : Teneur en vides en fonction de la température de compactage des échantillons

	REF	ET-C			ET-P			EST		
Temp. compactage [°C]	150/135	110	120	130	110	120	130	85	100	115
Essai Marshall 50/50										
Vides hydrostatiques [%]	5.6	7.1	6.8	6.8	6.6	6.2	6.0	7.8	7.0	6.6
Masse vol. ap. [Mg/m ³]	2.380	2.341	2.349	2.349	2.353	2.364	2.396	2.322	2.345	2.355
Presse à cisaillement giratoire (PCG)										
Vides géom. 1 gir. [%]	22.9	23.9	21.7	22.2	23.3	23.2	22.4	24.4	21.6	21.9
Vides géom. 100 gir. [%]	6.0	7.2	5.3	5.8	6.7	6.5	5.9	6.9	5.4	5.3
Vides géom. 200 gir. [%]	4.0	5.2	3.7	3.9	4.8	4.6	4.1	5.1	3.8	3.6

La compacité à 1 giration est une compacité calculée sur la base d'une relation linéaire entre le compactage PCG et le logarithme du nombre de girations. Ce pourcentage de vide indique l'état du matériau sous une très faible énergie. Un mélange trop compact après 1 ou 10 girations présentera une maniabilité excessive probablement liée à un faible frottement interne du squelette granulaire. Cela peut être le signe d'un risque de faible résistance à l'orniérage. La pente de la relation linéaire compacité-nombre de girations (log) est également un indicateur de la maniabilité du mélange.

**Figure 4-13 : Compacité PCG à 100 girations (gauche) et vides Marshall 50/50 (droite) en fonction de la température de compactage**

Le compactage Marshall fournit systématiquement une teneur en vides supérieure pour les enrobés tièdes que pour la référence à chaud (5.6%). Cependant, étant donné la taille maximale des granulats de l'enrobé ($D_{max}=22$ mm), les éprouvettes Marshall ne sont pas nécessairement représentatives. Selon l'arrangement granulaire, la teneur en vides peut sensiblement augmenter. Pour cela, l'analyse est conduite prioritairement sur la compacité obtenue à la presse à cisaillement giratoire qui s'avère plus représentative. La compacité PCG de la référence à chaud et des enrobés tièdes est comparable (Figure 4-14). La compacité (100 girations) n'évolue que peu (pas) à partir d'une certaine température i.e. compacter à des températures supérieures n'apporte pas un gain de compacité significatif. Ceci est particulièrement visible pour l'EST et l'ET-C. Les températures de compactage suivantes sont finalement choisies :

- ET-C : 120 °C
- ET-P : 120 °C
- EST : 100 °C

Ce choix de températures est en adéquation avec les recommandations et exigences des fournisseurs ainsi qu'avec les résultats de l'étude complémentaire faite pour l'enrobé ET-C (Pilloud et Pittet 2010).

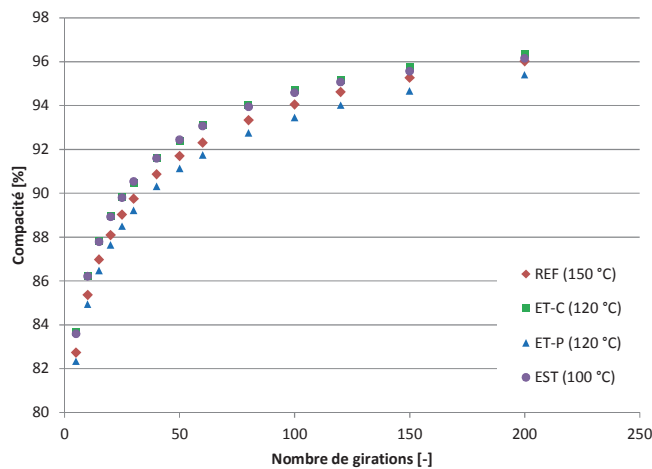


Figure 4-14 : Evolution de la compacité PCG aux différentes températures de compactage

D'un point de vue pratique, la teneur en vides sur échantillons confectionnés en laboratoire pour ce type d'enrobé (couche de base) est généralement supérieure à la teneur en vides obtenue in-situ. Ceci est lié à la masse relativement grande d'enrobé posée pour ces couches, ce qui limite la déperdition calorifique et facilite la mise en place. Le phénomène opposé est observé pour les couches de surface (faible épaisseur et déperdition calorifique relativement rapide) où la teneur en vides in-situ est en règle générale plus élevée qu'en laboratoire.

4.8 Maîtrise de la viscosité

Les différentes familles d'enrobés tièdes appliquent le même principe général de maintien d'une viscosité suffisamment basse aux températures de fabrication, de pose et de compactage, tout en réduisant sensiblement ces températures par rapport aux enrobés à chaud. De plus, cette baisse de viscosité doit être limitée aux températures de service afin de garantir de bonnes performances, à l'orniérage notamment. La maîtrise de la viscosité est donc un paramètre clef des enrobés tièdes. Ce chapitre propose une analyse spécifique de la viscosité du liant, du mastic et des enrobés. Sous le terme de mastic, nous comprenons le mélange de filler et de bitume.

4.8.1 Définition de la viscosité

La viscosité exprime la dépendance entre la vitesse de déformation d'un matériau et la contrainte à laquelle il est soumis. Elle caractérise la résistance d'un matériau à l'écoulement (mesure de son frottement interne). L'étude de la rhéologie d'un matériau consiste à analyser l'écoulement ou la déformation sous l'effet des contraintes appliquées et de leur évolution dans le temps.

Soumis à une contrainte, les matériaux peuvent présenter deux types de comportements idéaux : comportement élastique ou comportement visqueux. Le plus souvent, on observera un comportement viscoélastique situé entre ces deux extrêmes. Dans le cas d'un comportement élastique le solide soumis à une contrainte atteint un état d'équilibre, avec une réponse réversible indépendante du temps et proportionnelle à la contrainte imposée. Nous avons alors :

$$\tau = \gamma \cdot G$$

- Contrainte de cisaillement τ [Pa]
- Déformation en cisaillement γ

- Module de cisaillement G [Pa]

Dans le cas d'un comportement visqueux, le liquide soumis à une contrainte se déforme continuellement dans le temps. La réponse est irréversible et elle dépend du temps d'application de la contrainte :

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$$

- Vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ [s^{-1}]
- Viscosité dynamique η [$Pa \cdot s$]

Un comportement newtonien correspond à un liquide dont la viscosité dynamique est constante (indépendante du niveau de contrainte et de la vitesse de déformation). Ceci est pratiquement le cas du bitume routier à haute température (température de fabrication 150-160 °C). La Figure 4-15 illustre le domaine newtonien d'un bitume à différentes températures. On peut observer que la largeur du domaine linéaire (comportement newtonien) croît avec la température.

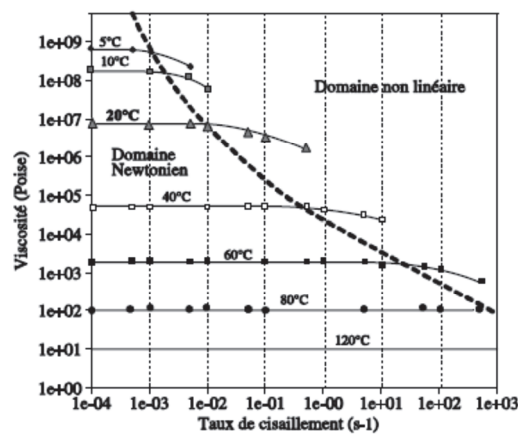


Figure 4-15 : Comportement newtonien d'un bitume à différentes températures (Corté et Di Benedetto 2005)

Dans le cas d'un fluide non newtonien, η dépend alors de $\dot{\gamma}$. La viscosité dynamique η peut également être exprimée en poise (10 poise = 1 Pa·s).

On distingue la viscosité dynamique η , exprimée en Pa·s et la viscosité cinématique $\nu = \eta/\rho$, exprimée en m^2/s . ρ est la masse volumique, dépendante de la température. La variation de masse volumique du bitume en fonction de la température est très limitée (Corté et Di Benedetto 2005).

Le bitume routier possède de façon générale un comportement viscoélastique. Soumis à une variation brutale de la contrainte de cisaillement, un régime transitoire apparaît pendant lequel la structure évolue avant de se stabiliser. La modélisation du comportement rhéologique du bitume fait généralement intervenir des éléments élastiques et des éléments purement visqueux.

On entre dans le domaine de la rhéologie cyclique (ou dynamique) lorsque la sollicitation du matériau est un cisaillement oscillatoire de pulsation imposée ω , la contrainte et la vitesse de cisaillement évoluant continuellement au cours du temps mais de manière déphasée l'une par rapport à l'autre (Golaz 2007). Il vient alors :

- Déphasage entre la contrainte et la déformation de cisaillement δ [°]
- Module complexe de cisaillement $|G^*| = \tau_{\max} / \gamma_{\max}$ [Pa]
- Module de conservation ou module élastique $G' = |G^*| \cos(\delta)$ [Pa]
- Module de perte ou module visqueux $G'' = |G^*| \sin(\delta)$ [Pa]

Le déphasage δ est également appelé angle de perte ou angle de phase. Un solide élastique parfait aura un module de perte $G''=0$ et un déphasage δ de 0° . Toute l'énergie transmise est restituée. Un liquide totalement visqueux aura un module élastique (appelé également module dynamique) $G'=0$ et un déphasage de 90° . Dans ce cas, toute l'énergie transmise est dissipée sous forme de chaleur.

Dans le domaine où le bitume est à l'état fluide, différentes méthodes de mesures de la viscosité existent (Corté et Di Benedetto 2005). Nous utilisons ici le viscosimètre cône-plaque pour les mesures sur liant et le rhéomètre plan-plan pour les mesures sur mastic.

4.8.2 Essais de caractérisation sur liants

Les liants considérés dans ce chapitre sont les liants de base (pas issus d'une extraction). Des mesures de viscosité dynamique sur liants sont effectuées avec un viscosimètre cône et plaque lors des essais de caractérisation. En plus des quatre liants de la recherche, des mesures sont également faites pour des teneurs en cire de 2% et 4%. Ces résultats additionnels avec ajout de cire sont issus de l'étude (Pilloud et Pittet 2010). Le Tableau 4-11 contient les résultats de caractérisation des liants ainsi que les mesures de viscosité. Notons que les essais sur bitume EST font abstraction de l'humidité des sables et donc du moussage du bitume ; ils correspondent à l'ajout de l'additif au liant de base.

Tableau 4-11 : Caractérisation du liant de base et des liants additivés

	REF	ET-P	EST	ET-C		
	50/70 base	50/70+0.4% add. chim.	50/70+0.4% fluxant	50/70+2% cire	50/70+3% cire	50/70+4% cire
Pénétration 25 °C [10^{-1} mm]	55	57	62	40	36.5	38
Temp. A&B [°C]	51.9	51.2	52	74.1	79.2	80.1
IP [-]	-0.5	-0.6	-0.2	2.9	3.3	3.6
Viscosité 60 °C [10^{-1} Pa·s]	2662	2509	2202	2765	2560	3021
Viscosité 90 °C [10^{-1} Pa·s]	115	106	99.2	102	83.2	92.8
Viscosité 110 °C [10^{-1} Pa·s]	24	21.2	20.8	19.6	16.8	16
Viscosité 130 °C [10^{-1} Pa·s]	6.4	6.4	6	5.8	5	4.8
Viscosité 150 °C [10^{-1} Pa·s]	2.5	2.4	2.4	2.3	2	2

- Par rapport au liant de base, la pénétration n'est pas modifiée significativement par l'ajout d'additif chimique (ET-P) alors que le fluxant (EST) augmente légèrement la pénétration. L'effet de la cire (3%) est clairement visible avec une diminution de la pénétration à 25 °C de $18.5 \cdot 10^{-1}$ mm, ce qui représente une différence de 33% par rapport à la référence.
- La température anneau et bille est sensiblement affectée par l'ajout de cire (3%), sa valeur augmentant de plus de 52% par rapport au liant de base. L'ajout de fluxant ou d'additif chimique ne semble pas affecter la température anneau et bille.
- L'analyse de l'indice de pénétration met également en évidence l'effet de la cire, comparativement au fluxant et à l'additif chimique (agent tensio-actif). Les liants des enrobés EST, ET-P et REF ont une valeur légèrement négative, proche de zéro, ce qui indique qu'ils sont moyennement susceptibles à la température. L'IP du liant de l'enrobé ET-C est par contre largement positif ce qui indique une diminution de la sensibilité à la température. Cette tendance et sa représentativité doivent cependant être considérées avec précaution car l'indice IP correspond à une température bien définie de l'essai de pénétration (25 °C).

- Les essais avec un taux de 2% et 4% de cire confirment les tendances observées. On peut remarquer qu'avec l'augmentation de la teneur en cire, l'effet sur les propriétés du liant se stabilise. Une teneur optimale en cire pourrait être déterminée.

Une représentation des courbes de consistance selon Heukelom est effectuée. L'échelle utilisée pour la représentation de la consistance C en fonction de la viscosité η est donnée par la relation (Dumont 2003):

$$C = 1310 \cdot \frac{\log(\eta)}{4.35 + \log(\eta)} [-]$$

La consistance varie de 0 à 1000. Elle est de 986 pour le point Fraass (non déterminé dans notre cas). On admet également qu'à la température anneau et bille la pénétration est de 800 et la consistance de 637.1. Les courbes de consistance selon Heukelom sont représentées dans la Figure 4-16.

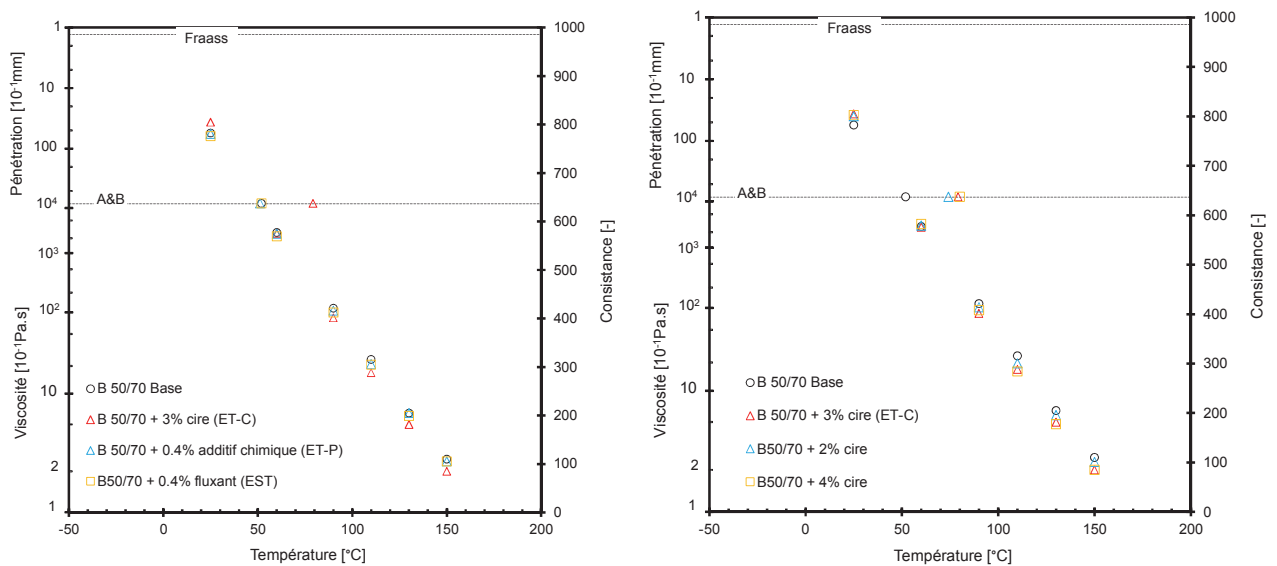


Figure 4-16 : Courbes de consistance selon Heukelom pour les liants utilisés dans la recherche (gauche) et différents teneurs en cire (droite)

- Pour le bitume 50/70 de base, la représentation de la consistance est une droite (bitume de distillation directe). Pour les liants additivés avec fluxant et additif chimique, la représentation est également très proche d'une droite. Les courbes de consistance des bitumes ET-P, EST et REF sont superposées à des températures inférieures à 80 °C. A des températures élevées, les courbes EST et ET-P présentent une consistance légèrement plus faible que le liant de référence. Les droites étant parallèles, ceci indique une susceptibilité thermique comparable au bitume de référence. On peut donc remarquer l'effet de l'agent tensio-actif (ET-P) qui n'agit pas (ou peu) sur le liant, mais à l'interface liant-granulat. L'ajout de fluxant (EST) réduit davantage la viscosité du bitume que l'agent tensio-actif, la pénétration étant également augmentée par rapport au bitume de référence.
- L'ajout de cire modifie significativement la viscosité et donc la consistance du bitume. La courbe de consistance est alors divisée en deux segments distincts. On observe aux températures de service une consistance plus élevée que le bitume de base alors qu'à températures élevées (dès 90 °C), lorsque la cire a fondu, la consistance (et la viscosité) est diminuée par rapport à la référence.
- La comparaison des courbes de consistance avec différentes teneurs en cire (2%, 3% et 4%) illustre le gain modéré d'un ajout de 4% de cire par rapport au cas de base avec 3%,

comparativement au gain plus important obtenu entre un ajout de 2% et 3% de cire. Ceci est particulièrement visible sur la température anneau et bille (T_{AB}). Un ajout de 3% de cire augmente T_{AB} de 53% par rapport au bitume brut, alors qu'un ajout de 2% et 4% de cire augmente T_{AB} de respectivement 42% et 54%. L'effet sur la viscosité à la température de compactage (110-130 °C) est du même ordre de grandeur. Le gain obtenu avec une teneur en cire supérieure à 4% semble modéré alors que 2% de cire n'exploite pas l'entier du potentiel. Le choix d'une teneur en cire de 3%, tel que recommandé par le fournisseur, est confirmé par ces résultats de caractérisation et les courbes de consistance.

Il est par ailleurs intéressant de noter que la représentation de Heukelom permet de déterminer la température de compactage (viscosité dynamique $10 \cdot 10^{-1}$ Pa·s) et la température d'enrobage (viscosité dynamique $2 \cdot 10^{-1}$ Pa·s). Ces notions ne prennent en compte que la consistance du liant et pas l'enrobé. Elles ont été développées initialement pour des liants traditionnels pour lesquels tous les points s'alignent afin de former une droite. Le diagramme reste valable dans le cas de liants modifiés ou additivés, mais les courbes peuvent alors être discontinues et l'interprétation doit être faite avec précaution. (Corté et Di Benedetto 2005) mentionne qu'à l'origine, les bitumes présentant deux segments de droite ne se rejoignant pas à la température anneau et bille étaient rejetés.

4.8.3 Essais étendus sur liants et mastics

Le mastic a un rôle prépondérant sur la résistance de l'enrobé bitumineux, notamment son comportement à la fatigue et à l'orniérage. L'indicateur de rigidité du mastic (mastic stiffness indicator) et le module de richesse sont des paramètres qualifiant la qualité du mastic et de l'enrobage des grains. Des mesures rhéologiques permettent d'apporter des informations complémentaires quant à la compréhension et la quantification des mécanismes des enrobés tièdes.

Une analyse de la viscosité du mastic ne peut être réalisée avec le rhéomètre cône et plaque traditionnellement utilisé pour les mesures sur liant; l'appareil nécessitant un matériau macroscopiquement homogène. De plus, la plage de températures d'essai est relativement limitée. Les essais étendus ont été réalisés avec un rhéomètre TA Instruments de la série AR2000, mis à disposition par le Laboratoire de Technologie des Composites et polymères (LTC) de l'EPFL. Ce rhéomètre est piloté avec le logiciel « Rheology Advantage » pour la commande, le traitement et l'analyse des données.

Le viscosimètre à plans parallèles utilisé permet d'effectuer les mesures selon les normes SN 670 559 et EN 14770 relatives au rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR). Les conditions et paramètres d'essais peuvent cependant varier dans le cadre de cette étude exploratoire. La mesure sur mastic n'étant pas normalisée, nous effectuons quelques adaptations et modifications de la méthode. L'expérience acquise par (Golaz 2007) lors de mesures précédentes fournit également de précieuses informations.

Le rhéomètre à plans parallèles impose une sollicitation rotationnelle variable pour une fréquence donnée. Les caractéristiques principales relatives au rhéomètre et à l'essai sont les suivantes :

- Tige du rhéomètre montée sur palier à air (gain de précision).
- Système Peltier de régulation en température (système à eau, la plaque inférieure est réglée en température et un temps de stabilisation est observé).
- Diamètre des plaques : 25 mm
- Sollicitation dynamique de 0.5 Hz (3.14 rad/s.)
- Amplitude de déformation : 0.1%
- Entrefer initial : 0.8 à 1.0 mm
- Balayage en température de 155 °C à 15 °C, par incréments de 10 °C
- Gradient de température 5 °C/min

- Palier de stabilisation de la température : 2 mn

Nous pouvons relever qu'il a été choisi de réaliser un balayage en température, à la fréquence fixe de 0.5 Hz. Il aurait également été possible de réaliser un balayage en fréquence (par exemple 0.5 Hz à 50 Hz) ce qui permet de fournir des informations additionnelles.

L'entrefer est variable selon la dilatation de l'échantillon. La norme EN 14770 recommande une valeur située entre 0.5 et 2.0 mm. Dans ses travaux sur le bitume caoutchouc, (Ould-Henia 2005) mentionne un ratio minimum de 4 entre l'entrefer et le diamètre maximal des inclusions.

L'amplitude de la déformation dépend du domaine de linéarité de l'échantillon sur la plage de températures testées. Ce paramètre est discuté plus loin.

Pour des raisons d'ordre pratique relatives au matériau testé, les essais sont effectués de 150 °C à 15 °C. Une procédure par paliers de températures est choisie, avec stabilisation à la température d'essai, avant réalisation de la mesure. Cette procédure est plus précise que la « rampe » de température qui consiste à effectuer des mesures en continu, puis à interpoler pour déterminer les points de calcul souhaités.

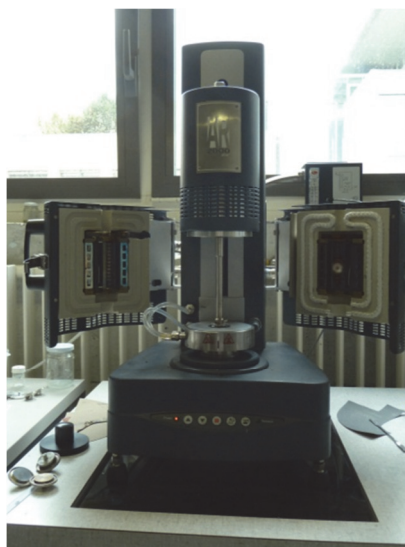


Figure 4-17 : Rhéomètre AR2000 du LTC (EPFL) avec système Peltier

Les résultats obtenus sont la viscosité dynamique η^* [Pa·s], le module complexe de cisaillement G^* [Pa], le module élastique G' , le module visqueux G'' et le déphasage entre la contrainte et la déformation de cisaillement δ .

La procédure pour la réalisation des essais est basée sur le manuel d'instruction du rhéomètre (Guide pour installer les rhéomètres « AR series » avec le logiciel Rheology advantage) ainsi que sur le mode opératoire décrit en Annexe A.

Plan d'expérience

Des mesures sur liants et sur mastics sont effectuées dans une large gamme de températures. L'enrobé EST, avec maîtrise de la teneur en eau, ne permet pas de réaliser des mesures stables et fiables sur mastic et liant. Ceci a été observé également par (Golaz 2007). Les cas suivants sont finalement retenus :

- Liant 50/70 (REF)
- Liant 50/70 + 3% cire (ET-C)
- Liant 50/70 + 0.4% additif chimique (ET-P)
- Mastic (REF)
- Mastic ET-C (cire)

- Mastic ET-P (additif chimique)

Composition du mastic

Les proportions de filler et de liant dans le mastic sont calculées sur la base du module de richesse (voir chapitre 4.6). La surface spécifique des granulats Σ est largement dépendante de la proportion de filler. Dans un mastic, la seule fraction granulométrique est le filler. Il vient :

$$\Sigma = 1.5 \cdot f$$

Σ Surface spécifique des granulats [m^2/kg]

f Proportion des éléments inférieurs à 0.063 mm

Le module de richesse de l'enrobé étant connu ($K=2.92$), la teneur en liant sur filler est calculée en supposant un mélange fictif contenant uniquement du filler à 6% en masse selon la formulation.

Tableau 4-12 : Calcul de la teneur en liant sur filler (mastic)

Teneur en filler [% masse]	6.00
Module de richesse [-]	2.92
Surface spécifique [m^2/kg]	9.00
Masse volumique filler [g/cm^3]	2.67
Teneur en liant sur filler [% masse]	4.50

Connaissant la teneur en liant sur filler (4.5%) et la teneur en filler (6%), les proportions du mastic sont donc de 43% de liant pour 57% de filler. Pour la réalisation des essais, des échantillons de 60 g. sont préparés dans des godets de pénétration. Etant donné l'évolution rapide du comportement du mastic, les essais sont réalisés dans les 4 h. à 6 h. suivant la confection du mélange.

Domaine de linéarité

Avant de procéder aux essais de viscosité avec variation de la température, il est préalablement nécessaire de déterminer le domaine de comportement newtonien (viscosité indépendante du taux de cisaillement) afin de s'assurer d'un comportement linéaire pendant les mesures. De manière générale et en première approximation, le domaine linéaire des liants bitumineux (non modifiés) est environ 100 fois supérieur à celui des enrobés bitumineux, soit $\varepsilon = 100 \cdot 10^{-4}$. Pour des mesures rhéologiques, on préfère exprimer la déformation en pourcentage ; le domaine de linéarité des liants bitumineux est donc globalement limité à une déformation de 1% environ.

La détermination du palier newtonien permet de fixer la déformation imposée lors des essais. Le palier newtonien est le plus faible aux basses températures (Figure 4-15) et il est donc évalué à la température de 15 °C. La mesure a pour but de déterminer le taux de déformation auquel le comportement du matériau reste linéaire, un taux de déformation le plus élevé possible étant visé afin de s'assurer que le rhéomètre travaille dans une gamme suffisante.

La détermination du domaine de linéarité est effectuée par un balayage de l'amplitude de la déformation sinusoïdale entre 0.05% et 10%, à la fréquence de 0.5 Hz (3.14 rad/s). Le dispositif de sécurité du rhéomètre arrête la mesure lorsque le couple d'oscillation est supérieur à $1.8 \cdot 10^5$ micro N·m. La gamme complète de déformations ne peut donc être systématiquement atteinte lors d'essais à 15 °C. Les résultats obtenus pour les différents liants sont indiqués dans la Figure 4-18. On peut évaluer la limite du domaine de linéarité des liants à environ 0.5% de déformation, le palier étant moins large avec les liants modifiés.

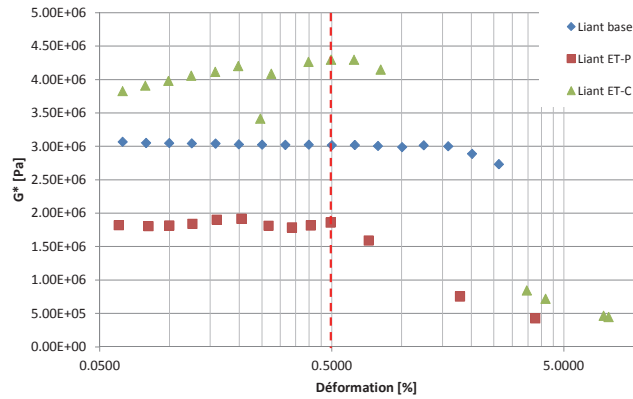


Figure 4-18 : Détermination du domaine de linéarité des liants (15 °C, plaque 25 mm de diamètre)

Le palier linéaire des mastics à 15 °C est plus faible que celui du liant. Le comportement n'est plus linéaire à partir d'une déformation de 0.2% environ. Les conditions suivantes sont finalement choisies afin de garantir une mesure respectant le domaine newtonien des matériaux évalués :

- Déformation imposée de 0.1%
- Pulsation de 0.5Hz (3.142 rad/s)

Répétabilité de la mesure

L'évaluation de la répétabilité de la mesure est réalisée avec les mesures sur le liant de base qui constitue la référence (meilleure stabilité et mesure plus aisée que sur mastic).

Lors de l'analyse des résultats, nous comprenons sous le terme de viscosité, la viscosité dynamique η . Pour chaque mesure effectuée, on s'assure également de sa validité par rapport à l'appareil utilisé en vérifiant que l'angle de déphasage n'est pas trop important (angle de déphasage brut dépendant de l'inertie du support et du matériau), en vérifiant que la déformation est « mesurable » par le rhéomètre ($>10^{-5}$) ainsi qu'en analysant la forme des signaux (sinusoïdes). Des résultats complémentaires d'analyse de répétabilité sont indiqués en Annexe A avec entre autre la représentation du module de cisaillement complexe $|G^*|$ et de l'angle de déphasage δ .

La Figure 4-19 représente six différentes mesures de viscosité effectuées sur le bitume de base. La forme des différentes courbes est semblable et la répétabilité semble bonne. Un résultat similaire est observé avec le module de cisaillement complexe G^* . La mesure 29 est légèrement plus éloignée des autres mesures, ceci sera discuté plus loin.

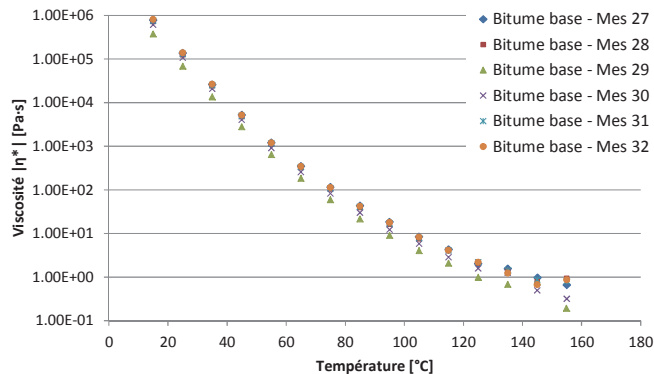


Figure 4-19 : Analyse de répétabilité – mesure de viscosité dynamique sur bitume de base

Une analyse détaillée de la répétabilité des mesures est proposée dans le Tableau 4-13 pour le module de cisaillement complexe, l'angle de déphasage et la viscosité dynamique. La mesure sur liant à haute température (155 °C) présente une variabilité excessive et elle ne sera pas considérée dans la suite des analyses. Par ailleurs, des angles de déphasage supérieurs à 90° sont mesurés à 155 °C et 135 °C (* dans le tableau), ce qui indique que la mesure n'est plus valable, les limites du rhéomètre étant atteintes en raison de la faible viscosité (contrainte trop faible pour être mesurée). Les mesures de l'angle de phase présentent une bonne fiabilité avec un très faible coefficient de variation. La mesure de viscosité dynamique et la mesure de cisaillement complexe présentent une variabilité plus élevée. Compte tenu du type d'expérience, de l'instrument de mesure et des matériaux évalués, une variation de 20% sur le module de cisaillement complexe et sur la viscosité est jugée acceptable (communication personnelle).

Tableau 4-13 : Valeurs de répétabilité des mesures de module de cisaillement complexe et de viscosité (6 mesures, bitume de base)

Temp. [°C]	Moyenne			Ecart-Type			Coefficient de variation		
	G* [Pa]	δ [°]	η* [Pa·s]	G* [Pa]	δ [°]	η* [Pa·s]	G* [%]	δ [%]	η* [%]
155	1.97E+00	*	6.28E-01	9.60E-01	*	3.06E-01	49%	*	49%
145	2.38E+00	87.7	7.56E-01	5.08E-01	3.7	1.62E-01	21%	4%	21%
135	3.95E+00	*	1.26E+00	9.61E-01	*	3.06E-01	24%	*	24%
125	5.77E+00	88.3	1.84E+00	1.48E+00	2.6	4.71E-01	26%	3%	26%
115	1.12E+01	89.9	3.58E+00	2.81E+00	3.7	8.94E-01	25%	4%	25%
105	2.18E+01	89.2	6.95E+00	5.33E+00	1.4	1.70E+00	24%	2%	24%
95	4.74E+01	89.4	1.51E+01	1.15E+01	1.0	3.66E+00	24%	1%	24%
85	1.13E+02	89.3	3.59E+01	2.67E+01	0.4	8.50E+00	24%	0%	24%
75	3.03E+02	88.5	9.66E+01	6.77E+01	0.3	2.16E+01	22%	0%	22%
65	9.32E+02	86.6	2.97E+02	2.01E+02	0.2	6.41E+01	22%	0%	22%
55	3.24E+03	83.7	1.03E+03	6.91E+02	0.2	2.20E+02	21%	0%	21%
45	1.40E+04	79.1	4.46E+03	2.86E+03	0.8	9.11E+02	20%	1%	20%
35	7.10E+04	73.7	2.26E+04	1.53E+04	0.9	4.88E+03	22%	1%	22%
25	3.68E+05	68.0	1.17E+05	8.34E+04	0.1	2.65E+04	23%	0%	23%
15	2.11E+06	56.4	6.71E+05	5.08E+05	1.3	1.62E+05	24%	2%	24%

Malgré une variabilité légèrement supérieure aux valeurs jugées acceptables, l'analyse de ces essais de répétabilité a permis de mettre en évidence les aspects suivants dont la prise en considération améliore la qualité et la fidélité de la mesure pour la suite de l'expérience :

- La forme du ménisque et la mise en place du matériau sur le dispositif de mesure requiert un soin particulier. L'utilisation d'un système Peltier présente l'avantage de ne pas nécessiter d'arasement, mais cela rend la pose du matériau plus complexe (Figure 4-20).
- L'entrefer initial et la quantité de matériau utilisée pour une mesure sont particulièrement importants. L'analyse du détail des essais indique que la mesure 29 a été réalisée avec un entrefer de 662 µm ce qui est sensiblement plus faible que l'entrefer des autres mesures qui varie entre 850 et 1150 µm. Un ménisque de mauvaise qualité et un entrefer trop faible influent sur la fiabilité de la mesure. Dans la suite des essais, l'entrefer est maintenu entre 900 et 1000 µm pour les liants. Il est légèrement augmenté pour les mesures sur mastics pour lesquelles un « pré-cisaillement » est également fait afin de favoriser un démarrage stable de l'essai.
- L'angle de déphasage entre contrainte et déformation est un indicateur intéressant. Cependant, lorsque le matériau devient trop « mou », le comportement visqueux est atteint et les valeurs mesurées ne sont alors plus fiables (limite admise avec un angle de déphasage de 90°). Ceci est le cas à partir d'environ 115 °C pour les mesures sur liants et 130 °C pour les mesures sur mastics.

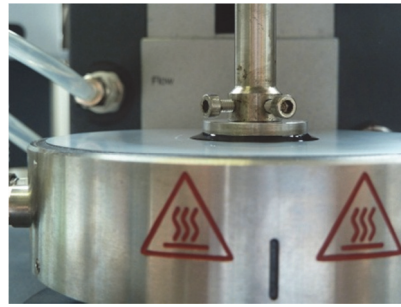


Figure 4-20 : Système Peltier rhéomètre AR2000

Analyse des résultats

Les mesures de viscosité dynamique et d'angle de déphasage sont analysées dans cette section. Des figures complémentaires relatives au module de cisaillement complexe et à la répétabilité des mesures de viscosité sur mastic sont disponibles en Annexe A.

De manière générale, lorsque la température augmente, le module de cisaillement complexe diminue et l'angle de déphasage augmente. Cette évolution attendue traduit le changement de comportement du matériau.

La viscosité dynamique des liants est représentée dans la Figure 4-21. Tout comme pour les essais de caractérisation sur liants, on observe une tendance de viscosité comparable entre le liant de base (REF) et le liant avec additif chimique (ET-P). L'ET-P a cependant une viscosité légèrement plus faible que le liant de base sur l'ensemble de la gamme de températures testées. La différence moyenne représente 17% de la viscosité du liant de base, ce qui est dans la gamme de répétabilité de la mesure. Le comportement rhéologique du liant avec additif chimique n'est donc pas modifié de façon significative par rapport au liant de base.

Le mécanisme de comportement des liants avec cire est différent. Au-dessous de 90°C, le liant ET-C présente une viscosité plus importante que le liant de base. L'augmentation moyenne de viscosité est d'un facteur 7.5, l'augmentation de viscosité la plus importante se situant entre 45 °C et 75 °C (facteur 13). Cette augmentation de la viscosité est liée à la solidification de la cire qui rend le matériau plus rigide et donc l'enrobé potentiellement moins sensible à l'orniérage. Lorsque la température de fusion de la cire est atteinte, la viscosité diminue. Entre 95 °C et 135 °C, cette diminution de viscosité est de l'ordre de 40% par rapport au liant de base. Des variations similaires ont été mesurées avec le viscosimètre cône et plaque (Pilloud et Pittet 2010). L'ajout de cire permet donc de diminuer la viscosité aux températures prévues de fabrication, pose et compactage. L'équiviscosité est environ 10 °C en-dessous des liants non modifiés. Les fournisseurs de cire annoncent une température de compactage diminuée de 30 à 40 °C. (Golaz 2007) explique cette différence par la cristallisation de la cire entre 80 et 100 °C qui relâche de la chaleur de cristallisation entraînant un effet de lubrification. Des essais complémentaires seraient nécessaires afin de pouvoir analyser ce phénomène (calorimétrie différentielle à balayage par exemple).

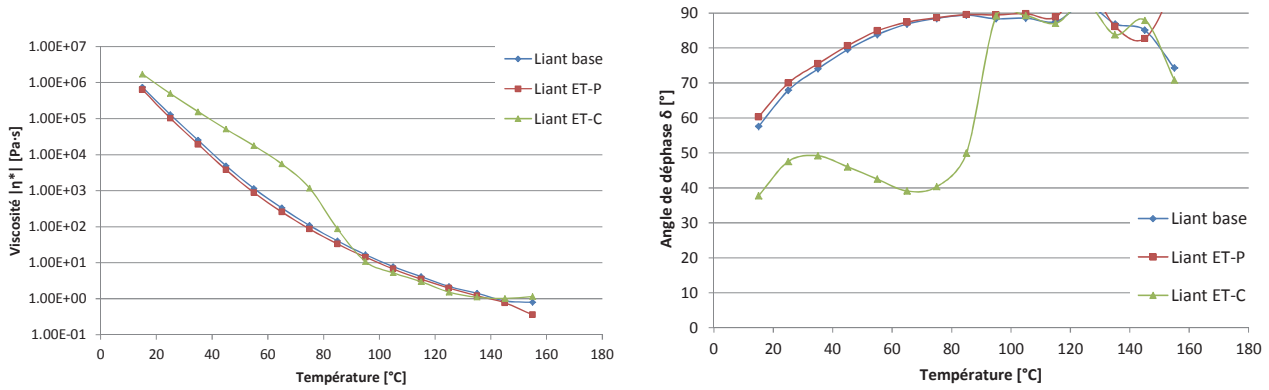


Figure 4-21 : Viscosité dynamique (gauche) et angle de déphasage (droite) des liants

Les mesures de viscosité sur mastic sont représentées dans la Figure 4-22. Le comportement global est similaire à celui observé sur les liants. Le mastic ET-P présente un comportement (viscosité) comparable au mastic de référence. Les courbes de viscosité sont confondues, la différence moyenne de viscosité entre le mastic ET-P et REF sur la gamme de températures testées est de 1%. Le mastic ET-C présente une diminution de la viscosité (environ 40%) à des températures situées entre 95 °C et 135 °C, la chute de viscosité du mastic indiquant clairement la fusion de la cire. La viscosité augmente d'un facteur 22 aux températures de sensibilité à l'orniérage de l'enrobé entre 45 °C et 75 °C. Le durcissement du bitume par la cristallisation de la cire est intimement lié au filler. Pour des mêmes températures, l'angle de déphasage mesuré sur mastic est plus faible que celui mesuré sur liant.

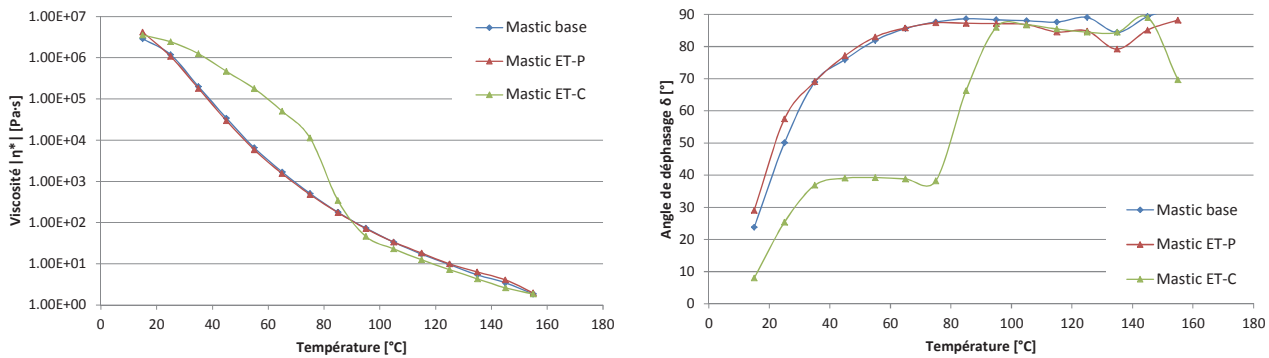


Figure 4-22 : Viscosité dynamique (gauche) et angle de déphasage (droite) des mastics

Un comparatif des mesures de viscosité dynamique et d'angle de phase sur liants et mastics est proposé dans la Figure 4-23. Pour un procédé donné, les mêmes tendances sont observées entre liant et mastic, la différence se situant au niveau de la diminution de viscosité pour une même température. Sur la gamme de températures allant de 15 °C à 145 °C, la viscosité du mastic est entre 5.2 et 6.3 fois supérieure à la viscosité mesurée sur les liants du même enrobé. Ceci correspond à l'effet rigidifiant du filler qui diminue également l'angle de phase par rapport à la mesure sur liant seul.

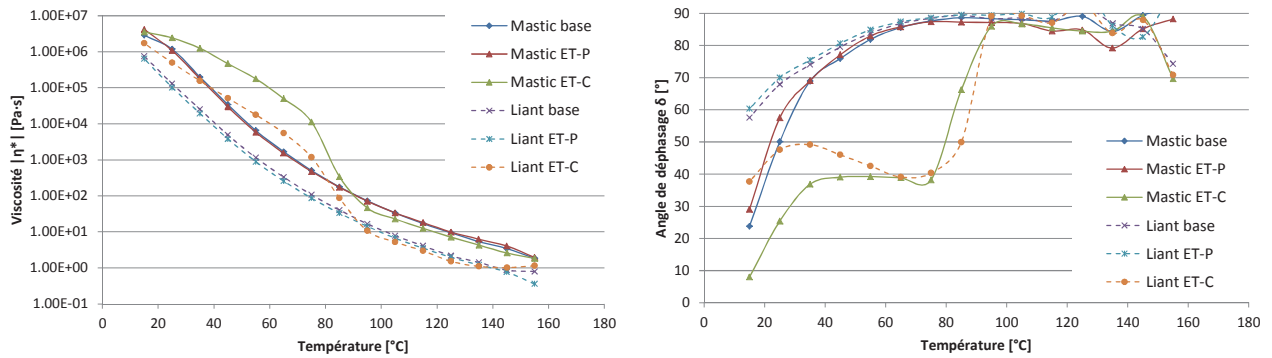


Figure 4-23 : Comparatif des mesures de viscosité dynamique (gauche) et angle de déphasage (droite) sur liants et mastics

Les mesures effectuées avec le rhéomètre à plans parallèles et le rhéomètre cône et plaque ont des tendances comparables ; les valeurs mesurées avec le rhéomètre cône et plaque étant cependant systématiquement inférieures.

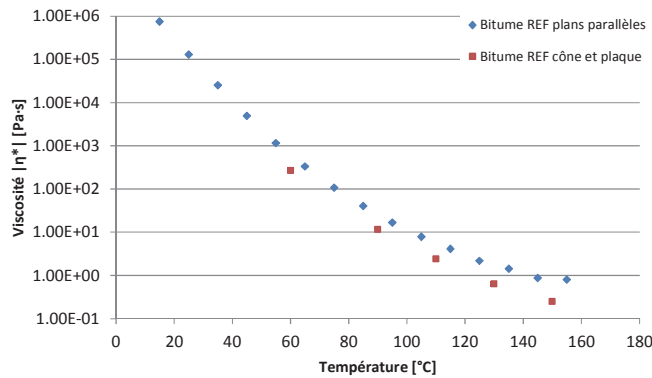


Figure 4-24 : Mesures de viscosité avec rhéomètre cône et plaque et rhéomètre à plans parallèles (bitume REF)

Les mesures de viscosité doivent être prises en considération principalement par une analyse des tendances et de la position relative des différents matériaux testés. Les valeurs brutes de mesures peuvent présenter certaines variations selon l'appareil utilisé et les conditions d'essai (entrefer, fréquence, déformation imposée, ...). Finalement, les différents résultats obtenus sont consistants avec les mesures effectuées précédemment par (Golaz 2007).

4.8.4 Evaluation de la viscosité de l'enrobé

La viscosité d'un enrobé bitumineux n'est pas mesurable de manière directe, mais elle est souvent caractérisée par sa compactibilité ou sa maniabilité.

La mesure de la compactibilité (aptitude au compactage) la plus courante est effectuée avec la presse à cisaillement giratoire. L'évolution de la compactité peut être déterminée en fonction du nombre de girations appliquées. La compactibilité peut également être quantifiée par des compactages Marshall avec un nombre de coups variables.

L'évaluation de la maniabilité d'un enrobé peut être faite par différentes méthodes. Un premier indicateur qualitatif est fourni sur chantier par l'appréciation des ouvriers. Des appareils ou mesures ont été développés afin de caractériser la maniabilité. Le maniabilimètre Nynas (Gustavsson et Lillbroända 1996; Brion, Roux et al. 1999), inspiré de la boîte de Casagrande, a pour but de caractériser l'aptitude au répandage de l'enrobé entre la phase de malaxage et la mise en œuvre sur chantier. Cet

appareil développé initialement pour l'analyse des enrobés à froid permet d'évaluer la maniabilité ainsi que son évolution dans le temps. Le principe de l'essai consiste à mesurer la résistance à une sollicitation de cisaillement-poussée d'un matériau à la sortie de son malaxage. On considère l'effort maximum développé pour une vitesse de cisaillement constante de l'éprouvette. On appelle cet effort « force de cohésion ». Cette force est déterminée par un capteur, couplé au piston du vérin de poussée. L'essai est destructif. La détermination de l'évolution de la force de cohésion en fonction du temps peut nécessiter une certaine masse de matériau, un essai demandant environ 12 kg d'enrobé. Le remplissage du moule est normalisé afin de simuler la chute du matériau, du malaxeur dans le camion.

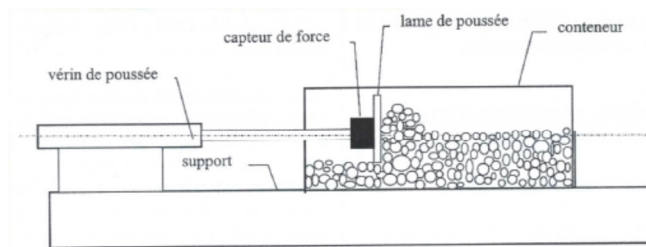


Figure 4-25 : Maniabilimètre Nynas (Brion, Roux et al. 1999)

Dans son travail basé sur le phénomène de prise des bétons et des graves émulsions de bitume, (Dierkens 2005) présente différents dispositifs de mesure de la maniabilité de matériaux hétérogènes évolutifs. Parmi les méthodes, nous pouvons relever le test de maniabilité ESSO qui consiste à mettre en rotation trois pointes au sein d'un enrobé à froid, jusqu'à obtenir sa déstructuration sous l'effet du cisaillement imposé. Cet essai est également appelé essai ACTE (Adhésion-Cohésion Test ESSO).

(Gudimettla et Cooley 2003) analyse également la maniabilité des enrobés à chaud. L'auteur évalue un prototype permettant de quantifier la maniabilité et son évolution. Le principe de base, repris des travaux de Marvillet et Bougault (publiés en 1978 dans le Journal of Association of Asphalt Paving Technologist) consiste à immerger une « hélice » dans un récipient d'enrobé et à mesurer la résistance à la rotation de cette hélice. La vitesse de rotation est constante et la résistance est ensuite convertie en mesure de couple. La relation entre la température (mesure infrarouge) et le couple est ensuite considérée comme indicateur de la maniabilité de l'enrobé. Une analyse de différents paramètres est proposée dans (Gudimettla, Cooley et al. 2004): configuration de la machine d'essai (type d'hélice et taux de révolution), granulométrie et liant. Les essais effectués mettent en évidence l'influence du type de granulats (forme) et de la taille maximale des granulats sur la maniabilité. De même, le type de liant et la température du mélange jouent un rôle sur la maniabilité alors que la courbe granulométrique ne présente pas d'effet significatif.



Figure 4-26 : Appareil de mesure de maniabilité (Gudimettla et Cooley 2003)

D'autres évaluations de la maniabilité des enrobés sont effectuées selon le même principe de mesure de couple, dans le malaxeur ou alors dans un autre contenant. La mesure est principalement exploitable à des fins de comparaisons relatives de produits et elle est utilisée notamment dans le domaine de la recherche et développement des enrobés tièdes (Gonzalez, Ligier et al. 2009). Faute de temps, la caractérisation de la viscosité de l'enrobé n'a pas pu être réalisée dans le cadre de cette recherche.

4.9 Analyse des résultats d'essais de caractérisation étendus et essais performantiels

Une analyse détaillée de la viscosité des liants et mastics a été réalisée dans la section précédente. Ce chapitre présente dans un premier temps les résultats des essais de caractérisation étendus et essais performantiels sur liants et enrobés, réalisés à un instant donné (4.9.1). Ensuite, les analyses spécifiques de la montée en performance (4.9.2) et de la méthode de cure des enrobés (4.9.3) sont illustrées, avant la présentation de quelques résultats complémentaires pour l'enrobé EST (4.9.4).

Pour chaque performance, respectivement caractéristique, un récapitulatif des résultats bruts est présenté, avant de procéder à leur représentation et analyse. Des représentations complémentaires ainsi que la description des essais peuvent être consultées en Annexe A. Un code couleur identique est conservé afin de faciliter la comparaison des différents types d'enrobés.

4.9.1 Essais de caractérisation étendus et essais performantiels

Essais sur liants

Une classification des liants selon la méthode SUPERPAVE a été effectuée au Laboratoire universitaire sur les chaussées, les routes et les enrobés bitumineux (LUCREB) de l'École de technologie supérieure de l'Université de Québec (ETS), sous la direction du Prof. A. Carter. Ce type de classification utilisée en Amérique du Nord est détaillé en Annexe A. Ainsi, le liant est caractérisé par la désignation :

PG x-y	PG	Performance Grade
	x	Température haute (°C) à laquelle le liant est supposé travailler (température au-dessus de laquelle le bitume est susceptible de présenter des phénomènes de déformations irréversibles).
	y	Température basse (°C) à laquelle le liant est supposé travailler (température limite au-dessous de laquelle le bitume est susceptible de se fissurer par retrait thermique).

La température basse à laquelle le liant est supposé travailler est définie par l'essai de fluage en flexion (BBR) avec lequel la température correspondant à un module de rigidité maximal $S(60)=300$ MPa et une valeur minimale de pente de $m(60)=0.3$ après vieillissement à court et long terme (RTFOT et PAV) est déterminée. La plus élevée des températures obtenues selon les deux critères est considérée comme température basse.

La température maximale à laquelle le liant est supposé travailler est définie par l'orniérage. Cette température est déterminée en fixant un module de rigidité ($G^*/\sin\delta$) minimal de 1.0 kPa lors de l'essai au rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR).

Les résultats sont présentés dans la Figure 4-27. Par rapport aux valeurs exactes calculées, la catégorie PG est définie sur la base des conditions les plus défavorables. Les liants REF, ET-P et EST sont classifiés dans la même catégorie PG 64-22. Si l'on consulte le détail des températures, la différence entre ces trois liants n'est pas significative. On remarquera que l'EST possède la température haute la plus faible (effet du fluxant). Le liant modifié à la cire obtient une classification PG 70-16. L'ajout de cire diminue donc la

sensibilité à l'orniérage, la température haute est augmentée. Le liant est par contre plus sensible aux basses températures en raison de la rigidification de la cire. Le gain du liant ET-C par rapport au liant de référence dans le domaine des hautes températures est légèrement plus élevé (5.6 °C) que la perte au niveau du comportement à basses températures (3.5 °C). La gamme de températures d'utilisation du liant dans la classification PG (différence entre température haute et basse) est cependant similaire à celle des autres liants. Dans le cadre d'une analyse de différentes cires et liants, (Wagner 2010) obtient des tendances comparables avec des cires Fischer-Tropsch. Les résultats indiquent notamment que selon le bitume de base et la teneur en cire, les gains à haute température peuvent être supérieurs à la perte dans le domaine des basses températures.

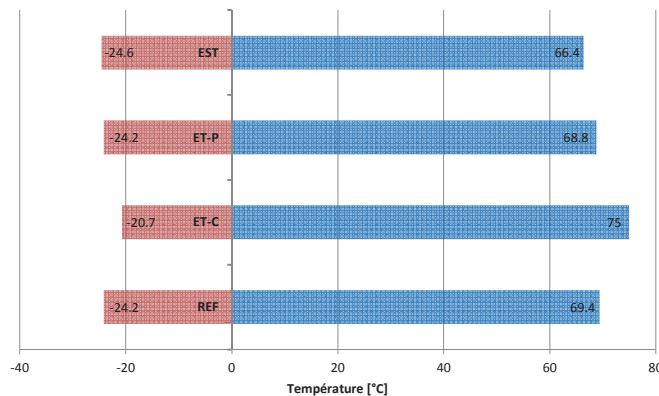


Figure 4-27 : Classification SUPERPAVE des liants (PG)

Ces observations sont en accord avec les mesures sur liants et mastics réalisées précédemment. Le calcul de la valeur de température haute sur la base des mesures effectuées avec le rhéomètre AR2000 (chapitre 4.8.3) fournit des résultats relativement proches compte tenu du fait que l'essai n'a pas été réalisé dans les mêmes conditions (REF : 65 °C, ET-P : 64 °C, ET-C : 81 °C).

Compression Marshall

L'essai de compression Marshall fait partie des exigences des normes suisses. Il est cependant critiqué car jugé pas suffisamment discriminant. La Figure 4-28 contient les résultats.

La stabilité (60 °C) des enrobés REF et ET-C est comparable. L'enrobé ET-P a une stabilité légèrement moins élevée alors que l'enrobé EST est 26% moins performant que la référence pour ce qui est de la stabilité Marshall. Comme attendu, le fluage le moins élevé est celui de l'enrobé à la cire. Le fluage le plus important est mesuré pour l'enrobé EST qui est 83% plus élevé que le fluage de l'enrobé avec ajout de cire (47% de plus que la référence). Compte tenu de l'écart-type en répétabilité (0.61 kN sur la stabilité et 0.25 mm pour le fluage - voir Annexe A), les différences observées entre l'enrobé EST et les autres enrobés sont significatives. Cette différence est liée entre autre au vieillissement plus faible du liant dans le cas de l'enrobé EST. De plus, le fluage de l'enrobé ET-C est jugé sensiblement plus faible que celui de l'enrobé de référence et de l'enrobé ET-P qui eux sont comparables.

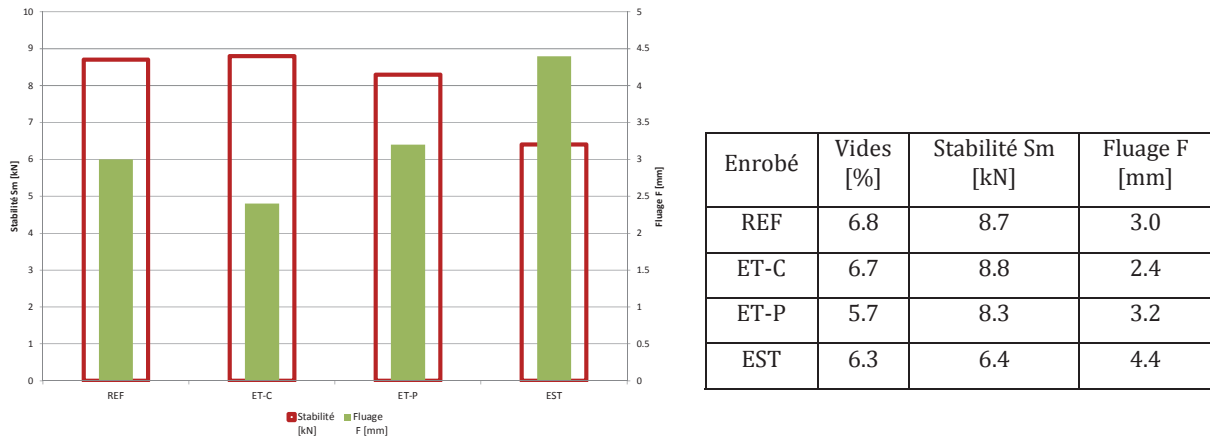


Figure 4-28 : Stabilité et fluage Marshall des enrobés (60 °C)

La normalisation suisse (SN 640 431-1b-NA) ne contient d'exigences de stabilité et fluage Marshall pour les enrobés AC T de type « S » (solicitations sévères). Pour les enrobés AC T de type « N » (solicitations moyennes), les exigences sont $S_m \geq 7.5$ kN et F compris entre 2 et 4 mm. L'enrobé EST ne respecterait donc pas les exigences de stabilité et fluage.

Fatigue des enrobés

Le comportement en fatigue des enrobés est évalué sur éprouvettes trapézoïdales, sur un matériau dont les performances sont stables. Les essais sont donc réalisés sur l'enrobé après 12 semaines. 6 éprouvettes par type d'enrobé ont été testées, afin de déterminer la déformation ϵ_6 [$\mu\text{m}/\text{m}$] correspondant à rupture après un million de cycles. Les résultats à 10 °C et 25 Hz sont indiqués dans la Figure 4-29 et la Figure 4-30. Les normes ne contiennent pas d'exigences pour les enrobés AC T. Les exigences suisses (SN 640 431-1b-NA) pour les enrobés AC EME C1 (résistant à l'orniérage) et C2 (résistance à la fatigue) sont respectivement de $\epsilon_6 \geq 100$ $\mu\text{m}/\text{m}$ et $\epsilon_6 \geq 130$ $\mu\text{m}/\text{m}$. Les exigences françaises pour la grave bitume (GB), moins riche en liant que l'AC T 22S, sont de 80 $\mu\text{m}/\text{m}$. Nous proposons ici une exigence de $\epsilon_6 \geq 100$ $\mu\text{m}/\text{m}$, sur la base de l'expérience du laboratoire.

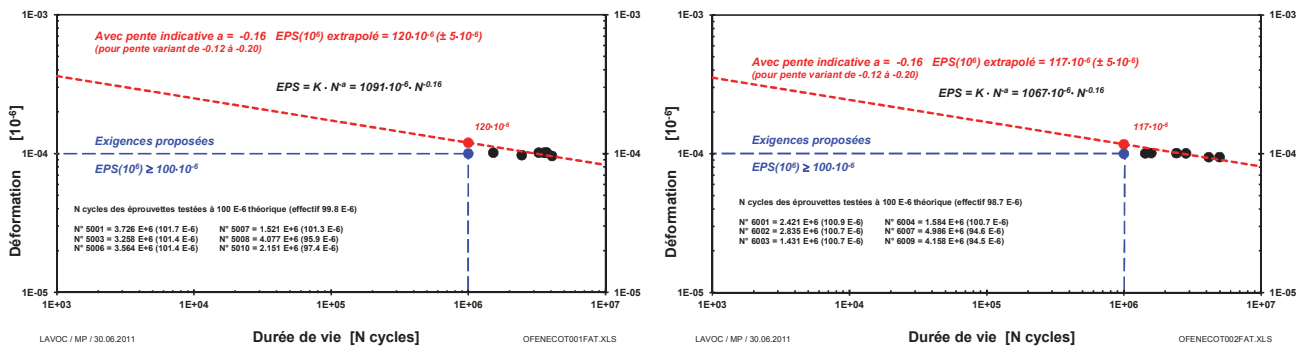


Figure 4-29 : Essais de fatigue à 10 °C, 25 Hz (gauche : REF, droite : ET-C)

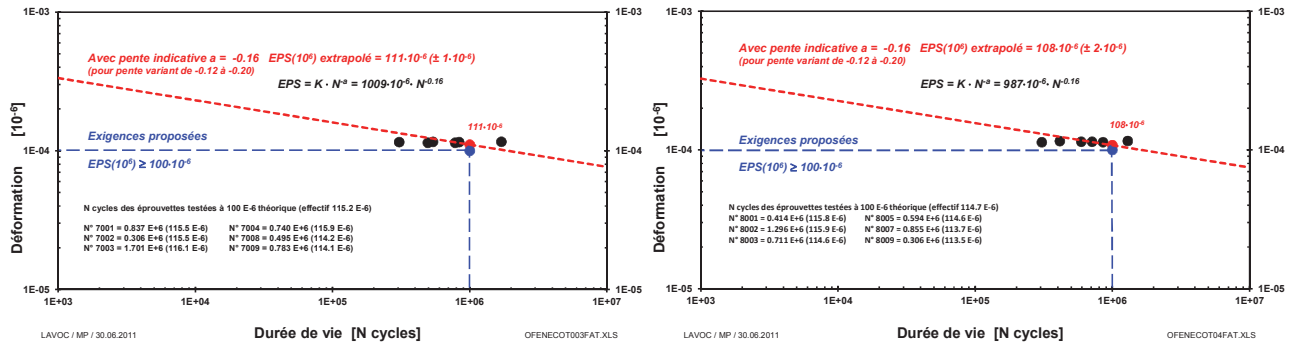


Figure 4-30 : Essais de fatigue à 10 °C, 25 Hz (gauche : ET-P, droite : EST)

Une synthèse des résultats est proposée dans le Tableau 4-14. Le domaine de teneurs en vides des différents matériaux correspond à une même gamme de comportement. Les matériaux présentent tous des performances en fatigue satisfaisantes. Nous pouvons différencier globalement deux types de comportements. La référence présente la meilleure résistance à la fatigue. L’enrobé ET-C obtient une déformation à un million de cycles comparable à la référence, la différence n’étant pas significative. Le comportement de l’enrobé ET-P et de l’enrobé EST est par contre légèrement moins bon que les deux autres enrobés testés.

Tableau 4-14 : Résultats des essais de fatigue (10 °C, 25 Hz) à 12 semaines

Enrobé	Teneur en vides [%]	ϵ_6 [$\mu\text{m}/\text{m}$]
REF	6.2	120±5
ET-C	6.1	117±5
ET-P	5.4	111±1
EST	5.6	108±2

4.9.2 Analyse de la montée en performance

Dans l’ensemble des résultats présentés, les essais effectués après « 0 semaine » signifient qu’ils sont réalisés directement après la fabrication de l’enrobé, mais toujours en respectant les exigences relatives aux méthodes d’essais.

Essais sur liants

Des essais de pénétration à 25 °C et la détermination de la température anneau et bille (A&B) sont effectués sur les liants récupérés après 1 semaine et 12 semaines. Les résultats ainsi que l’indice de pénétration IP sont consignés dans le Tableau 4-15 et représentés dans la Figure 4-31. Dans ce tableau, l’état « brut » fait référence à un liant éventuellement additivé, mais non récupéré à partir d’un enrobé (0 semaine).

Tableau 4-15 : Analyse des liants bruts et récupérés

Liant	Additif	Teneur add.	Etat	T _{A&B} [°C]	Pen [10 ⁻¹ mm]	IP [-]
REF	-	-	Brut	51.9	55	-0.5
	-	-	Récupéré 1 semaine	56.2	42	-0.2
	-	-	Récupéré 12 semaines	58.2	35	-0.2
ET-C	Cire	3%	Brut	79.2	36	3.3
	Cire	3%	Récupéré 1 semaine	76.0	35	2.8
	Cire	3%	Récupéré 12 semaines	76.6	30	2.6
ET-P	Chimique	0.4%	Brut	51.2	57	-0.6
	Chimique	0.4%	Récupéré 1 semaine	55.6	46	-0.1
	Chimique	0.4%	Récupéré 12 semaines	57.2	37	-0.2
EST	Fluxant	0.4%	Brut	52.0	62	-0.2
	Fluxant	0.4%	Récupéré 1 semaine	53.7	55	-0.1
	fluxant	0.4%	Récupéré 12 semaines	55.9	40	-0.4

De manière générale, l'effet de la cire est clairement visible car elle permet d'augmenter la température A&B du liant brut non-additivé (REF) de plus de 27 °C, cette augmentation étant de 18.4 °C sur le liant récupéré après 12 semaines. L'additif chimique (ET-P) ne modifie pas la température A&B par rapport au cas de référence alors que le fluxant la diminue légèrement (2.3 °C sur liant récupéré après 12 semaines). Comme attendu, la température anneau et bille des liants REF, ET-P et EST augmente avec le vieillissement du liant. Cette augmentation entre le liant brut et le liant récupéré après 12 semaines est la plus élevée pour les liants REF et ET-P, avec respectivement 6.3 °C et 6.0 °C. Le liant EST, moins vieilli lors de la fabrication, a une augmentation plus faible de la température A&B (3.9 °C). Pour le liant ET-C, on observe par contre une légère diminution de la température anneau et bille par rapport au liant ET-C brut (-2.6 °C). On pourrait supposer que cela traduit une dissipation de l'effet de la cire au cours du temps. Cependant, la température A&B des liants ET-C testés se situe aux alentours de 80 °C, ce qui correspond à l'amorce du processus de fusion de la cire. Pour un essai réalisé avec de l'eau, la répétabilité (bitume non modifié) selon la norme EN 1427 est de 1 °C et la reproductibilité de 2 °C. De plus, la réalisation de l'essai sur liants ET-C se situe à la limite du domaine d'utilisation de l'eau (80 °C), ce qui peut légèrement biaiser les résultats. Compte tenu de ces informations, nous ne pouvons juger l'évolution de la température A&B du liant ET-C comme significative.

Les liants REF et ET-P présentent globalement un comportement similaire, l'effet tensio-actif ET-P n'agissant pas sur le liant mais à l'interface liant-granulat. Le liant EST présente une pénétration plus importante en raison de l'utilisation de fluxant et du vieillissement plus faible du liant. La pénétration est également modifiée par l'ajout de cire ; le liant brut ET-C présente une pénétration de 19 [10⁻¹ mm] plus faible que le liant brut de référence. La différence est plus faible sur le liant récupéré après 12 semaines, 5 [10⁻¹ mm]. Pour l'ensemble des liants testés, la pénétration à 25 °C diminue avec le vieillissement. La diminution de pénétration entre le liant récupéré après 12 semaines et le liant brut est de 20 [10⁻¹ mm] pour les liants REF et ET-P. Le liant EST indique une diminution de pénétration du même ordre de grandeur, 22 [10⁻¹ mm], alors que le liant avec ajout de cire présente une diminution de pénétration beaucoup plus faible de 6 [10⁻¹ mm]. La cire « rigidifie » le liant à la température d'essai.

L'importance du vieillissement entre le liant brut et la récupération après 1 semaine, et le mûrissement entre les récupérations après 1 et 12 semaines, est variable selon les procédés. Les liants REF et ET-P présentent un vieillissement plus important entre le liant brut et la récupération après 1 semaine. Les

liants EST et ET-C présentent quant à eux un mûrissement plus important entre la récupération après 1 et 12 semaines.

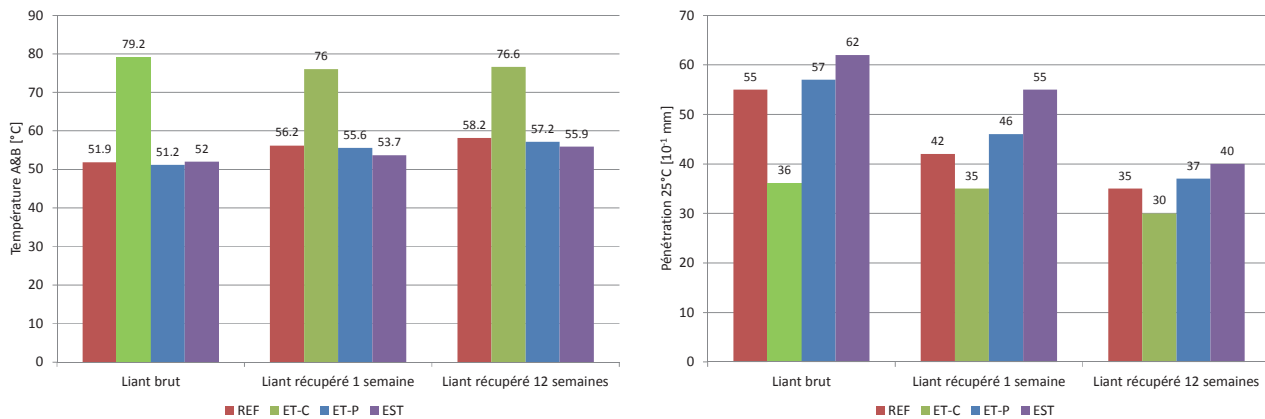


Figure 4-31 : Température anneau & bille (gauche) et pénétration (droite) des liants bruts et récupérés

L'indice de pénétration (IP) des liants REF, ET-P et EST est faiblement négatif. Ceci caractérise des liants légèrement susceptibles à la température. L'indice IP passe de -0.5 pour le bitume brut de référence à +3.3 pour le liant brut modifié avec cire (ET-C). Ceci caractérise une diminution significative de la susceptibilité thermique par rapport aux liants REF, ET-P et EST. Il s'agit de l'effet souhaité de la cire. Une augmentation de la teneur en cire augmenterait également l'indice IP. Rappelons que l'indice IP correspond à des conditions de températures précises (essai de pénétration à 25 °C) et il ne peut être généralisé pour toute la gamme de températures.

Compression diamétrale

La montée en performance est principalement analysée par le comportement à la compression diamétrale. Pour chaque enrobé, des essais sont réalisés à différents pas de temps (0, 1, 2, 4 et 12 semaines) et différentes températures : basse température (-10 °C), haute température (40 °C) ainsi que température intermédiaire (15 °C). Pour chacune des combinaisons enrobé-pas de temps-température, une analyse de la méthode de conditionnement est également effectuée (à l'exception de la mesure à 0 semaine). Trois échantillons Marshall (compactage 50/50) sont testés pour chaque combinaison. L'effet du conditionnement sera discuté plus loin, l'accent étant mis ici sur la montée en performance. Le détail des résultats de contraintes et déformations mesurées ainsi que les différences entre les trois échantillons testés pour une même combinaison sont reportés dans le Tableau 4-16.

Tableau 4-16 : Résultats des essais de compression diamétrale à -10 °C, 15 °C et 40 °C pour différents pas de temps, avec/sans conditionnement

Enrobé	Cure [sem.]	Condition.	-10°C											15°C											40°C										
			Vides [%]	Contrainte [N/mm ²]	Δmax [N/mm ²]	Δmax [%]	Amin [N/mm ²]	Amin [%]	ΔD/D (10 ⁻³) [%]	Vides [%]	Contrainte [N/mm ²]	Δmax [N/mm ²]	Δmax [%]	Amin [N/mm ²]	Amin [%]	ΔD/D (10 ⁻³) [%]	Vides [%]	Contrainte [N/mm ²]	Δmax [N/mm ²]	Δmax [%]	Amin [N/mm ²]	Amin [%]	ΔD/D (10 ⁻³) [%]												
REF	0	Non	5.7	4.10	0.20	4.9%	-0.50	-12.2%	7.2	5.8	2.05	0.12	5.9%	-0.18	-8.8%	12.7	5.6	0.44	0.02	4.5%	-0.02	-4.5%	14.2												
REF	1	Oui	6.5	4.00	0.00	0.0%	-0.10	-2.5%	6.2	6.6	1.88	0.12	6.4%	-0.14	-7.4%	14.0	6.5	0.38	0.04	10.5%	-0.03	-7.9%	15.0												
REF	1	Non	6.6	4.00	0.50	12.5%	-0.40	-10.0%	7.5	6.7	1.95	0.11	5.6%	-0.15	-7.7%	15.5	6.7	0.38	0.01	2.6%	-0.02	-5.3%	15.3												
REF	2	Oui	6.3	3.90	0.40	10.3%	-0.40	-10.3%	8.7	6.3	2.02	0.13	6.4%	-0.10	-5.0%	15.9	6.2	0.39	0.03	7.7%	-0.02	-5.1%	14.8												
REF	2	Non	6.6	4.00	0.20	5.0%	-0.20	-5.0%	8.0	6.4	2.08	0.11	5.3%	-0.14	-6.7%	13.3	6.6	0.38	0.03	7.9%	-0.04	-10.5%	16.2												
REF	4	Oui	6.5	3.60	0.10	2.8%	-0.10	-2.8%	8.8	6.4	2.32	0.68	29.3%	-0.41	-17.7%	15.5	6.4	0.40	0.03	7.5%	-0.02	-5.0%	15.6												
REF	4	Non	6.5	3.50	0.40	11.4%	-0.80	-22.9%	7.6	6.6	1.68	0.30	17.9%	-0.22	-13.1%	14.3	6.5	0.40	0.01	2.5%	-0.02	-5.0%	14.9												
REF	12	Oui	7.2	3.40	0.20	5.9%	-0.20	-5.9%	7.0	7.1	1.92	0.12	6.3%	-0.06	-3.1%	14.3	7.1	0.36	0.05	13.9%	-0.07	-19.4%	14.3												
REF	12	Non	7.1	3.70	0.40	10.8%	-0.40	-10.8%	7.1	7.0	1.85	0.11	5.9%	-0.20	-10.8%	13.1	7.1	0.39	0.02	5.1%	-0.04	-10.3%	12.4												
ET-C	0	Non	6.5	3.90	0.40	10.3%	-0.80	-20.5%	6.9	6.7	1.94	0.05	2.6%	-0.04	-2.1%	11.8	6.3	0.38	0.02	5.3%	-0.04	-10.3%	11.3												
ET-C	1	Oui	7.0	3.50	0.20	5.7%	-0.10	-2.9%	8.7	7.0	1.75	0.15	8.6%	-0.15	-8.6%	13.3	7.0	0.35	0.01	2.9%	-0.01	-2.9%	12.2												
ET-C	1	Non	6.8	3.90	0.20	5.1%	-0.20	-5.1%	7.2	7.0	1.64	0.06	3.7%	-0.07	-4.3%	13.4	6.9	0.34	0.04	11.8%	-0.02	-5.9%	11.7												
ET-C	2	Oui	6.2	3.50	0.50	14.3%	-0.50	-14.3%	6.9	6.1	1.90	0.15	7.9%	-0.22	-11.6%	14.1	6.3	0.35	0.02	5.7%	-0.02	-5.7%	12.6												
ET-C	2	Non	6.1	3.70	0.10	2.7%	-0.10	-2.7%	7.7	6.0	1.89	0.32	16.9%	-0.27	-14.3%	15.4	6.1	0.37	0.01	2.7%	0.00	0.0%	13.0												
ET-C	4	Oui	6.5	3.60	0.80	22.2%	-0.40	-11.1%	7.1	6.6	1.94	0.05	2.6%	-0.03	-1.5%	12.1	6.6	0.39	0.03	7.7%	-0.02	-5.1%	11.7												
ET-C	4	Non	6.4	3.90	0.10	2.6%	-0.10	-2.6%	7.5	6.5	1.91	0.14	7.3%	-0.13	-6.8%	13.0	6.5	0.37	0.01	2.7%	0.00	0.0%	13.2												
ET-C	12	Oui	6.7	3.30	0.60	18.2%	-0.40	-12.1%	6.8	6.7	1.82	0.19	10.4%	-0.27	-14.8%	12.8	6.7	0.36	0.04	11.1%	-0.04	-11.1%	14.5												
ET-C	12	Non	6.7	3.70	0.50	13.5%	-0.20	-5.4%	6.9	6.8	1.86	0.05	2.7%	-0.03	-1.6%	12.3	6.8	0.37	0.02	5.4%	-0.01	-2.7%	12.4												
ET-P	0	Non	5.7	3.80	0.60	15.8%	-0.40	-10.5%	6.5	5.7	2.01	0.05	2.5%	-0.08	-4.0%	15.9	5.9	0.36	0.03	8.3%	-0.02	-5.6%	15.1												
ET-P	1	Oui	7.0	3.80	0.30	7.9%	-0.30	-7.9%	7.9	7.1	1.61	0.13	8.1%	-0.25	-15.5%	15.3	7.1	0.33	0.00	0.0%	-0.01	-3.0%	16.1												
ET-P	1	Non	6.6	3.80	0.40	10.5%	-0.60	-15.8%	6.8	6.7	1.82	0.01	0.5%	-0.01	-0.5%	15.0	6.7	0.29	0.00	0.0%	-0.01	-3.4%	15.6												
ET-P	2	Oui	6.8	3.60	0.20	5.6%	-0.20	-5.6%	8.3	6.8	1.78	0.17	9.6%	-0.12	-6.7%	16.4	6.8	0.31	0.02	6.5%	-0.02	-6.5%	16.6												
ET-P	2	Non	6.8	3.40	0.50	14.7%	-0.40	-11.8%	8.1	6.7	1.44	0.48	33.3%	-0.87	-60.4%	17.7	6.7	0.34	0.05	14.7%	-0.04	-11.8%	15.8												
ET-P	4	Oui	7.0	3.60	0.40	11.1%	-0.70	-19.4%	7.4	7.0	1.86	0.05	2.7%	-0.06	-3.2%	14.4	7.0	0.37	0.03	8.1%	-0.03	-8.1%	14.1												
ET-P	4	Non	6.9	3.60	0.50	13.9%	-0.50	-13.9%	7.2	7.0	1.85	0.05	2.7%	-0.05	-2.7%	15.6	7.0	0.36	0.02	5.6%	-0.01	-2.8%	17.0												
ET-P	12	Oui	6.9	3.60	0.10	2.8%	-0.30	-8.3%	6.4	6.9	1.86	0.22	11.8%	-0.26	-14.0%	13.0	6.9	0.35	0.04	11.4%	-0.03	-8.6%	15.3												
ET-P	12	Non	6.9	3.70	0.40	10.8%	-0.50	-13.5%	7.0	6.9	1.91	0.08	4.2%	-0.08	-4.2%	14.4	6.8	0.35	0.01	2.9%	-0.01	-2.9%	15.3												
EST	0	Non	6.5	3.70	0.40	10.8%	-0.40	-10.8%	7.3	6.6	1.55	0.12	7.7%	-0.08	-5.2%	16.8	6.5	0.26	0.02	7.7%	-0.03	-11.5%	16.3												
EST	1	Oui	7.3	3.50	0.50	14.3%	-0.60	-17.1%	7.7	7.2	1.58	0.15	9.5%	-0.13	-8.2%	14.9	7.2	0.28	0.02	7.1%	-0.02	-7.1%	14.6												
EST	1	Non	7.3	3.50	0.20	5.7%	-0.50	-8.6%	8.4	7.2	1.43	0.06	4.2%	-0.07	-4.9%	14.6	7.3	0.24	0.00	0.0%	0.00	0.0%	13.4												
EST	2	Oui	6.9	3.60	0.20	5.6%	-0.20	-5.6%	8.7	6.9	1.55	0.13	8.4%	-0.11	-7.1%	15.7	6.8	0.26	0.01	3.8%	-0.01	-3.8%	15.3												
EST	2	Non	6.9	3.50	0.50	14.3%	-0.30	-8.6%	9.5	6.8	1.56	0.20	12.8%	-0.16	-10.3%	15.7	6.9	0.26	0.02	7.7%	-0.02	-7.7%	18.0												
EST	4	Oui	7.5	3.50	0.00	0.0%	-0.10	-2.9%	7.5	7.5	1.46	0.06	4.1%	-0.10	-6.8%	17.6	7.4	0.28	0.01	3.6%	-0.01	-3.6%	15.7												
EST	4	Non	7.5	3.40	0.30	8.8%	-0.20	-5.9%	8.8	7.9	1.46	0.21	14.4%	-0.23	-15.8%	18.5	7.5	0.24	0.01	4.2%	-0.01	-4.2%	16.0												
EST	12	Oui	7.4	3.00	0.70	23.3%	-0.40	-13.3%	8.0	7.3	1.64	0.09	5.5%	-0.09	-5.5%	15.5	7.4	0.30	0.00	0.0%	-0.01	-3.3%	17.0												
EST	12	Non	7.2	3.40	0.30	8.8%	-0.40	-11.8%	9.0	7.1	1.54	0.12	7.8%	-0.09	-5.8%	16.6	7.1	0.28	0.01	3.6%	-0.02	-7.1%	17.0												

Compte tenu du type d'enrobé analysé, les différents échantillons présentent une gamme de compacité comparable. La teneur en vide moyenne est de 6.5% pour l'enrobé REF, 6.6% pour ET-C, 6.8% pour ET-P et 7.2% pour l'enrobé EST. L'écart-type de la teneur en vide varie entre 0.3% et 0.4% pour respectivement l'enrobé avec cire et l'enrobé de référence.

Pour chaque combinaison (enrobé - temps de cure - conditionnement - température), le Tableau 4-16 indique la différence minimale et maximale (valeur absolue et relative) par rapport à la contrainte moyenne. La variabilité au niveau des résultats de compression diamétrale est inhérente à la méthode et aux conditions d'essais. Le type d'enrobé, le temps de cure et le conditionnement n'influent pas significativement sur cette variabilité. Les valeurs moyennes de ces différences pour l'ensemble des enrobés et en fonction de la température d'essai sont disponibles dans le Tableau 4-17. La variabilité est plus importante à basse température où le comportement est fragile et la rupture dépend considérablement de l'orientation de l'éprouvette sous sollicitation. Une différence de géométrie de l'éprouvette ou le positionnement particulier des granulats peuvent avoir une grande incidence sur le résultat à basse température. Par contre, à 40 °C, la variabilité est 40% plus faible et la précision améliorée. Ces tendances correspondent aux attentes ; la répétabilité et la précision sont satisfaisantes.

Tableau 4-17 : Variabilité par rapport à la valeur moyenne mesurée en compression diamétrale à différentes températures

	-10 °C	15 °C	40 °C
Δmax [N/mm ²]	0.34	0.15	0.02
Δmax [%]	9.5	8.4	5.9
Δmin [N/mm ²]	-0.35	-0.16	-0.02
Δmin [%]	-9.7	-9.1	-6.1

Nous pouvons finalement relever que les mesures effectuées à 4 semaines sur l'enrobé de référence à -10 °C (sans conditionnement) et 15 °C (avec et sans conditionnement) ainsi que la mesure sur l'enrobé ET-P à 2 semaines (sans conditionnement) présentent une variabilité importante, malgré une teneur en vides satisfaisante. Après vérification avec le journal des essais, il apparaît que ces échantillons ont

certainement été affectés par une panne au niveau de la machine de compactage Marshall. Ceci peut expliquer la variabilité de ces cas particuliers.

Dans la suite de l'analyse, nous considérons la valeur moyenne de trois éprouvettes tel qu'indiqué précédemment. Les figures en Annexe A représentent les mesures individuelles des enrobés, avec également l'indicateur de barres d'erreur pour chaque mesure.

Un comparatif des contraintes à la rupture des différents enrobés est indiqué dans la Figure 4-32 et la Figure 4-33. A la température de -10 °C, l'enrobé de référence apparaît comme étant globalement le plus performant, suivi de très près par les enrobés ET-C et ET-P. La mesure REF à 4 semaines, légèrement moins bonne, correspond au point avec compactage déficient mentionné précédemment. A basse température, l'enrobé avec cire peut présenter une rupture « violente » lors de l'essai. L'enrobé EST apparaît comme le moins performant à cette température. Pour une même courbe granulométrique, le comportement de l'enrobé à basse température est principalement lié à la compacité de l'éprouvette, le liant jouant un rôle moins important. La différence maximale entre les enrobés REF et EST est de 12.5%, à 1 et 2 semaines.

Cette tendance relative entre les différents enrobés est confirmée par la mesure à 40 °C, beaucoup plus stable, pour laquelle l'enrobé de référence apparaît comme le plus performant. La différence avec l'enrobé ET-C est faible et elle relève de la précision de la mesure. Les mesures de viscosité ont montré que le gain lié à l'utilisation de cire est moins important à la température de 40 °C que dans le domaine de températures allant de 50 °C à 70 °C où la cire est particulièrement active afin de favoriser la résistance à l'orniérage. L'enrobé EST est le moins performant à cette température, la diminution de contrainte maximale à 0 semaine est de 41% par rapport à la référence. Cette différence est maintenue avec le temps. Comparativement aux résultats à -10 °C et 15 °C, les différences relatives sont plus élevées à haute température où le comportement de l'enrobé est davantage ductile et le liant joue un rôle important.

Sur la base de ces figures, nous ne pouvons identifier une tendance univoque de montée en performance des mélanges. Pour les différents enrobés, le pic de performance se situe globalement dans les deux premières semaines. Par la suite, les performances se stabilisent ou diminuent légèrement. Afin d'analyser davantage ceci, nous procéderons par la suite à un test statistique.

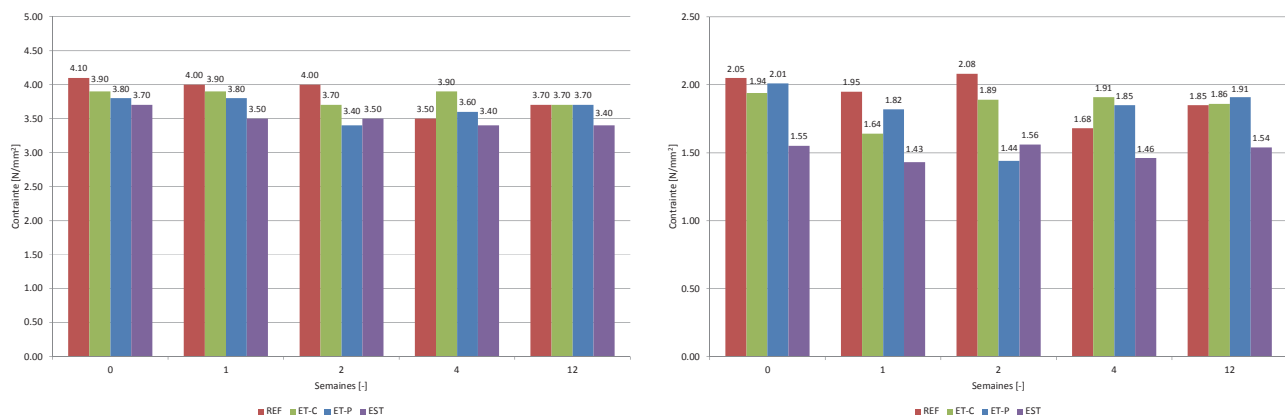


Figure 4-32 : Contraintes mesurées à la compression diamétrale, sans conditionnement (gauche : -10 °C, droite : 15 °C)

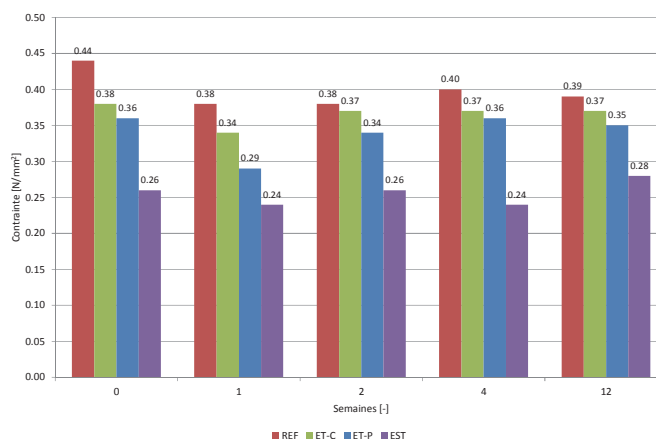


Figure 4-33 : Contraintes mesurées à la compression diamétrale, sans conditionnement (40 °C)

La déformation à la rupture est un indicateur de la fragilité du matériau (Figure 4-34 et Figure 4-35). Elle est globalement deux fois plus importante à 40 °C que à -10 °C. Aux différentes températures d'essais, l'enrobé EST a une déformation à la rupture plus élevée que les autres enrobés analysés. Son comportement est plus ductile. Dans le domaine des basses températures, malgré le rôle prépondérant du squelette granulaire et de la compacité de l'échantillon, les différences de déformation à la rupture entre enrobés ne sont pas négligeables (maximum de 27% entre EST et REF à 12 semaines). Le mécanisme est différent à température élevée (40 °C) où l'enrobé ET-C présente la déformation à la rupture la plus faible. Ceci est compréhensible étant donné l'augmentation de la rigidité liée à l'ajout de cire, ce qui rend le matériau plus fragile. Dans ce domaine de température, la différence de déformation à la rupture entre l'enrobé ET-C et l'enrobé EST atteint 44% (0 semaine). Les enrobés REF et ET-P présentent à-nouveau un comportement globalement comparable.

Comme lors de l'analyse des contraintes, nous ne pouvons observer de manière univoque une montée en performance des enrobés sur la base des déformations enregistrées. Les performances maximales sont atteintes au cours des deux premières semaines, ces performances se stabilisant ou évoluant peu par la suite.

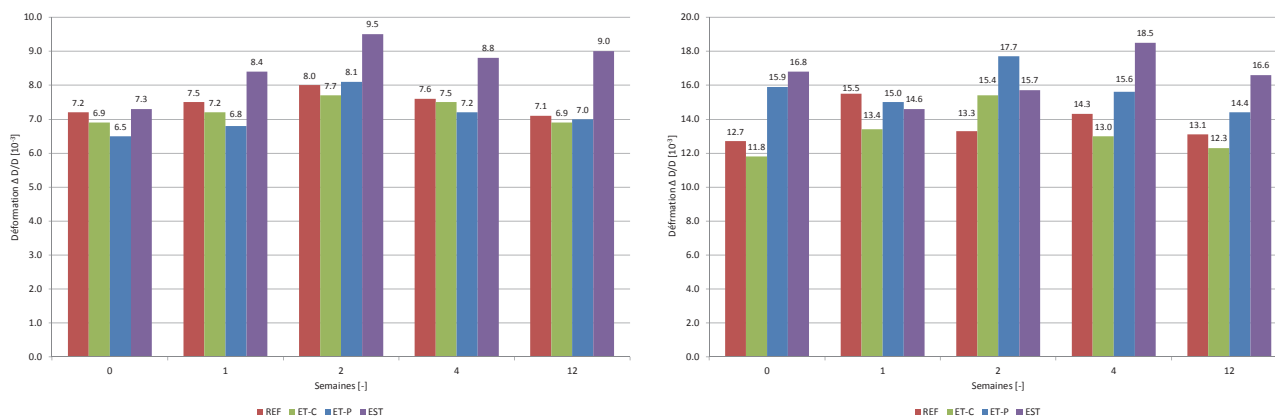


Figure 4-34 : Déformations mesurées à la compression diamétrale, sans conditionnement (gauche : -10 °C, droite : 15 °C)

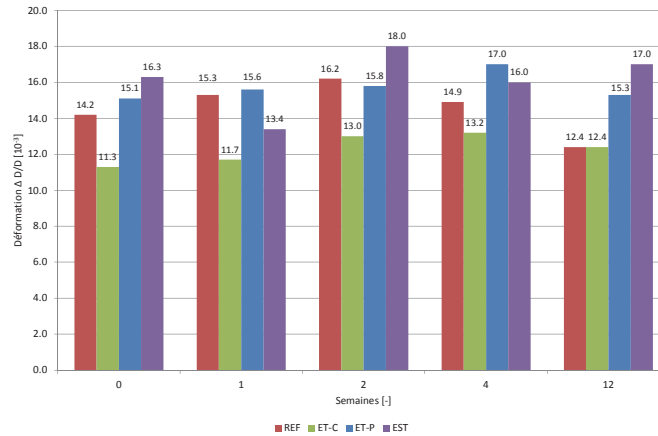


Figure 4-35 : Déformations mesurées à la compression diamétrale, sans conditionnement (40 °C)

Les résultats des différentes mesures peuvent également être analysés par des tests statistiques afin de déterminer l'existence ou non d'un processus de montée en performance. Pour cela, nous choisissons d'appliquer le test de Student (T-Test) décrit en Annexe A. Ce test a pour objectif de déterminer si la différence entre les moyennes de deux groupes de données est statistiquement significative. Considérons les groupes de données mesurées à 2 semaines (performances stabilisées) et 12 semaines. Les paramètres suivants sont définis :

- Nombre de valeurs observées par groupe $n=3$
- Nombre de degrés de liberté $\nu=3+3-2=4$
- Risque d'erreur $\alpha=0.05$ et $\alpha=0.01$

A l'aide d'une table de la loi de Student, nous pouvons déterminer $t_{\alpha}(\nu)$ pour les deux risques d'erreur considérés. Il vient : $t_{0.05}(4)=2.776$ et $t_{0.01}(4)=4.604$.

Pour chaque enrobé et chaque température d'essai, l'écart du test T peut alors être calculé. Si $T < t_{\alpha}(\nu)$, alors la différence entre les moyennes des deux groupes de données n'est pas statistiquement significative.

Tableau 4-18 : Test de Student pour analyse de la montée en performance

Enrobé	Temp.	Moyenne [N/mm ²]		Variance [N ² /mm ⁴]		Ecart du test T	Diff. statistiquement significative
		2 sem.	12 sem.	2 sem.	12 sem.		
REF	-10 °C	4.00	3.70	0.040	0.160	1.162	T < t _α (v), non significative
REF	15 °C	2.07	1.82	0.017	0.025	2.150	T < t _α (v), non significative
REF	40 °C	0.38	0.38	0.001	0.001	-0.248	T < t _α (v), non significative
ET-C	-10 °C	3.70	3.80	0.010	0.130	-0.463	T < t _α (v), non significative
ET-C	15 °C	1.91	1.87	0.087	0.002	0.232	T < t _α (v), non significative
ET-C	40 °C	0.37	0.37	0.000	0.000	0.000	T < t _α (v), non significative
ET-P	-10 °C	3.43	3.67	0.203	0.203	-0.634	T < t _α (v), non significative
ET-P	15 °C	1.31	1.91	0.468	0.006	-1.508	T < t _α (v), non significative
ET-P	40 °C	0.34	0.35	0.002	0.000	-0.250	T < t _α (v), non significative
EST	-10 °C	3.57	3.37	0.163	0.123	0.647	T < t _α (v), non significative
EST	15 °C	1.57	1.55	0.033	0.011	0.193	T < t _α (v), non significative
EST	40 °C	0.26	0.28	0.000	0.000	-1.147	T < t _α (v), non significative

Les résultats indiquent que la différence entre les moyennes des deux groupes (2 semaines et 12 semaines) n'est pas statistiquement significative, ceci même en considérant la variabilité des données. Il n'y a donc pas de processus significatif de montée en performance des enrobés.

Résistance à l'orniérage

La résistance de l'enrobé à l'orniérage est évaluée au simulateur de trafic. Les plaques utilisées ont une épaisseur de 100 mm et la température d'essai est de 60 °C. Dans l'analyse, nous considérons l'ornière calculée ; une analyse selon la profondeur d'ornière mesurée fournit des résultats identiques. Le domaine de vides des différentes plaques est également comparable.

Tableau 4-19 : Résistance à l'orniérage des enrobés après 0 et 12 semaines

Enrobé	Cure [sem]	Vides [%]	Pente [-]	Ornière calculée [% hauteur]		Ornière mesurée [% hauteur]	
				10'000 cycles	30'000 cycles	10'000 cycles	30'000 cycles
REF	0	6.0	0.219	4.5	5.6	4.4	5.5
	12	6.1	0.175	4.5	5.5	4.5	5.2
ET-C	0	6.1	0.231	3.9	5.0	4.0	5.0
	12	6.5	0.151	3.9	4.7	3.9	4.6
ET-P	0	5.8	0.205	4.6	5.8	4.6	5.5
	12	7.1	0.204	4.5	5.6	4.4	5.2
EST	0	5.8	0.254	5.0	6.7	5.2	6.2
	12	7.0	0.209	4.6	5.8	4.6	5.5

Comme le comportement rhéologique des liants et mastics l'ont montré, la cire est particulièrement active pour les hautes températures de service où la chaussée est sensible à l'orniérage. L'enrobé ET-C est le plus performant à l'orniérage, avec 0.6% d'ornière en moins que l'enrobé de référence à 10'000 cycles (0 semaine) et 0.6% (0 semaine) respectivement 0.8% (12 semaines) à 30'000 cycles. L'enrobé

ET-P présente à-nouveau un comportement très proche de la référence, la différence entre les deux enrobés n'étant pas significative. En raison notamment du vieillissement plus faible de son liant, l'enrobé EST est le moins performant. La différence à 30'000 cycles (0 semaine) atteint 1.1% par rapport à la référence et 1.7% par rapport à l'enrobé ET-C. On peut également relever la bonne correspondance entre le comportement à l'orniérage et la température anneau et bille des liants. Le liant ET-C possède une température A&B élevée (entre 76 et 79 °C) comparativement aux autres enrobés dont la température A&B est inférieure à la température de réalisation de l'essai d'orniérage. Les différences observées entre les enrobés testés restent malgré tout relativement faibles ; la bonne qualité des gros granulats (16/22) permettant de garantir des performances élevées des mélanges à l'orniérage.

Les mesures à 0 et 12 semaines mettent en évidence le vieillissement de l'enrobé avec une profondeur d'ornière diminuée lors de l'essai à 12 semaines. De même, la pente (représentation de la profondeur d'ornière en fonction du nombre de cycles en échelle logarithmique) diminue avec le vieillissement de l'enrobé.

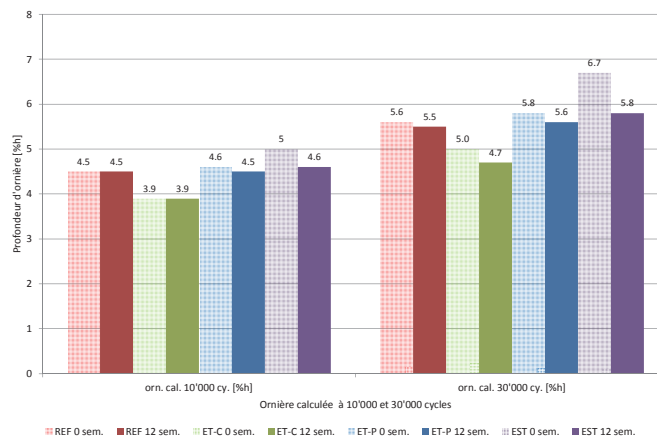


Figure 4-36 : Profondeur d'ornière STL après 0 et 12 semaines

La représentation de l'évolution de la profondeur d'ornière en fonction du nombre de cycles est disponible dans la Figure 4-37. A 0 semaine, les enrobés REF et ET-P ont un comportement très proche, situé à mi-chemin entre l'enrobé ET-C et EST. Les essais après 12 semaines indiquent le même classement, mais les enrobés ET-P et REF sont plus proches de l'enrobé EST. La diminution de la profondeur d'ornière à 30'000 cycles et 12 semaines de l'enrobé EST est de 0.7%, ce qui est le double de la diminution de profondeur d'ornière pour les autres enrobés. Ceci est en accord avec la différence de pénétration plus importante observée entre le liant EST brut et le liant récupéré après 12 semaines que pour les autres liants. Malgré une diminution de la profondeur d'ornière plus importante pour l'enrobé EST, sa résistance globale aux déformations permanentes reste moins élevée que pour les autres mélanges.

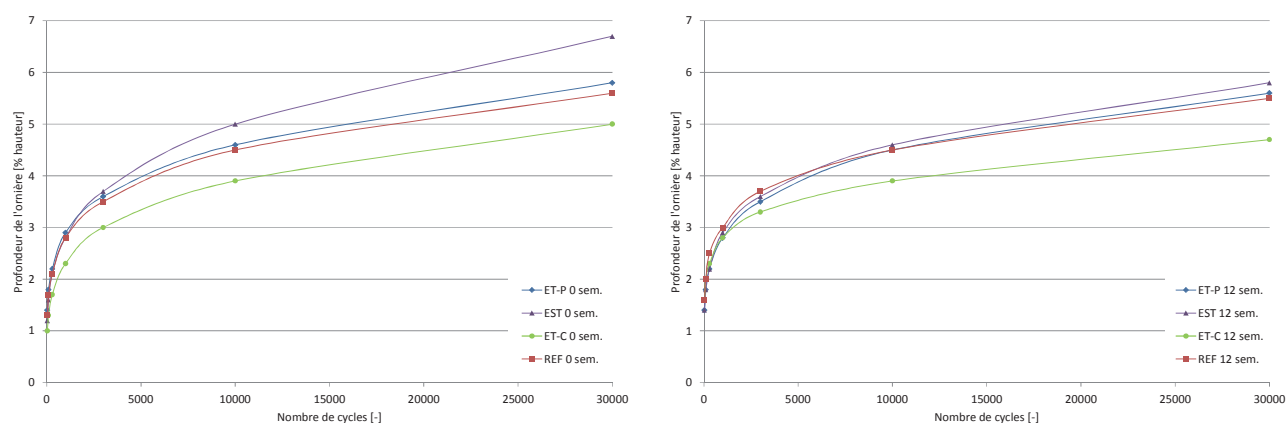


Figure 4-37 : Evolution de la profondeur d'ornièrre (gauche : 0 semaine, droite : 12 semaines)

Les différences de comportement observées entre les enrobés sont logiques. Il est également important de garder à l'esprit que tous les enrobés testés présentent globalement un excellent comportement à l'ornièrage, avec une profondeur d'ornièrre à 10'000 cycles allant de 3.9% (ET-C, 0 et 12 semaines) à 5% (EST, 0 semaine). Les hautes performances des enrobés peuvent être attribuées notamment à la gamme de teneur en vide qui permet un bon blocage des granulats. Dans le domaine de teneur en vides allant de 5% à 8%, l'enchaînement granulaire est performant. Dans le cas d'un enrobé très fermé, le mastic a une grande incidence sur le comportement à l'ornièrage qui est alors moins performant. Pour des teneurs en vide supérieures à 8%, il existe une zone de post-compactage, ce qui induit un risque élevé d'ornièrage et de fatigue.

Relevons encore que la norme suisse SN 640 431-1b-NA indique une exigence de profondeur d'ornièrre à 10'000 cycles pour l'enrobé AC T S de $\leq 10\%$ (essai réalisé à 60 °C).

Sensibilité à l'eau

Les résultats bruts de l'essai ITSR pour l'évaluation de la sensibilité à l'eau des enrobés sont présentés dans le Tableau 4-20. Ce tableau contient également la teneur en vides (hydrostatiques) des éprouvettes Marshall compactées par 25 coups sur chaque face. La Figure 4-38 illustre les résultats.

De manière générale, le ratio ITSR des enrobés REF, ET-C et ET-P est supérieur à 80%, ce qui traduit un bon comportement des mélanges. Prenant en considération la répétabilité de l'essai (voir Annexe A), on peut évaluer le comportement des enrobés REF, ET-C et ET-P comme comparable. Seule exception, la mesure après 4 semaines pour l'enrobé ET-C qui est plus élevée (ratio de 100%). L'enrobé EST est moins performant avec un ratio ITSR inférieur à 80% après 1, 2 et 12 semaines.

Tableau 4-20 : Sensibilité à l'eau des enrobés après différents pas de temps

Enrobé	Cure [sem]	Vides [%]	Ratio ITSR	ITSw [kN/m ²]	ITSd [kN/m ²]
REF	0	9.1	80	745	929
	1	9.4	88	815	930
	2	8.1	90	999	1109
	4	8.5	86	881	1022
	12	9.3	87	804	925
ET-C	0	8.8	92	666	724
	1	9.4	88	850	963
	2	9.1	87	922	1057
	4	9.9	100	900	903
	12	9.5	87	824	944
ET-P	0	11.4	82	756	923
	1	9.8	83	706	854
	2	9.4	96	953	994
	4	9.6	84	791	940
	12	9.8	90	979	1085
EST	0	8.2	81	619	765
	1	9.6	73	571	781
	2	9.2	78	608	778
	4	9.5	82	635	776
	12	8.6	65	580	891

Le ratio ITSR est le rapport en pourcentage des résistances à la traction indirecte des échantillons avec (ITSw) et sans (ITSd) conditionnement dans l'eau. L'utilisation d'un rapport « masque » l'ordre de grandeur des pressions appliquées lors de l'essai, pressions qui traduisent également la cohésion de l'échantillon. L'analyse des pressions appliquées lors de l'essai confirme le comportement comparable entre les enrobés REF, ET-C et ET-P (Figure 4-38). Les performances moins élevées de l'enrobé EST sont également confirmées, les pressions appliquées à la rupture de l'éprouvette étant sensiblement plus faibles. Le comportement de l'enrobé EST peut être expliqué par le vieillissement moins important du liant. L'humidité résiduelle n'est pas suffisamment élevée pour altérer les performances de l'EST ; ceci sera discuté au chapitre 4.9.4.

Dans l'analyse des pressions, une montée en performance au cours des deux premières semaines est observée pour les enrobés REF, ET-C et ET-P. Cette évolution de la résistance est moins visible par l'analyse des ratios ITSR. Elle doit cependant être considérée avec précaution compte tenu de la répétabilité de l'essai. L'enrobé EST n'indique pas clairement de montée en performance, mais un comportement globalement stable.

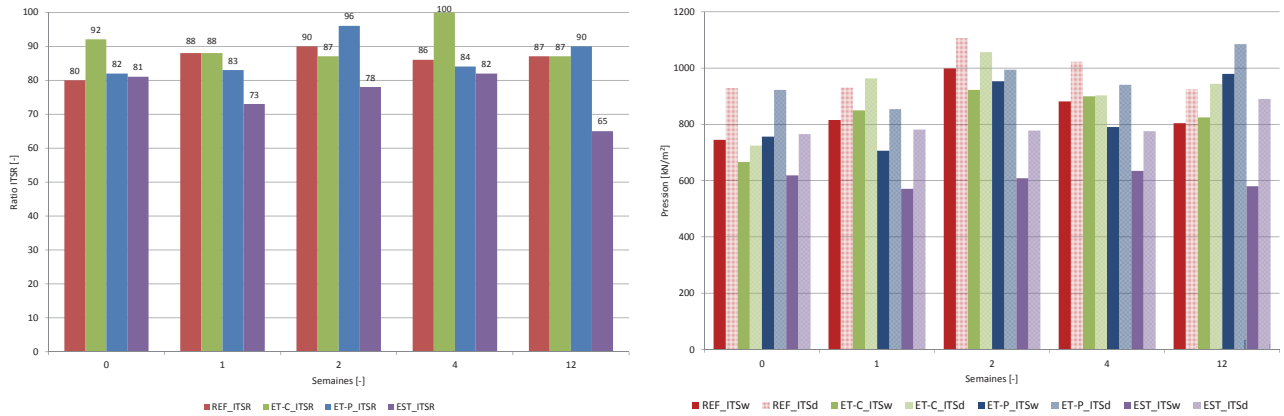


Figure 4-38 : Ratio ITSR et pressions à différents pas de temps lors de l’essai de sensibilité à l’eau

Le Tableau 4-21 représente les pressions mesurées pour les enrobés tièdes, exprimées par rapport à l’enrobé de référence (REF=100%). Le code couleur est le suivant :

- Bleu : Performance de l’enrobé supérieure à la référence.
- Vert : Performance de l’enrobé entre 90% et 100% de la référence.
- Jaune : Performance de l’enrobé entre 80% et 90% de la référence.
- Orange : Performance de l’enrobé entre 70% et 80% de la référence.
- Rouge : Performance de l’enrobé inférieure ou égale à 70% de la référence.

Ce tableau illustre les bonnes performances des enrobés ET-C et ET-P qui se démarquent de l’enrobé EST pour ce qui est de la sensibilité à l’eau. En particulier, les éprouvettes ET-C avec conditionnement montrent un comportement souvent meilleur que la référence à chaud. Les éprouvettes EST avec conditionnement dans l’eau (ITSw) indiquent quant à elles une tendance contraire avec une résistance qui représente en moyenne moins de 72% de la référence.

Tableau 4-21 : Pressions mesurées lors de l’essai de sensibilité à l’eau, exprimées par rapport à l’enrobé REF

Cure [sem]	REF		ITSd [%REF]			ITSw [%REF]		
	ITSd [kN/m²]	ITSw [kN/m²]	ET-C	ET-P	EST	ET-C	ET-P	EST
0	929	745	78%	99%	82%	89%	101%	83%
1	930	815	104%	92%	84%	104%	87%	70%
2	1109	999	95%	90%	70%	92%	95%	61%
4	1022	881	88%	92%	76%	102%	90%	72%
12	925	804	102%	117%	96%	102%	122%	72%

La normalisation suisse fournit des exigences pour la sensibilité à l’eau des enrobés AC T. La valeur limite d’admissibilité pour le ratio ITSR est $\geq 70\%$. Cette valeur basée sur l’expérience acquise lors de l’établissement de la norme est très faible et elle ne permet pas de mettre en évidence de manière précise différentes classes de comportement mécanique. Par ailleurs, avec un tel seuil d’admissibilité, des matériaux au comportement mécanique médiocre pourraient être acceptés.

Module complexe

Dans le cas d’un enrobé bitumineux, le degré de cohésion du mélange varie en fonction de la température et de la fréquence de chargement. Afin de connaître l’évolution de cette cohésion, il est nécessaire d’analyser la relation entre l’état de contrainte et l’état de déformation de l’enrobé pour différentes combinaisons de température et fréquence (étude rhéologique). Pour cela, des essais de module complexe ont été réalisés sur éprouvettes trapézoïdales, après 2 et 12 semaines, dans une gamme de température située entre -10 °C et $30\text{-}35\text{ °C}$, et pour des fréquences de 1, 3, 10, 25 et 40 Hz.

La courbe maîtresse est déterminée à la température de référence T_R de 15 °C, selon la loi d'Arrhénius décrite en Annexe. Le détail des résultats (température, fréquence, module complexe, écart-type) ainsi que des représentations complémentaires sont disponibles en Annexe A.

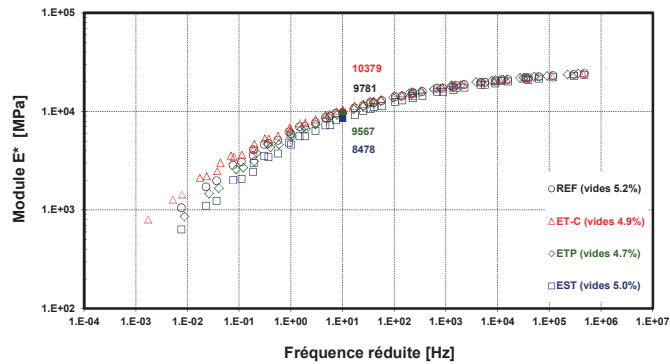


Figure 4-39 : Courbe maîtresse des différents enrobés ($T_R=15$ °C, 2 semaines)

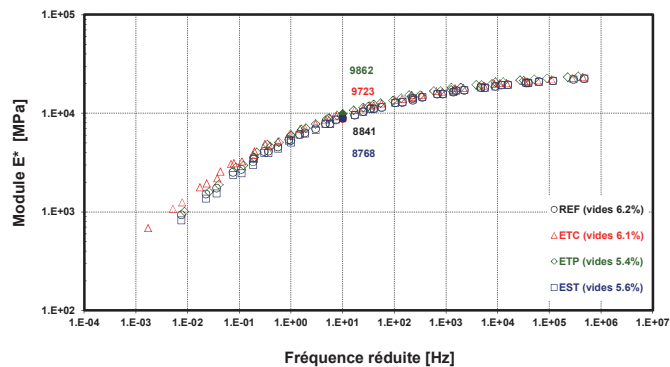


Figure 4-40 : Courbe maîtresse des différents enrobés ($T_R=15$ °C, 12 semaines)

Les teneurs en vides moyennes sont indiquées dans les figures ci-dessus. La gamme de vides est comparable pour les différents enrobés testés à un même pas de temps. On peut remarquer qu'une compacité légèrement inférieure a systématiquement été obtenue sur les éprouvettes testées après 12 semaines. Cette différence est de 0.6% (EST) à 1.2% (ET-C). Elle n'est pas suffisamment importante pour engendrer des modifications sensibles du comportement, mais elle peut influencer sur le module complexe mesuré.

Après 2 semaines, l'enrobé ET-C présente le module complexe le plus élevé. Cette différence est d'autant plus importante dans le domaine des hautes températures (partie gauche de la courbe maîtresse). On observe à basse température (partie droite de la courbe maîtresse), une superposition des différentes courbes maîtresses. Dans ce domaine, ce sont principalement le squelette granulaire et la compacité qui confèrent la résistance au matériau. A la température et fréquence de référence (15 °C, 10 Hz), l'enrobé ET-C a un module 600 Mpa plus élevé que la référence. L'enrobé ET-P est par contre très proche de la référence, la différence étant d'environ 200 MPa. L'enrobé EST présente un module complexe sensiblement plus faible, sa valeur étant 1900 MPa inférieure au module complexe de l'enrobé ET-C.

Les essais réalisés après 12 semaines confirment le meilleur comportement de l'enrobé ET-C dans le domaine des hautes températures où il présente un module complexe plus élevé que les autres enrobés. De manière générale, la tendance et les différences entre les courbes maîtresses est par contre resserrée, certainement en raison du mûrissement de l'enrobé. Dans les conditions de référence (15 °C, 10 Hz), l'enrobé ET-P possède le module complexe le plus élevé, la différence avec l'enrobé ET-C n'est cependant pas significative (<140 MPa). L'enrobé de référence a un module complexe environ

1000 MPa plus faible que le mélange ET-P, l'enrobé EST présentant la valeur de module complexe la moins élevée tout comme lors des essais après 2 semaines. Nous pouvons encore relever que les enrobés ET-P et EST indiquent une augmentation de module complexe légèrement inférieure à 300 MPa entre les essais à 2 et 12 semaines. Pour les enrobés ET-C et REF les mesures fournissent par contre une diminution du module complexe de respectivement 650 MPa et 940 Mpa. Cette évolution des modules complexe entre les essais à 2 et 12 semaines peut être en partie liée à la teneur en vides. On pourrait également se demander si cette évolution ne traduit pas une atténuation de l'effet de la cire au cours du temps. Ceci nécessiterait de plus amples investigations. Finalement, les essais de module ne mettent pas en évidence de montée en performance significative des enrobés.

Lors de l'analyse de ces résultats, il est nécessaire de prendre en compte la précision et la variabilité de l'essai. Pour chaque mélange et pas de temps, les résultats indiqués sont la moyenne de 4 éprouvettes. L'écart-type est indiqué dans le détail des mesures, disponible en Annexe. En règle générale, sa valeur diminue avec l'augmentation de la température d'essai. Dans les conditions de référence (15 °C, 10 Hz), l'écart-type est de 370 MPa pour l'enrobé de référence, 560 MPa pour l'enrobé ET-C, 200 MPa pour l'enrobé ET-P et 300 MPa pour l'enrobé EST. Ainsi, des différences de module inférieures à 400 MPa ne peuvent être assimilées à des différences significatives de comportement.

L'analyse des angles de déphasage fournit également des informations intéressantes. En règle générale, l'essai est arrêté lorsque l'angle de déphasage atteint 45°, car l'enrobé entre alors dans un domaine de comportement visqueux et les résultats ne sont plus fiables. Comparativement aux autres enrobés testés, l'enrobé avec cire indique de manière générale un angle de déphasage plus faible. Ceci a permis de réaliser les essais jusqu'à la température de 35 °C, l'essai ayant été arrêté à 30 °C pour les autres mélanges. La diminution de l'angle de déphasage lors de l'ajout de cire avait également été observée lors des essais sur mastics et liants discutés précédemment (effet rigidifiant).

4.9.3 Analyse de la méthode de cure

Deux méthodes de cure ont été évaluées : cure traditionnelle à l'air libre en laboratoire, et conservation des échantillons dans un sac plastique dans le but de « reproduire » le confinement in-situ de l'enrobé entre les couches. La méthode de cure est analysée par l'essai de compression diamétrale réalisé à différentes températures (-10 °C, 15 °C, 40 °C), après 1, 2, 4 et 12 semaines.

Le détail des résultats est disponible dans le Tableau 4-16. La teneur en vides moyenne et la répétabilité des résultats ont été discutées précédemment (chapitre 4.9.2). Les figures ci-dessous indiquent pour chaque enrobé, les résultats de compression diamétrale avec (barres évidées) et sans (barres pleines) conditionnement dans des sacs plastiques. Les résultats sont présentés pour les températures de -10 °C et 40 °C, les analyses à 15 °C étant disponibles en annexe. Dans chacune des figures, les barres d'erreur sont également indiquées afin de représenter la variabilité des trois éprouvettes testées.

Les essais à -10 °C ne permettent pas de mettre en évidence un effet significatif de la méthode de conditionnement. Les différences maximales mesurées entre les échantillons avec et sans conditionnement s'échelonnent de 0.2 N/mm² pour l'enrobé ET-P à 0.4 N/mm² pour les enrobés EST et ET-C. Les résultats à 40 °C sont plus stables et ils confirment ces observations. La différence maximale observée entre l'échantillon avec et sans conditionnement est de 0.02 N/mm² pour l'enrobé ET-C, 0.03 N/mm² pour l'enrobé REF et 0.04 N/mm² pour les enrobés ET-P et EST.

L'analyse des données relatives aux différents procédés avec conditionnement ne met pas en évidence un processus significatif de montée en performance.

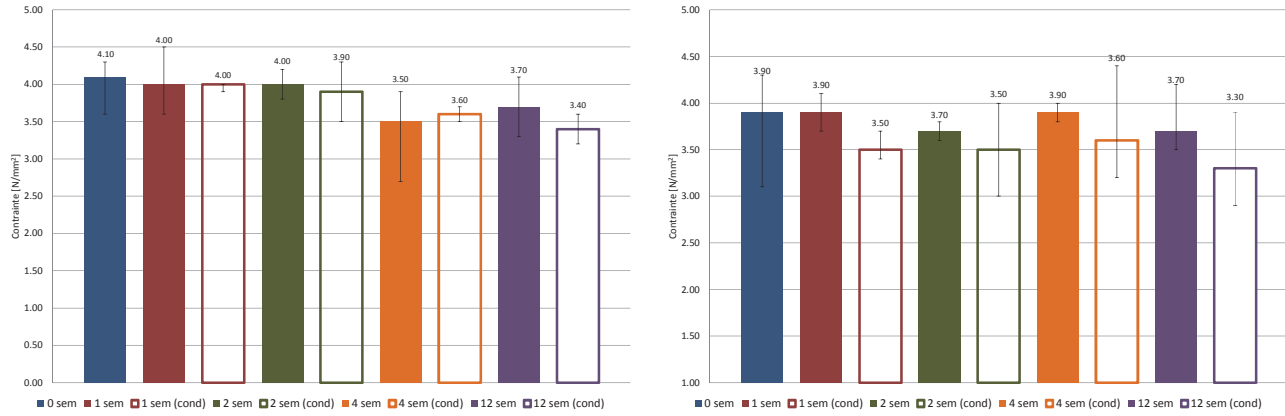


Figure 4-41 : Contraintes mesurées à la compression diamétrale (-10 °C) avec/sans conditionnement des échantillons (gauche : REF, droite : ET-C)

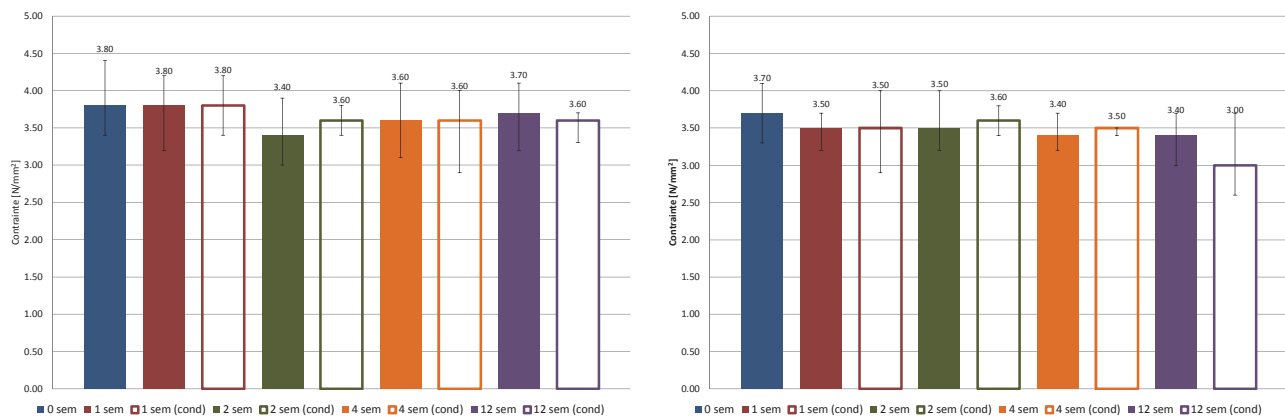


Figure 4-42 : Contraintes mesurées à la compression diamétrale (-10 °C) avec/sans conditionnement des échantillons (gauche : ET-P, droite : ET)

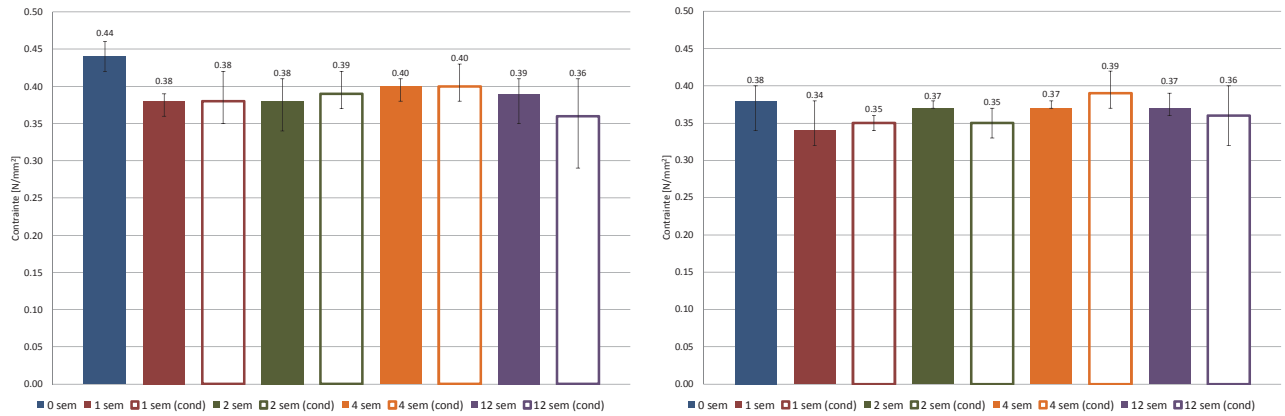


Figure 4-43 : Contraintes mesurées à la compression diamétrale (40 °C) avec/sans conditionnement des échantillons (gauche : REF, droite : ET-C)

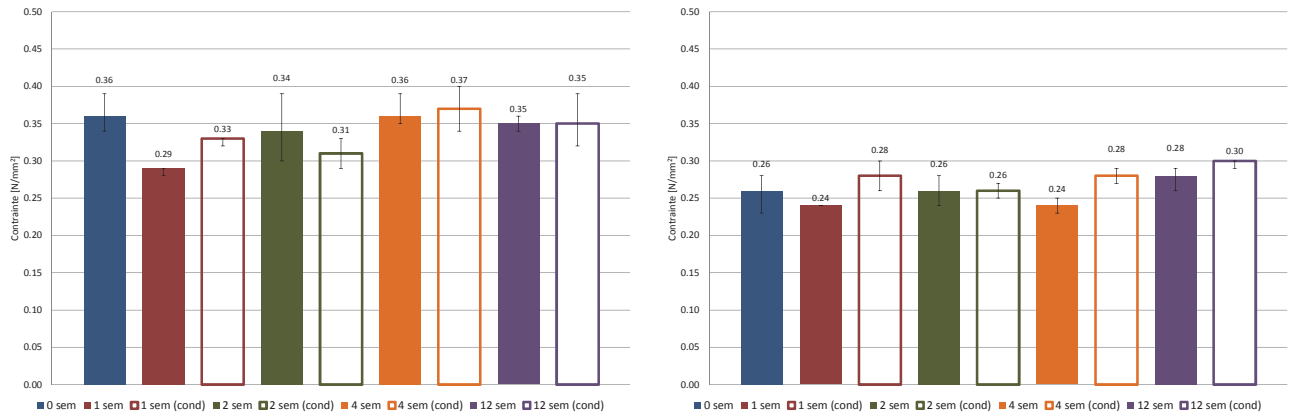


Figure 4-44 : Contraintes mesurées à la compression diamétrale (40 °C) avec/sans conditionnement des échantillons (gauche : ET-P, droite : EST)

Le Tableau 4-22 analyse les contraintes mesurées lors de l’essai de compression diamétrale, avec et sans conditionnement, par rapport à la contrainte mesurée sur l’enrobé de référence (REF=100%). Le code couleur utilisé est le même que pour l’analyse de la sensibilité à l’eau. Le bon comportement de l’enrobé ET-C est mis en évidence avec pour la plupart des cas une différence inférieure à 10%. Rappelons que la mesure sur enrobé de référence à -10 °C, sans conditionnement et 4 semaines présente une grande variabilité liée au compactage. Ceci explique certainement le meilleur comportement des enrobés ET-C et ET-P pour ce cas précis. Pour les raisons citées précédemment, l’enrobé EST est le moins performant à la compression diamétrale, ceci tout particulièrement à 40 °C où le liant et son vieillissement jouent un rôle important. Ce tableau ne met également pas en évidence de différences significatives entre les échantillons avec et sans conditionnement dans des sacs plastique.

Tableau 4-22 : Contraintes mesurées en compression diamétrale, exprimées par rapport à l’enrobé REF

Cure [sem]	Conditio. [-]	Temp. [°C]	REF [N/mm²]	Contrainte [% REF]		
				ET-C	ET-P	EST
0	Non	-10	4.10	95%	93%	90%
1	Oui	-10	4.00	88%	95%	88%
1	Non	-10	4.00	98%	95%	88%
2	Oui	-10	3.90	90%	92%	92%
2	Non	-10	4.00	93%	85%	88%
4	Oui	-10	3.60	100%	100%	97%
4	Non	-10	3.50	111%	103%	97%
12	Oui	-10	3.40	97%	106%	88%
12	Non	-10	3.70	100%	100%	92%
0	Non	15	2.05	95%	98%	76%
1	Oui	15	1.88	93%	86%	84%
1	Non	15	1.95	84%	93%	73%
2	Oui	15	2.02	94%	88%	77%
2	Non	15	2.08	91%	69%	75%
4	Oui	15	2.32	84%	80%	63%
4	Non	15	1.68	114%	110%	87%
12	Oui	15	1.92	95%	97%	85%
12	Non	15	1.85	101%	103%	83%
0	Non	40	0.44	86%	82%	59%
1	Oui	40	0.38	92%	87%	74%
1	Non	40	0.38	89%	76%	63%
2	Oui	40	0.39	90%	79%	67%
2	Non	40	0.38	97%	89%	68%
4	Oui	40	0.40	98%	93%	70%
4	Non	40	0.40	93%	90%	60%
12	Oui	40	0.36	100%	97%	83%
12	Non	40	0.39	95%	90%	72%

Comme pour l’analyse du processus de montée en performance, un test statistique (test de Student) est réalisé afin d’analyser l’effet de la procédure de conditionnement (détails en Annexe A). Ce test a pour objectif de déterminer si la différence entre les moyennes de deux groupes de données est statistiquement significative. Considérons les groupes de données mesurées avec et sans conditionnement dans un sac plastique. Les paramètres suivants sont définis :

- Nombre de valeurs observées par groupe n=3

- Nombre de degrés de liberté $\nu=3+3-2=4$
- Risque d'erreur $\alpha=0.05$ et $\alpha=0.01$

A l'aide d'une table de la loi de Student, nous pouvons déterminer $t_{0.05}(4)=2.776$ et $t_{0.01}(4)=4.604$. Pour chaque enrobé et chaque température d'essai, l'écart du test T est calculé pour les essais à 1, 4 et 12 semaines. Si $T < t_{\alpha}(\nu)$, alors la différence entre les moyennes des deux groupes de données n'est pas statistiquement significative.

Tableau 4-23 : Test de Student pour analyse de la méthode de cure

Enrobé	Temp.	Ecart du test T					
		1 sem.	Eval.	4 sem.	Eval.	12 sem.	Eval.
REF	-10 °C	-0.254	$T < t_{\alpha}(\nu)$	0.653	$T < t_{\alpha}(\nu)$	-1.162	$T < t_{\alpha}(\nu)$
REF	15 °C	-0.595	$T < t_{\alpha}(\nu)$	1.999	$T < t_{\alpha}(\nu)$	1.142	$T < t_{\alpha}(\nu)$
REF	40 °C	0.302	$T < t_{\alpha}(\nu)$	0.392	$T < t_{\alpha}(\nu)$	-0.769	$T < t_{\alpha}(\nu)$
ET-C	-10 °C	-2.524	$T < t_{\alpha}(\nu)$	-0.466	$T < t_{\alpha}(\nu)$	-1.237	$T < t_{\alpha}(\nu)$
ET-C	15 °C	1.201	$T < t_{\alpha}(\nu)$	0.410	$T < t_{\alpha}(\nu)$	-0.541	$T < t_{\alpha}(\nu)$
ET-C	40 °C	0.180	$T < t_{\alpha}(\nu)$	1.342	$T < t_{\alpha}(\nu)$	-0.539	$T < t_{\alpha}(\nu)$
ET-P	-10 °C	0.197	$T < t_{\alpha}(\nu)$	-0.231	$T < t_{\alpha}(\nu)$	-0.465	$T < t_{\alpha}(\nu)$
ET-P	15 °C	-2.239	$T < t_{\alpha}(\nu)$	0.155	$T < t_{\alpha}(\nu)$	-0.433	$T < t_{\alpha}(\nu)$
ET-P	40 °C	8.485	$T > t_{\alpha}(\nu)$	0.343	$T < t_{\alpha}(\nu)$	0.158	$T < t_{\alpha}(\nu)$
EST	-10 °C	0.000	$T < t_{\alpha}(\nu)$	0.224	$T < t_{\alpha}(\nu)$	-0.702	$T < t_{\alpha}(\nu)$
EST	15 °C	1.794	$T < t_{\alpha}(\nu)$	-0.049	$T < t_{\alpha}(\nu)$	1.125	$T < t_{\alpha}(\nu)$
ET	40 °C	3.464	$T > t_{\alpha}(\nu)$	4.889	$T > t_{\alpha}(\nu)$	2.121	$T < t_{\alpha}(\nu)$

Pour la majorité des analyses, il apparaît que les données avec et sans conditionnement ne sont pas statistiquement différentes. Dans trois cas, indiqués en rouge, les contraintes moyennes mesurées sont statistiquement différentes. Une analyse détaillée de ces cas indique qu'il s'agit de mesures où la variance est nulle et la répartition de l'écart entre les valeurs maximales et minimales est très faible (mesures à 40 °C) i.e. la courbe de répartition de chaque groupe de données est très serrée. Le nombre de données mesurées pour chaque groupe (n) étant réduit, les tendances peuvent rapidement évoluer. Bien que ces trois cas indiquent une différence statistique entre les deux groupes d'échantillons, on ne peut conclure à un effet significatif de la méthode de conditionnement dans des sacs plastiques pour les enrobés évalués.

4.9.4 Analyse complémentaire enrobé EST

L'humidité résiduelle des enrobés avec ajout/maîtrise de la teneur en eau (EST) est une cause potentielle de diminution des performances mécaniques. Pour l'enrobé EST étudié ici, l'humidité résiduelle mesurée en sortie de malaxeur est de 0.3%. Cette faible humidité résiduelle évite les problèmes potentiels liés à la présence d'un excès d'eau dans l'enrobé. Les performances observées ne sont donc pas relatives à l'humidité de l'enrobé EST. Corollaire de cette faible humidité, l'enrobé EST fabriqué a une température en sortie de malaxeur supérieure à 100 °C (environ 102-105 °C par mesure infrarouge, 110 °C avec sonde). Au sens strict du terme, l'enrobé EST évalué dans cette recherche est donc un procédé tiède et non pas semi-tiède. Cependant, le gain en température reste largement supérieur à celui des autres enrobés testés. La procédure de fabrication appliquée, définie en accord avec les fournisseurs, doit donc être adaptée si l'on désire une température de sortie inférieure à 100 °C.

Après discussion, il apparaît que le processus de choix des températures, teneur en eau et durée de malaxage nécessite quelques itérations propres à chaque installation.

Un essai a été effectué en doublant l'humidité de la fraction de sable humide (12% au lieu de 6%), tout en maintenant le malaxeur à la température de 95 °C. La température de sortie de l'enrobé est alors située entre 100 et 102 °C (sonde). Les résultats du compactage PCG et de l'essai de sensibilité à l'eau sont indiqués dans la Figure 4-45, où « EST-spécial » fait référence à cette nouvelle fabrication compactée à 95 °C :

- La compacité PCG est sensiblement moins bonne dans le cas de l'enrobé EST-spécial. La teneur en vides entre 60 et 100 girations est environ 1.45% supérieure à celle de l'enrobé EST de base.
- L'effet est également visible sur la sensibilité à l'eau. Le ratio ITSr reste satisfaisant (86%), mais les contraintes mesurées diminuent par rapport à la fabrication EST de base (diminution de 7% et 12.6% pour les éprouvettes avec et sans conditionnement). Ceci accentue encore la différence avec l'enrobé de référence. Un essai Marshall a également abouti à une diminution de la stabilité S_m de 0.6 kN par rapport à la fabrication EST de base alors que le fluage augmente marginalement (0.1 mm).

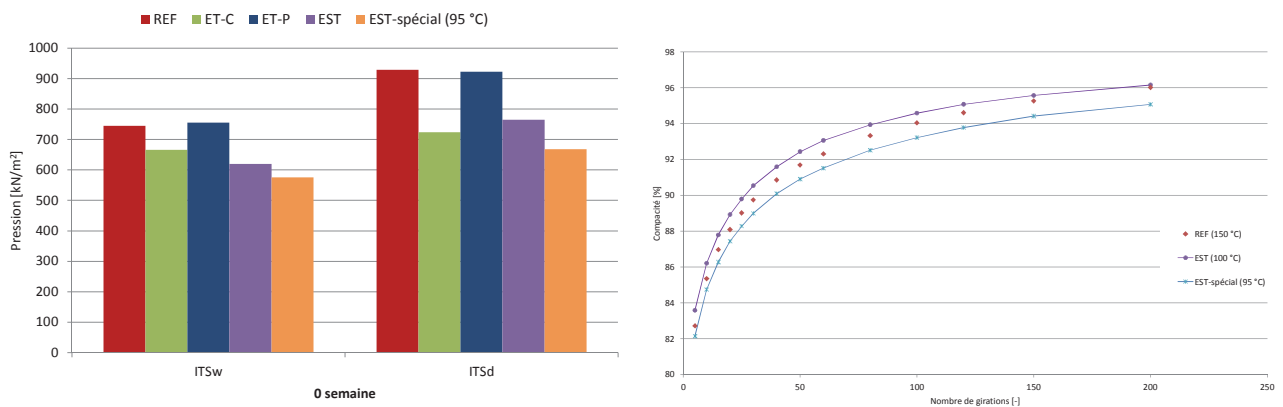


Figure 4-45 : Fabrication EST avec humidité doublée de la fraction froide – Sensibilité à l'eau (gauche) et compactage PCG (droite)

Ces résultats illustrent l'importance de la maîtrise de la fabrication et de la teneur en eau résiduelle. Une fabrication à des températures inférieures à 100 °C nécessite un soin tout particulier afin de ne pas préteriter le comportement mécanique futur de l'enrobé. Selon les fournisseurs d'enrobé semi-tiède, l'humidité résiduelle de doit pas excéder 0.7-0.8%, l'idéal étant de se situer en-dessous de 0.5%. Atteindre des humidités satisfaisantes tout en travaillant à moins de 100 °C est complexe et nécessite une étude spécifique à chaque type d'installation.

L'effet du fluxant a été brièvement analysé par la fabrication d'une gâchée sans additif. L'enrobé sans fluxant compacté à la PCG présente une teneur en vides 1 à 1.25% plus élevée entre 60 et 100 girations que l'enrobé EST. La stabilité Marshall augmente de 1.1 kN sans l'utilisation de fluxant et le fluage diminue de 0.2 mm par rapport au cas EST de base.

4.10 Enseignements

Une large campagne d'essais en laboratoire a été réalisée pour un enrobé de référence à chaud ainsi que trois enrobés tièdes représentatifs des grandes familles : Cire (enrobé ET-C), additif chimique (ET-P) et enrobé avec maîtrise de la teneur en eau (EST). Le plan expérimental a été élaboré en prenant compte des performances et caractéristiques déterminantes ainsi qu'en proposant une approche par équi-

compacité. Une analyse détaillée de la viscosité du liant et du mastic a également permis de mieux comprendre les mécanismes d'action de ces enrobés tièdes.

De manière générale, les différents essais fournissent des résultats consistants et cohérents. Ils mettent en évidence les éléments suivants :

- Les effets de l'ajout de cire Fischer-Tropsch sont clairement identifiables par le comportement rhéologique du liant et du mastic ainsi que lors des essais de caractérisation des liants. Au-dessus de sa température de fusion, dans le domaine des températures de production, pose et compactage, l'utilisation de cire permet de diminuer la viscosité. Un ajout de 3% de la masse de bitume diminue la viscosité de 30 à 40% environ dans la gamme de température allant de 90 °C à 130 °C. L'augmentation de viscosité lorsque la cire est solidifiée confère au mélange une excellente résistance à l'orniérage. La réalisation d'essais de module complexe sur enrobé met en évidence le comportement de la cire dans le domaine des hautes températures de service pour lesquelles une rigidification du mélange a été observée. Un angle de déphasage plus faible a également été mesuré comparativement aux autres enrobés. En raison de cette augmentation de la rigidité, le comportement de l'enrobé à basse température est par contre plus fragile que la référence.
- L'additif chimique ET-P utilisé est un agent tensio-actif. Il n'agit pas (ou peu) sur le comportement du liant et du mastic, mais à l'interface liant-granulat de l'enrobé. Les performances mécaniques et caractéristiques de l'enrobé ET-P sont très proches de celles de l'enrobé de référence à chaud.
- L'enrobé avec maîtrise de la teneur en eau EST permet à-priori d'envisager les plus grands gains énergétiques. En raison de la température de fabrication plus basse, le liant est moins vieilli lors de la fabrication. Ceci n'est pas sans conséquences sur les performances mécaniques. Par rapport aux autres mélanges testés, l'enrobé présente notamment une résistance à la compression diamétrale et une résistance à l'orniérage moins élevée. Une sensibilité à l'eau accrue a été observée, avec des ratios ITSR parfois inférieurs à 80%. Le comportement à basses températures (-10 °C) est moins affecté car la résistance dans ce domaine est principalement liée au squelette granulaire et à la compacité de l'enrobé, le liant jouant un rôle moins important.
- La montée en performance a été analysée par des essais après 0, 1, 2, 4 et 12 semaines. Les résultats ainsi qu'une analyse statistique n'indiquent pas de montée en performance retardée des différents enrobés.
- Le recours à une méthode de cure dans des sacs plastiques au lieu de la conservation traditionnelle à l'air libre a également été analysé. La méthode de cure alternative ne met pas en évidence de différences significatives. Ceci est lié notamment à la faible humidité résiduelle des enrobés analysés.
- Les différentes performances mesurées concernent une couche de base traditionnelle suisse. Elles ne peuvent être généralisées. Les performances sont de plus largement dépendantes des granulats (pétrographie, état des arêtes) et de la formulation (fractions granulométriques fines entre autre).

Cette analyse approfondie en laboratoire met en exergue quelques perspectives de recherches :

- Une formulation standard, non optimisée a été utilisée. L'optimisation de la formulation des enrobés tièdes doit être analysée. L'optimum n'est pas nécessairement le même que pour des enrobés à chaud. L'optimisation de la recette peut se faire au niveau de la granulométrie ou d'une adaptation du choix du liant selon la technologie et le vieillissement subi par le liant lors de la fabrication.

Dans le cas de la cire, le choix du liant doit être adapté. La cire apporte une certaine marge au niveau de la résistance à l'orniérage et dans le comportement rhéologique à hautes températures de service où le liant modifié est meilleur que les autres liants. Ceci autorise d'augmenter la classe de pénétration du bitume utilisé dans le cas d'enrobé avec cire, afin de diminuer davantage la température de fabrication. De plus, si la classe de pénétration du liant est augmentée, alors l'enrobé est moins fragile et plus performant à basse température. Le gain est donc double en augmentant la classe de pénétration du liant pour ce type d'enrobé.

- Dans l'optique d'une diminution des impacts environnementaux, l'ajout d'enrobé recyclé doit être considéré. Ceci peut même s'avérer bénéfique pour les performances mécaniques d'enrobés avec vieillissement réduit du liant.
- Les différents essais ont mis en évidence l'importance d'une humidité résiduelle faible afin de garantir des performances élevées de l'enrobé. La maîtrise de l'humidité résiduelle et la détermination de seuils limites nécessitent d'être approfondis. Des critères d'acceptation des mélanges lors de la fabrication pourraient être proposés.
- La teneur maximale en additif doit être déterminée en fonction des exigences en termes de compacité, maniabilité et performances. Par exemple, une teneur en cire trop élevée conduit à un appauvrissement des performances à basse température, pour un gain de maniabilité modéré.
- Dans le cas de technologies avec moussage du bitume, la mesure de viscosité du liant est difficile, voire impossible. Des méthodes d'évaluation et de caractérisation de la qualité de la mousse (expansion) et de sa durée de vie doivent être mises en place.
- L'applicabilité aux enrobés tièdes des essais et indices utilisés pour les enrobés à chaud doit être évaluée.
- La période de remise sous circulation des sections en enrobés tièdes nécessite une analyse spécifique. Elle dépendra notamment de l'évolution de la viscosité du mélange et des sollicitations prévues (type de chaussée). Des règles d'application ainsi que des méthodes d'évaluation doivent être élaborées.
- La fabrication et le compactage en laboratoire permettent de contrôler et maîtriser quasi-parfaitement l'ensemble des paramètres. La production d'enrobés tièdes en centrale ainsi que la pose in-situ doivent faire l'objet d'une réflexion particulière de chacune des étapes car les variations par rapport aux conditions de laboratoire y sont plus importantes. Une gamme de variation des paramètres principaux doit être proposée, afin de garantir in-situ un enrobé aux performances satisfaisantes. Selon la complexité du procédé, une étude exploratoire pourrait être recommandée.
- De manière générale, le recul sur les performances à long terme, évaluées en laboratoire ou in-situ est encore limité. La création d'une base de données générale, pouvant ensuite être intégrée au modèle multicritère développé dans la suite de la recherche, serait bénéfique pour l'ensemble des acteurs.

L'évaluation des performances est un aspect important si l'on souhaite substituer les enrobés tièdes aux enrobés à chaud. Les performances générales obtenues dans cette étude sont proches, voire parfois meilleures que celles de l'enrobé de référence. Le choix de la technologie adaptée nécessite la prise en compte d'autres critères tels que la consommation énergétique, les émissions, la complexité du procédés, etc. Ceci sera analysé dans la suite de la recherche.

5. MISE EN PLACE ET EVALUATION D'UN ESSAI DE TRACTION INDIRECTE PULSE

5.1 Contexte et objectifs

Le module d'élasticité ou le module complexe ne permettent pas de caractériser directement les performances du mélange (comportement dans le temps et sous sollicitation), mais ils constituent une caractéristique intrinsèque pour les calculs de dimensionnement des chaussées et de durée de vie. De nombreuses relations empiriques existent afin d'évaluer le module de l'enrobé (par exemple Heukelom et Klomp) ainsi que différentes méthodes d'essais en laboratoire. L'essai brésilien ou l'essai de traction indirecte sollicitent le matériau jusqu'à la rupture pour en évaluer la résistance à la traction par fendage. L'essai de traction indirecte avec impulsion de sollicitation permet quant à lui de déterminer le module sécant ou résilient.

La normalisation suisse impose l'essai de flexion sur éprouvettes trapézoïdales pour la détermination de la résistance à la fatigue. Cet essai de flexion deux points est également généralement utilisé pour la détermination du module complexe. Cette méthode nécessite beaucoup de temps et d'argent pour sa réalisation ainsi qu'un soin particulier afin de garantir une précision suffisante. D'autres méthodes d'essais sont proposées dans les normalisations européennes, comme par exemple l'essai de traction indirecte sur éprouvettes cylindriques. L'essai de traction indirecte, également connu sous le nom de NAT (Nottingham Asphalt Testing), permet de calculer le module sécant à partir des déformations mesurées selon le diamètre horizontal. Cet essai non destructif actuellement en développement dans de nombreux pays n'est que peu répandu en Suisse bien qu'il constitue à priori une alternative crédible aux

essais sur éprouvettes trapézoïdales. En plus de sa relative simplicité et rapidité d'exécution, cet essai prometteur peut également être réalisé sur des carottes prélevées in-situ.

L'essai de traction indirecte sur éprouvettes cylindriques se base sur la normalisation EN 12697-26 « Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 26 : Module de rigidité », apparue en 2004. Des cinq annexes correspondant à autant de méthodes d'essais, nous nous intéressons ici à l'Annexe C (Essai de traction indirecte sur éprouvette cylindrique IT-CY). Dans la suite, nous utiliserons de préférence la dénomination de l'essai IT-CY, le NAT faisant référence à la méthode et machine initiales ainsi qu'au bâti physique utilisé pour l'essai.

Après la mise en place de l'essai, une analyse critique de la méthode et des possibilités d'amélioration a été établie puis une série limitée d'essais sur enrobés tièdes a été menée sur des échantillons fabriqués en laboratoire.

5.2 Machine d'essai et capteurs

Pour la réalisation des essais, une presse servo-hydraulique de capacité 50 kN est utilisée. Les caractéristiques principales sont les suivantes :

- Fabricant : Inova (Rep. Tchèque)
- Système servo-hydraulique pour travail en force ou déplacement contrôlé (i.e. une servo-valve dirige le piston)
- Servo-valve 19 l/min (bridée à 10 l/min)
- Basse pression : 60 bars ; haute pression : 270 bars
- Vitesse de vérin max: 2 m/s
- Course max: 100 mm (± 50 mm)
- Fréquence max: 100 Hz
- Limites de sécurité en force, déplacement et pression hydraulique
- Enceinte climatique à azote: -70 °C ... 250 °C (bridée -40 °C ... 200 °C)

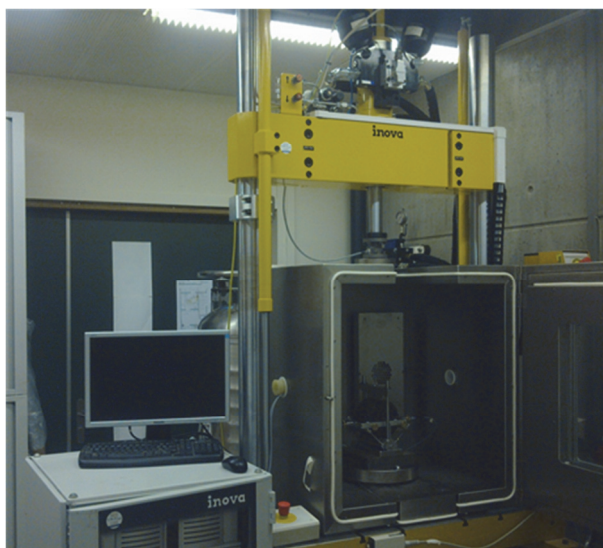


Figure 5-1 : Presse servo-hydraulique avec enceinte de contrôle en température et poste de contrôle

La commande de la presse se fait à l'aide du logiciel « Test Control 0.1 ». Ce programme permet de définir les différents paramètres et créer les signaux de sollicitation voulus. La commande de la presse et de l'enceinte thermique ainsi que tous les éléments nécessaires à la programmation d'un essai sont décrits dans (Bueche 2010).

exprimées en tout point du plan de sollicitation selon les développements de (Assef-Vaziri, Pigois et al. 1984) qui reprend les travaux de Kennedy (1945) :

$$\sigma_x = \frac{-2P}{\pi h} \left[\frac{(R-y)x^2}{r_1^4} + \frac{(R+y)x^2}{r_2^4} - \frac{1}{d} \right]$$

$$\sigma_y = \frac{-2P}{\pi h} \left[\frac{(R-y)^3}{r_1^4} + \frac{(R+y)^3}{r_2^4} - \frac{1}{d} \right]$$

$$\tau_{xy} = \frac{-2P}{\pi h} \left[\frac{(R-y)^2 x}{r_1^4} - \frac{(R+y)^2 x}{r_2^4} \right]$$

L'essai de traction indirecte consiste à mesurer les déformations perpendiculairement à l'application de la force qui se fait selon Oy. Nous avons donc selon Ox :

$$y = 0$$

$$r_1 = r_2 = \sqrt{x^2 + R^2}$$

L'état de contrainte est non homogène. Sur l'axe Ox on obtient après simplification :

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi h d} \left[\frac{d^2 - 4x^2}{d^2 + 4x^2} \right]^2$$

$$\sigma_y = \frac{-2P}{\pi h d} \left[\frac{4d^4}{(d^2 + 4x^2)^2} - 1 \right]$$

$$\tau_{xy} = 0$$

On peut observer qu'en tout point, σ_x est positif (traction) et σ_y est négatif (compression). Les contraintes sur l'axe Ox sont minimales (nulles) en bordure de l'échantillon ($x = \pm d/2$). Les contraintes maximales sont quant à elles au centre de l'éprouvette, lorsque $x=y=0$. L'état de contrainte est alors le suivant :

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi h d}$$

$$\sigma_y = \frac{-6P}{\pi h d}$$

La contrainte horizontale σ_x est donc toujours en traction, maximale au centre de l'éprouvette et nulle en bordure.

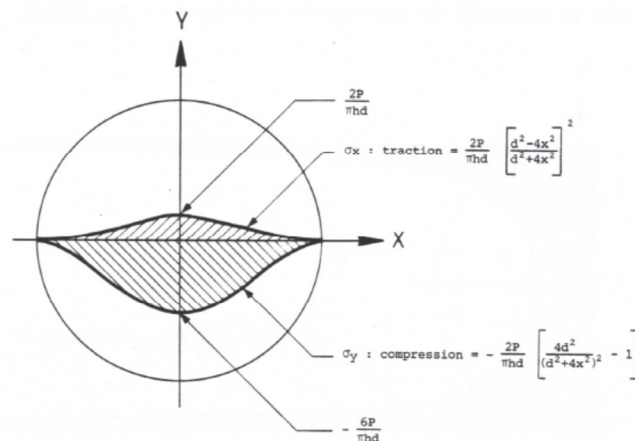


Figure 5-3: Représentation de l'état de contrainte selon Ox (Assef-Vaziri, Pigois et al. 1984)

De même, les contraintes dans le plan vertical (Oy) peuvent être calculées selon une procédure identique. La contrainte σ_x est alors une traction uniforme égale à $2P/\pihd$.

En considérant que les contraintes et déformations satisfont à la loi de l'élasticité, nous pouvons calculer la déformation ε_x en un point de l'axe Ox par la loi de Hooke (cas biaxial) :

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E_x} (\sigma_x - (\nu \sigma_y))$$

Avec E_x : module d'élasticité en traction

ν : coefficient de Poisson

En introduisant les contraintes calculées sur le diamètre perpendiculaire à la sollicitation, puis en simplifiant, nous obtenons :

$$\varepsilon_x = \frac{2P}{E_x \pi h d} \left\{ \frac{4d^4 \nu - 16d^2 x^2}{(d^2 + 4x^2)^2} + (1 - \nu) \right\}$$

Le déplacement ΔH le long de l'axe Ox peut finalement être calculé par intégration :

$$\Delta H = \int_{-d/2}^{d/2} \varepsilon_x dx$$

$$\Delta H = \left[\frac{P}{h E_x} \right] \cdot \left[\frac{4}{\pi} + \nu - 1 \right]$$

Par simplification nous obtenons finalement :

$$E_x = \frac{P(\nu + 0.2732)}{\Delta H \cdot h}$$

Le module d'élasticité de traction E_x peut donc être calculé en tout point sur l'axe Ox, à partir de la charge verticale (P), du déplacement horizontal (ΔH) et de la géométrie de l'échantillon (h).

Dans le cas de matériaux viscoélastiques le comportement visqueux est faible pour un temps de chargement court et un domaine de température adapté. Dans ce cas, le module d'élasticité et le module de rigidité M_R sont confondus et nous obtenons la relation suivante qui établit le module sécant S_m lors d'un essai de traction indirecte :

$$S_m = \frac{P(\nu + 0.2732)}{\Delta H \cdot h}$$

A partir des déformations verticales, le coefficient de Poisson peut être calculé en imposant l'égalité entre les modules d'élasticité selon les axes Ox et Oy (traction et de compression), c'est-à-dire $E_x = E_y$. Dans le cadre de l'essai IT-CY effectué ici, les déformations verticales ne sont pas mesurées, le calcul du module d'élasticité se fait donc en utilisant une valeur approchée du coefficient de Poisson (Di Benedetto et Corté 2004). Cette hypothèse sera discutée plus loin.

5.3.2 Définition du module de l'enrobé

Trois modules sont définis pour caractériser les enrobés bitumineux. Le module complexe E^* , le module sécant S_m et le module résilient E_{res} correspondent à trois types de chargement quasi-statiques (accélération nulle ou négligeable) distincts (Di Benedetto et De La Roche 1998) (Di Benedetto et Corté 2004):

- Le module complexe (module dynamique) E^* permet de relier les contraintes et déformations axiales dans le cas d'une sollicitation sinusoïdale. Il est déterminé sous chargement sinusoïdal

cyclique. Ce type d'essai est considéré comme cyclique et non pas dynamique en raison de la fréquence faible (< 10 Hz) et de l'hypothèse de non-propagation des ondes. Le déphasage entre la charge et la déformation est déterminé en même temps que le module complexe.

- Le module sécant S_m correspond quant à lui à un module moyen entre la charge nulle et la charge à laquelle le module est déterminé. Le chargement est alors monotone ou cyclique (et non sinusoïdal). Le module sécant diffère du module tangent initial, qui lui correspond uniquement à la partie linéaire du diagramme contrainte-déformation. C'est ce module sécant qui est traditionnellement déterminé lors de l'essai IT-CY.
- Dans le cas de répétition de charges, le module résilient E_{res} correspond au ratio entre la contrainte répétée et la déformation réversible (élastique) durant ce même cycle de chargement. Ce module est parfois appelé module réversible. Il s'agit donc d'un chargement cyclique impulsionnel et non pas d'un chargement sinusoïdal comme dans le cas du module complexe. Le module résilient diffère du module complexe et du module sécant ; il correspond à la rigidité d'un matériau considéré comme élastique après de nombreux cycles de chargement.

Ces différentes notions sont illustrées ci-dessous :

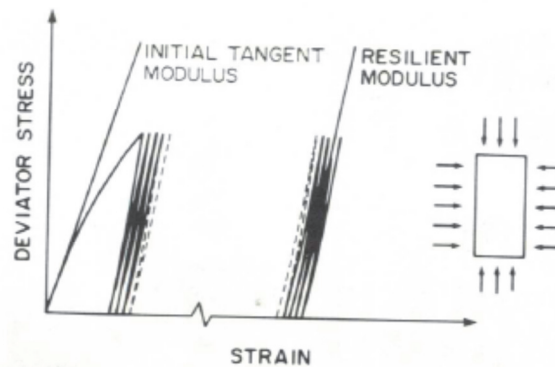


Figure 5-4 : Diagramme contrainte-déformation lors d'un essai triaxial de module résilient (Mamlouk et Sarofim 1988)

La relation établie précédemment pour le module de rigidité lors de l'essai de traction indirecte peut être mise en corrélation avec l'expression de la norme du module complexe d'un enrobé bitumineux que l'on définit ici. Soit un matériau viscoélastique linéaire soumis à une charge sinusoïdale cyclique en fonction du temps t , la déformation ayant un angle de déphasage φ par rapport à la contrainte :

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \sin(\omega t)$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \sin(\omega t - \varphi)$$

L'angle de phase (ou déphasage) fournit une indication de la prédominance visqueuse ou élastique de l'enrobé. L'angle de phase est de 90° pour un matériau purement visqueux et 0° pour un matériau purement élastique. Pour un angle de déphasage nul, le module complexe E^* correspond au module élastique de Young. L'angle de déphasage sera élevé dans le cas de liants mous ou de liants modifiés aux polymères (voir chapitre 4.8).

Le module complexe E^* traduit le ratio contrainte-déformation en écriture complexe (indice *) qui s'écrivent ainsi (Pucci 2000) :

$$\sigma(t) = \text{Im}[\sigma^*(t)] \quad \text{avec} \quad \sigma^*(t) = \sigma_0 e^{i\varphi t}$$

$$\varepsilon(t) = \text{Im}[\varepsilon^*(t)] \quad \text{avec} \quad \varepsilon^*(t) = \varepsilon_0 e^{i(\omega t - \varphi)}$$

Le module complexe $E^*(t)$ est alors défini par l'expression suivante :

$$E^*(t) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} e^{i\varphi} = |E^*| e^{i\varphi}$$

Où la norme (ou module) du module complexe $|E^*|$, appelé module de rigidité s'écrit :

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$$

La norme du module complexe est un indicateur de la rigidité du matériau. On utilise une représentation vectorielle du module complexe, en le décomposant en une partie réelle E_1 (module d'élasticité dynamique) et une partie imaginaire E_2 (module de perte). La partie réelle est associée à la partie élastique du matériau. La composante E_2 quantifie l'énergie dissipée par frottement interne sous l'effet d'une sollicitation. Elle correspond donc à la composante visqueuse du matériau (Carter et Perraton 2002) :

$$E^* = |E^*| \cdot (\cos(\varphi) + i \cdot \sin(\varphi)) = E_1 + iE_2$$

$$\text{Avec } E_1 = |E^*| \cdot (\cos(\varphi))$$

$$E_2 = |E^*| \cdot (\sin(\varphi))$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{E_2}{E_1}\right)$$

Le module sécant $S_m(t)$ à un temps donné t représente quant à lui la relation reliant la contrainte $\sigma(t)$ et la déformation $\varepsilon(t)$ pour un matériau soumis à une charge avec vitesse de déformation contrôlée et température fixe. Le module sécant, qui correspond au module de rigidité, est défini par :

$$S_m(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)}$$

Lorsque la vitesse de chargement est nulle, on obtient soit la fonction de relaxation $r(t)=1/S(t)$, si la sollicitation est une déformation, soit la fonction de fluage $f(t)=S(t)$ si la sollicitation est une contrainte.

Nous pouvons retrouver par analogie la relation du module sécant S_m définie au chapitre 5.3.1 en introduisant le facteur de forme B . La notion de facteur de forme dépendant des dimensions géométriques de l'éprouvette a été introduite par (Di Benedetto, Partl et al. 2001) dans une classification des essais de module complexe en deux familles : les essais homogènes et les essais non homogènes. Les essais homogènes permettent d'avoir accès directement aux contraintes et déformations, alors que les essais non homogènes nécessitent la prise en compte de la structure de l'éprouvette pour le calcul du module. Il vient :

$$B = \frac{1}{h} \cdot (\nu + 0.2732)$$

Nous obtenons la relation suivante pour le module sécant, relation proposée par la norme EN 12697-26 Annexe C :

$$S_m(t) = B \cdot \frac{P(t)}{\Delta H(t)}$$

Le module de rigidité est défini dans EN 12697-26 comme « le module du module complexe $|E^*|$ ou la valeur du module sécant S_m ». L'essai de traction indirecte permet donc de déterminer directement le module de rigidité.

Les parties réelles et imaginaires du module complexe dans le cas d'un essai de traction indirecte peuvent être calculées ; relations issues des travaux de Huet et reprises dans la normalisation :

$$E_1 = B \cdot \left(\frac{P}{\Delta H} \cdot \cos(\varphi) \right)$$

$$E_2 = B \cdot \left(\frac{P}{\Delta H} \sin(\varphi) \right)$$

L'expression de module sécant calculée ici intègre donc une partie réelle (module de Young, composante linéaire élastique) et une partie imaginaire qui traduit le comportement viscoélastique du matériau. A basse température et vitesse de sollicitation élevée, la composante réelle est prédominante et la composante imaginaire négligeable étant donné que la viscosité est très faible. Par contre, à haute température et basse vitesse, la composante imaginaire est importante mettant en évidence la composante viscoélastique.

On peut observer que dans l'expression développée ci-avant pour le module sécant, le barreau de chargement n'est pas pris en considération. Des solutions analytiques prenant en considération la bande de chargement et un état plan des contraintes ont été développées par (Kim, Seo et al. 2004) dans le cas d'un essai de traction indirecte. Les auteurs proposent une expression pour le module sécant en traction indirecte, utilisant la théorie de la viscoélasticité linéaire. Cette expression intègre la largeur des bandes de chargement ainsi que l'angle de propagation de la charge au sein de l'échantillon. La différence entre la solution avec et sans prise en compte de la bande de chargement a été évaluée à 1-2% par (Olard, Noël et al. 2006). Cette différence est faible et par la suite nous allons utiliser la relation de base développée dans la section 5.3.1 également recommandée par la normalisation EN. Concernant la largeur de la bande de chargement, la normalisation autorise une tolérance de ± 1 mm. (Hakim, Said et al. 2008) indique que cette tolérance peut provoquer des différences de pressions allant jusqu'à 16.8% (pour une éprouvette de 100 mm de diamètre). En réduisant cette tolérance à 0.1 mm, la variation de pression maximale serait alors réduite à 1.7%.

5.3.3 Relation entre module sécant et module complexe

L'essai de traction indirecte (IT-CY) permet de calculer le module sécant S_m pour un chargement et une déformation donnée. La relation entre module complexe E^* et module sécant S_m n'est cependant pas directe.

Il est tout d'abord utile de définir les fonctions de fluage F et de relaxation R . La fonction de fluage correspond à l'évolution de la déformation du matériau au cours du temps lorsqu'il est soumis à une contrainte constante dans le temps. La relaxation représente quant à elle la diminution de contrainte en fonction du temps pour un matériau soumis à une déformation constante dans le temps.

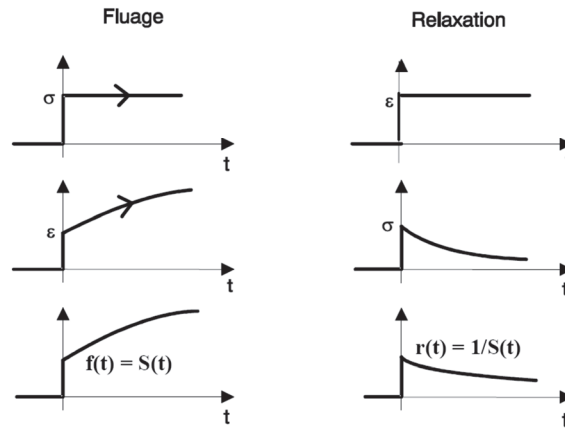


Figure 5-5 : Définition de la fonction de fluage F(t) et relaxation R(t) (Dumont 2003)

Sous l'hypothèse d'un matériau non vieillissant (propriétés ne varient pas au cours du temps), les fonctions F(t) et R(t) permettent de calculer la réponse en déformation/contrainte d'un matériau soumis à une contrainte/déformation quelconque car elles ne sont fonction que de la variable (t-t₀).

Les relations suivantes peuvent être dérivées (principe de superposition des sollicitations élémentaires de Boltzmann) :

$$\varepsilon(t) = \int_0^t F(t - \tau) \dot{\sigma}(\tau) d\tau$$

$$\sigma(t) = \int_0^t R(t - \tau) \dot{\varepsilon}(\tau) d\tau$$

Etant donnée la transformée de Carson permettant de faire correspondre à une fonction réelle f la fonction \tilde{f} :

$$f(t) \rightarrow \tilde{f}(p) = \int_0^\infty pe^{-pt}f(t)dt$$

D'un point de vue formel, le module complexe est égal à la transformée de Carson au point (iω) de la fonction de relaxation du matériau (De La Roche 1996) :

$$\tilde{R}(i\omega) = \frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} = E^*(\omega)$$

La relation ci-dessus permet également de définir la relation entre module complexe E* et fonction de relaxation R(t), ceci en développant la relation de Carson puis en appliquant une transformation de Fourier inverse.

$$R(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{Re(E^*(\omega))}{\omega} \sin(\omega t) d\omega$$

Le module sécant peut être développé en substituant la fonction de relaxation :

$$S_m(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} = \frac{\int_0^t R(t - \tau) \dot{\varepsilon}(\tau) d\tau}{\varepsilon(t)}$$

Pour une loi de déformation de la forme $\varepsilon(t)=at^n$, le module sécant S_m(t) s'écrit alors (Corté et Di Benedetto 2005) :

$$S_m(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} = \frac{\int_0^t R(t-\tau)na\tau^{n-1}d\tau}{at^n} = \frac{1}{t^n} \int_0^t R(t - \tau)\tau^{n-1}d\tau$$

Cette relation, combinée avec les relations reliant le module complexe et la fonction de relaxation permet d'établir un lien théorique entre module complexe et module sécant.

Nous pouvons observer que les relations ci-dessus sont complexes à établir et calculer. (Mamlouk et Sarofim 1988) discute de cette complexité des comparaisons entre les différents modules mesurés. Les différents modules (résilient, complexe, sécant) peuvent être utilisés, le même module étant recommandé pour une procédure de comparaison. Les auteurs concluent également que le module résilient (ou le module sécant dans une moindre mesure) est plus approprié pour un calcul multicouche, car il correspond à la rigidité du matériau après chargements répétés.

(Mamlouk et Sarofim 1988) et (Olard, Noël et al. 2006) mettent également en évidence la relation entre le module sécant et le module résilient.

L'essai de traction indirecte (EN 12697-26 ; Annexe C) proposé ici est un essai de module sécant. Cependant, après plusieurs cycles de chargement, la partie irréversible de la déformation devient non-négligeable. Ce « post-compactage » (ou consolidation) du matériau peut être considéré comme équivalent à un « vieillissement ». Le module mesuré est alors un module résilient, dont la valeur sera légèrement plus importante que celle du module complexe ou du module sécant. La norme relative au module sécant demande « *au moins 10 impulsions de conditionnement* » avant la réalisation de la mesure mais on limitera à 50 impulsions de conditionnement afin de garantir une mesure de module sécant.

(Olard, Noël et al. 2006) ont effectué des mesures de module complexe et de module sécant (traction indirecte et traction directe) sur 10 mélanges différents (8 enrobés à chaud et 2 enrobés à froid). Les résultats montrent que les valeurs de module sécant et de module complexe mesurées sont très proches, le module sécant présentant une dispersion supérieure. Par ailleurs, les modules obtenus en traction indirecte (compression diamétrale) ont tendance à être plus élevés (900 MPa) comparativement aux modules obtenus en configuration uniaxiale (traction compression). Ceci est expliqué notamment par (Kim, Seo et al. 2004) qui discute de la présence d'une zone de déformation plastique près des bandes de chargement.

(Carbonneau, Yvinec et al. 2005) obtient également une bonne corrélation ($R^2=0.94$) à 10 °C entre des essais de traction directe et des essais de compression diamétrale sur éprouvettes PCG de 150 mm de diamètre. De bonnes corrélations sont également obtenues en comparant l'essai de compression diamétrale (impulsions, temps de charge de 125 ms) avec l'essai de module complexe sur éprouvettes trapézoïdales (15°C, 10 Hz). Le coefficient de corrélation obtenu est supérieur à 0.92, la relation dépendant de la géométrie des échantillons testés en compression diamétrale. Dans cette même étude, l'auteur indique que la valeur mesurée en compression diamétrale est en général inférieure à celle déterminée en module complexe en flexion deux points.

(Kim, Seo et al. 2004) effectue également une comparaison de modules complexes obtenus par un essai de traction indirecte (module sécant selon protocole National Cooperative Highway Research Program - NCHRP) avec ceux obtenus par un essai de compression axiale. Douze mélanges ont été testés à différentes températures et fréquences. Ces deux essais se distinguent principalement par d'une part l'état de contrainte (uniaxial ou biaxial) et d'autre part la relation entre la direction de sollicitation et la direction d'analyse. Une bonne correspondance entre les modules déterminés selon les deux méthodes d'essais a été obtenue, un test statistique (T-Test) permettant de montrer que dans 90% des cas les deux résultats d'essais sont statistiquement semblables.

En Suisse, l'essai sur éprouvettes trapézoïdales fait office de référence (EN 12697-26, Annexe A). (Chailleux, De La Roche et al. 2010) effectue une analyse théorique selon deux modèles (Huet et Maxwell généralisé) afin de déterminer les conditions d'essais nécessaires (température équivalente,

temps d'application de la charge gardé constant) pour obtenir une valeur de module sécant (IT-CY) égale au module complexe sur éprouvette trapézoïdale (15 °C, 10 Hz) ; cette valeur faisant office de référence pour les calculs de dimensionnement et durée de vie. L'auteur propose une température équivalente de 10 °C, l'erreur dépendant du facteur de surface de charge et donc des caractéristiques de la machine d'essai.

Les relations théoriques entre les différents modules sont parfois complexes. D'un point de vue pratique, nous pouvons considérer ici que, pour autant que l'essai soit bien exécuté, les différences entre les différents modules sont faibles. Le module sécant mené selon l'essai IT-CY est représentatif et peut être retenu comme valeur pour des calculs de dimensionnement et durée de vie.

5.3.4 Domaine de linéarité des enrobés

Dans le cas de contraintes/déformations relativement faibles, le comportement des enrobés peut être considéré comme celui d'un matériau viscoélastique linéaire. Le module complexe est alors indépendant de l'amplitude de la contrainte et dépend uniquement de la température et de la fréquence. Il est cependant nécessaire de bien identifier le domaine de linéarité ; les différentes considérations relatives au calcul du module sécant ne sont applicables que si l'on se situe dans le domaine de comportement linéaire des matériaux.

Le comportement mécanique peut être classé selon le niveau de déformation imposé (ϵ) et le nombre de cycles de sollicitation (N) tel qu'illustré par (Di Benedetto, Partl et al. 2001). De manière générale, différents domaines de comportement sont identifiés à une température donnée (Figure 5-6) :

- Faible nombre de chargements et déformations de quelques pourcents : comportement fortement non linéaire.
- Chargement de quelques centaines de cycles et déformations faibles ($<10^{-4}$ m/m) : comportement viscoélastique linéaire.
- Chargement de plusieurs dizaines de milliers de cycles et déformations faibles : fatigue du matériau et apparition de déformations irréversibles.

(Olard 2003) mentionne un quatrième domaine relatif à l'orniérage du matériau lorsque des cycles en contrainte sont appliqués à partir d'une contrainte nulle. Dans ce cas, des déformations irréversibles apparaissent pour des amplitudes de déformations proches de la rupture.

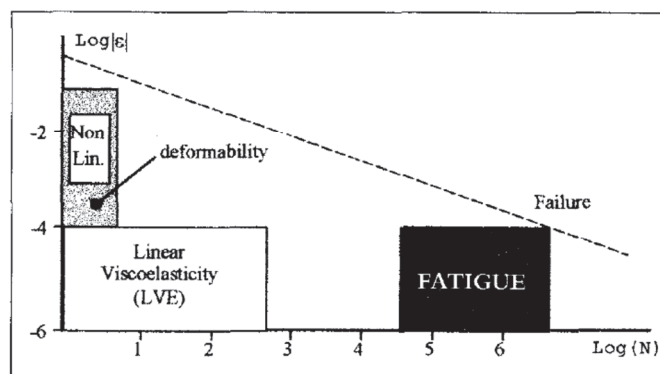


Figure 5-6 : Domaines typiques de déformations pour les enrobés bitumineux (Di Benedetto, Partl et al. 2001)

La Figure 5-6 permet d'estimer l'ordre de grandeur du domaine de comportement linéaire à 10^{-4} ... 10^{-6} m/m. Pour un nombre de chargement n'excédant pas quelques centaines de cycles, on considère alors le comportement comme viscoélastique linéaire (VEL). Les conditions limites peuvent varier selon le type de sollicitation, la température et le type de matériau.

Différents auteurs se sont attachés à identifier les limites du domaine de linéarité de manière plus précise. Nous pouvons mentionner (Airey, Rahimzadeh et al. 2003) qui vérifie pour une gamme de liants (modifiés et non modifiés) et de mélanges bitumineux les limites de linéarité. Le critère de linéarité proposé pour les mélanges est de l'ordre de 10^{-4} m/m. Le critère de linéarité pour les liants est quant à lui au moins 100 fois supérieur. (Croix et Di Benedetto 1996) effectue des essais de module complexe sur trois types d'enrobés en faisant varier la fréquence (0.1 à 20 Hz) et la température (10 à 40 °C) avec une amplitude de déformation de $2.5 \cdot 10^{-5}$ m/m, ceci afin de rester dans le domaine de comportement linéaire du mélange.

Sur la base des considérations ci-dessus, nous pouvons estimer que des déformations inférieures à $100 \cdot 10^{-6}$ m/m permettent de garantir un comportement linéaire des matériaux. Lors de l'essai de traction indirecte, le déplacement horizontal (exprimé en μm) est mesuré à l'aide des capteurs LVDT. La valeur de déplacement horizontal imposée dépend de la géométrie de l'échantillon : $7 \pm 2 \mu\text{m}$ pour les éprouvettes de diamètre 150 mm, $5 \pm 2 \mu\text{m}$ pour les éprouvettes de diamètres 100 mm.

Nous pouvons ainsi calculer le domaine de déformation qui sera atteint lors de l'essai de traction indirecte sur éprouvettes cylindriques (IT-CY) :

$$\begin{aligned} \varnothing = 150 \text{ mm} &\rightarrow \varepsilon_{min} = \frac{0.005}{150} = 33 \cdot 10^{-6} \frac{m}{m} \text{ et } \varepsilon_{max} = \frac{0.009}{150} = 60 \cdot 10^{-6} \frac{m}{m} \\ \varnothing = 100 \text{ mm} &\rightarrow \varepsilon_{min} = \frac{0.003}{100} = 30 \cdot 10^{-6} \frac{m}{m} \text{ et } \varepsilon_{max} = \frac{0.007}{100} = 70 \cdot 10^{-6} \frac{m}{m} \end{aligned}$$

Le calcul ci-dessus montre que les déplacements demandés dans le cadre de l'essai de traction indirecte se situent bien dans le domaine de linéarité de l'échantillon. La déformation maximale représente 60% respectivement 70% de la limite théorique du domaine de linéarité. La norme exige des déformations inférieures à $50 \cdot 10^{-6}$ m/m. D'un point de vue pratique, la limite de comportement viscoélastique peut être déterminée en effectuant un balayage en déformations, partant d'un niveau très bas. Lorsque le module mesuré change de façon significative (+10% par exemple), on peut alors considérer avoir atteint la limite VEL.

Le déplacement maximal, permettant d'atteindre la limite de linéarité de $100 \cdot 10^{-6}$ m/m est de $15 \mu\text{m}$ pour un échantillon de diamètre 150 mm et $10 \mu\text{m}$ pour un échantillon de diamètre 100 mm. Il est ainsi possible de calculer la force maximale pouvant être appliquée en fonction du module sécant du matériau, afin de rester dans le domaine de linéarité théorique de l'enrobé.

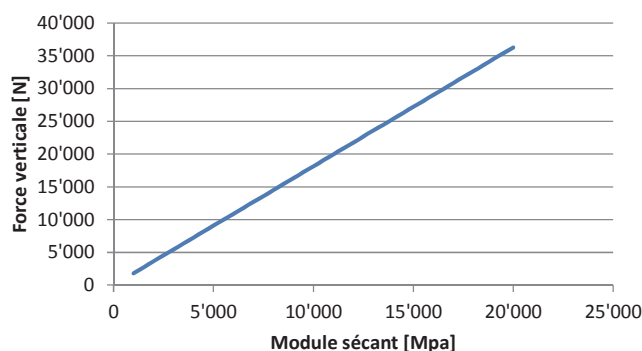


Figure 5-7 : Essai de traction indirecte - Force maximale permettant de respecter le domaine de linéarité théorique (Hyp : $\nu=0.35$, hauteur=75 mm, diamètre=150 mm)

A titre de comparaison, nous pouvons relever que l'essai de module complexe sur éprouvette trapézoïdale impose quant à lui des déplacements inférieurs à $50 \mu\text{m}$, ce qui est sensiblement plus

important que pour l'essai de traction indirecte. Notons que la configuration de l'éprouvette et l'application de la force est différente sur éprouvette trapézoïdale avec des déplacements dans deux sens, soit en traction et compression.

5.3.5 Coefficient de Poisson

Le module sécant dépend de la force verticale appliquée, du déplacement horizontal mesuré, de la géométrie de l'échantillon ainsi que du coefficient de Poisson ν . Le coefficient de Poisson est donc un paramètre important, dépendant principalement de la fréquence et de la température, mais peu de l'amplitude des déformations axiales.

Nous pouvons calculer que dans le cas d'un module sécant $S_m=6'000$ MPa à la température d'essai de 15°C et pour un $\nu=0.35$, une différence de 0.05 sur le coefficient de Poisson entraîne une variation de $\pm 8\%$ sur le S_m ($5'515$ MPa avec $\nu=0.3$ et $6'480$ MPa avec $\nu=0.4$). Ceci montre toute l'importance du choix du coefficient de Poisson.

D'un point de vue théorique, le coefficient de Poisson est défini comme le rapport entre la déformation transversale et la déformation axiale. Nous pouvons exprimer de manière théorique le coefficient de Poisson complexe (ν^*) sous les hypothèses suivantes :

- Réponse élastique du matériau sous conditions de chargement isotropique
- Déformation infinitésimale
- La réponse viscoélastique du matériau est issue des contraintes et déformations de cisaillement alors que la réponse volumétrique est supposée uniquement élastique (pas de dépendance du temps pour les contraintes de compression, seules les contraintes de cisaillement peuvent évoluer dans le temps)

Pour déterminer la valeur du coefficient de Poisson nous partons de la loi de contrainte-déformation décrite par (Chailleux, De La Roche et al. 2010) :

$$\varepsilon^* = \frac{\sigma^*}{2G^*} + \text{tr}(\sigma^*) \left[\frac{1}{9K} - \frac{1}{6G^*} \right] I$$

Où ε^* : déformation complexe

G^* : module de cisaillement complexe (dépendant de la température et de la fréquence)

K : module de compressibilité dynamique

K exprime la réponse du matériau au changement de taille, alors que G^* exprime la réponse au changement de forme.

Dans le cas d'un test de compression cyclique, nous avons l'état de contrainte :

$$\sigma^* = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

D'où nous pouvons calculer : $\varepsilon^*_{xx} = \frac{\sigma^*_{xx}}{2G^*} + \sigma^*_{xx} \left[\frac{1}{9K} - \frac{1}{6G^*} \right] = \sigma^*_{xx} \left[\frac{1}{9K} + \frac{1}{3G^*} \right]$

$$\text{et il vient : } \mathbf{E}^* = \frac{\sigma^*_{xx}}{\varepsilon^*_{xx}} = \frac{9KG^*}{3K+G^*} \rightarrow \mathbf{G}^* = \frac{3KE^*}{9K-E^*}$$

De même, nous obtenons la déformation :

$$\varepsilon^*_{yy} = \sigma^*_{xx} \left[\frac{1}{9K} - \frac{1}{6G^*} \right]$$

Le coefficient de Poisson complexe peut ainsi être calculé :

$$\nu^* = \frac{\varepsilon_{yy}^*}{\varepsilon_{xx}^*} = \frac{1}{2} \cdot \frac{3K-2G^*}{3K+G^*}$$

Nous pouvons substituer la valeur du module de cisaillement complexe G^* dans l'équation ci-dessus et il vient après simplification :

$$\nu^* = \frac{1}{2} - \frac{E^*}{6K}$$

Dans le cas d'un matériau incompressible, le module de compressibilité dynamique K approche l'infini. Nous pouvons donc établir que :

$$\lim_{K \rightarrow \infty} \nu^* = \frac{1}{2}$$

La valeur $\nu^*=0.5$ est donc le maximum théorique que le ratio peut atteindre dans le cas d'une déformation uniaxiale infinitésimale. Un coefficient de Poisson de 0.5 correspond à un module de compressibilité infini et n'est jamais atteint dans la réalité car aucun matériau n'est totalement incompressible.

Nous pouvons également relever les relations fondamentales reliant le module complexe et le coefficient de Poisson au module de compressibilité dynamique (K) et au module de cisaillement (G^*) (hypothèse de comportement élastique linéaire isotrope) :

$$K = \frac{E^*}{3(1 - 2\nu^*)}$$

$$G^* = \frac{E^*}{2(1 + \nu^*)}$$

De plus amples considérations relatives notamment au coefficient de Poisson dans le domaine viscoélastique (« time dependant ») peuvent être trouvées dans (Tschoegl, Knauss et al. 2002).

Comme calculé ci-dessus, le coefficient de Poisson complexe ν^* est utilisé dans l'expression du module de compressibilité dynamique K et du module de cisaillement complexe G^* . Des mesures ont cependant montré que la partie imaginaire de ν^* est très faible et que le coefficient de Poisson peut par conséquent être considéré comme réel. (Di Benedetto, Partl et al. 2001) rapporte que sa valeur varie entre 0.2 et 0.5 ceci selon la température et la fréquence.

Différents auteurs se sont intéressés à déterminer le coefficient de Poisson des enrobés bitumineux. (Elias 1995) effectue des essais de sollicitation sinusoïdale en déformation imposée sur enrobé et met en évidence l'incidence de la température et de la fréquence sur le coefficient de Poisson. On peut également y relever la complexité d'une mesure fiable de ce coefficient, notamment à température élevée (41 °C) où des valeurs supérieures à 0.5 ont été obtenues. Cette problématique de la mesure du coefficient de Poisson est également mise en évidence par (Assef-Vaziri, Pigois et al. 1984).

Sur la base des différents éléments ci-dessus et en première approximation, il est choisi un coefficient de Poisson de 0.35 à 15°C, 0.40 à 40°C et 0.20 à basse température (-10°C). Ceci constitue l'hypothèse de base pour le calcul du module de rigidité selon l'essai de traction indirecte effectué ici.

5.4 Configuration de la sollicitation

L'essai de traction indirecte sur éprouvette cylindrique (IT-CY) requiert un chargement cyclique tel que défini ci-dessous. La forme de l'impulsion est discutée plus loin ; cette dernière pouvant être $\frac{1}{4}$ de sinusoïde, haversine ou de type onde de choc.

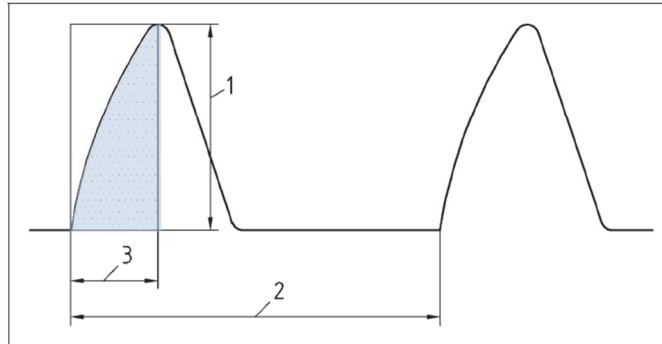


Figure 5-8 : Impulsion de chargement pour essai IT-CY selon EN 12607-26

Les éléments suivants sont également définis :

- 1: valeur de crête de la charge (amplitude du signal de chargement)
- 2: période de répétition des impulsions
- 3: temps de montée à partir de l'impulsion de chargement

La norme définit également un facteur de surface de charge k (Figure 5-8) comme le rapport entre la surface bleue et le produit du temps de montée (3) par la valeur de crête de la charge (1). Ce facteur qui permet d'évaluer le signal réel par rapport à la consigne imposée sera discuté en détail au chapitre 5.8.2.

Les critères à respecter pour la réalisation de l'essai sont les suivants :

- Temps de montée de la charge : 124 ± 4 ms
- Période de répétition des impulsions : 3.0 ± 0.1 s
- Facteur de surface de charge : 0.60 ± 0.1
- Déplacements horizontaux (Σ def) : 7 ± 2 μ m si diamètre 150 mm, 5 ± 2 μ m si diamètre 150 mm

Pour la réalisation de l'essai, il est choisi de procéder avec un asservissement en force et non pas en déplacement. Cette condition de chargement, qui est en adéquation avec la norme, permet notamment d'améliorer la sécurité vis-à-vis du matériel de mesure en particulier lors d'essais à des températures extrêmes. Un contrôle en déformation à basse température est plus difficile, car le matériau a un comportement fragile.

Conséquence de cet asservissement en force, une première phase d'essai appelée « Pre-NAT » est définie afin de déterminer itérativement la force requise pour atteindre la déformation horizontale cible. Ce test préliminaire est un choix et pas une exigence de la norme. Si nécessaire, cette phase peut être répétée étant donné que la sollicitation est très faible et reste dans le domaine linéaire élastique de comportement des enrobés. Un calcul préalable permet de limiter le nombre d'itérations.

Nous avons défini la réalisation d'un essai ainsi :

1) Pre-NAT

Réalisation de 4 séquences de chacune 3 impulsions. Pour chaque séquence, la force F est augmentée jusqu'à atteindre la déformation cible choisie. Ensuite la phase 2 est immédiatement lancée.

2) NAT

Réalisation de l'essai de traction indirecte avec la force F définie précédemment. Dans un premier temps 10 impulsions de conditionnement sont réalisées afin de permettre la bonne mise en place de l'échantillon, caler la magnitude de la charge et la durée.

Après les impulsions de conditionnement, 5 impulsions de chargement sont directement appliquées à l'éprouvette. Ces impulsions sont enregistrées et consignées pour ensuite effectuer l'analyse des données et le calcul du module sécant.

(Olard, Noël et al. 2005) relève que le nombre d'impulsions de chargement initial est un héritage des méthodes anglaises et américaines effectuées avec des presses pneumatiques ne permettant pas d'imposer la valeur de crête et le temps de montée de la charge visés dès les premières impulsions. Lors de la réalisation de l'essai, les impulsions de conditionnement semblent cependant jouer un rôle important pour la stabilisation des mesures.

Concernant l'impulsion, il est choisi ici de travailler avec un quart de sinusoïde. L'amplitude A de la sinusoïde correspond à la force F requise et la fréquence de sollicitation f est constante et définie ainsi :

$$f = \frac{1}{4 \cdot t_{\text{chargement}}} = \frac{1}{4 \cdot 0.124} = 2.016 \text{ Hz}$$

Nous pouvons relever que (Loulizi, Flintsch et al. 2006) propose un temps de chargement de 0.03 s afin de correspondre à la sollicitation induite lors des essais au Falling Weight Deflectometer (FWD).

Chaque impulsion de chargement est réalisée en 3 secondes selon la séquence suivante (voir Figure 5-8) :

Tableau 5-1 : Séquence pour l'exécution d'un cycle de chargement IT-CY

N°	Objectif	Signal	Force [kN]	Fréq. [Hz]	Durée phase[s]	Temps cumulé [s]
1	chargement	¼ sinus	De 0.2 à F	2.016	0.124	0.124
2	déchargement	rampe	De F à 0.2	-	0.124	0.248
3	repos-contact	constant	0.2	-	2.752	3

Dans la séquence définie ci-dessus une pression de contact (F_{cont}) de 0.2 kN est définie. Cette force, appliquée également au tout début de l'essai, est nécessaire afin de garantir le contact avec l'éprouvette. La pression de contact indiquée est une force absolue mesurée par la cellule de force. A basse température ou haute température, la force sur le vérin au repos est légèrement différente (environ 0.3 kN à -10 °C et environ 0.12 kN à 40°C) et la pression de contact F_{cont} sera par conséquent adaptée afin d'appliquer toujours une pression effective d'environ 0.1 kN sur l'échantillon. La différence de force sur la cellule en fonction de la température est liée au gradient de température dans la cellule de force lors de basses/hautes températures, ce qui a pour conséquence de rendre plus difficile la procédure de compensation dans le vérin.

En plus des signaux bruts, les signaux filtrés sont également enregistrés (force et déplacements). Afin d'éviter un déphasage entre les signaux filtrés, un filtre identique est appliqué sur les différents paramètres mesurés : filtre de type passe-bas Butterworth (filtre linéaire), ordre 6 (pente de l'atténuation importante), 35 Hz. La fréquence est choisie au moins 10 fois supérieure à la fréquence de sollicitation ; mais pas trop importante (< 50 Hz) pour ne pas endommager le signal. Par ailleurs, l'efficacité des filtres peut être évaluée dans le graphique FFT (transformée rapide de Fourier) disponible dans le logiciel de commande. L'analyse des données et le calcul du module sécant sont par contre effectués à partir des signaux bruts tel que décrit plus loin.

Pour le traitement des données et le calcul du module sécant, la démarche suivante est appliquée pour chaque impulsion, la moyenne des cinq impulsions de mesure étant faite à la fin (Figure 5-9) :

Soit :

- T1 : temps début d'impulsion (x s.)
- T2 : temps fin d'impulsion (x + 3 s.)
- Tp1 : temps de début de mesure du pic (x + 0.120 s.)
- Tp2 : temps de fin de mesure du pic (x + 0.128 s.)

On détermine ainsi :

1. Déformation maximale $Def_{max}(Tp)$ sur l'intervalle $Tp1 - Tp2$
2. Force maximale $F_{max}(Tp)$ au temps Tp
3. Force effective maximale au temps Tp après soustraction de la force de contact
 $F_{eff,max}(Tp) = F_{max}(Tp) - F_{cont}$

Finalement, connaissant F_{max} et la déformation diamétrale horizontale associée, le module sécant peut être calculé tel que défini au chapitre 5.3.1. Cette procédure sera discutée dans le chapitre 5.8.

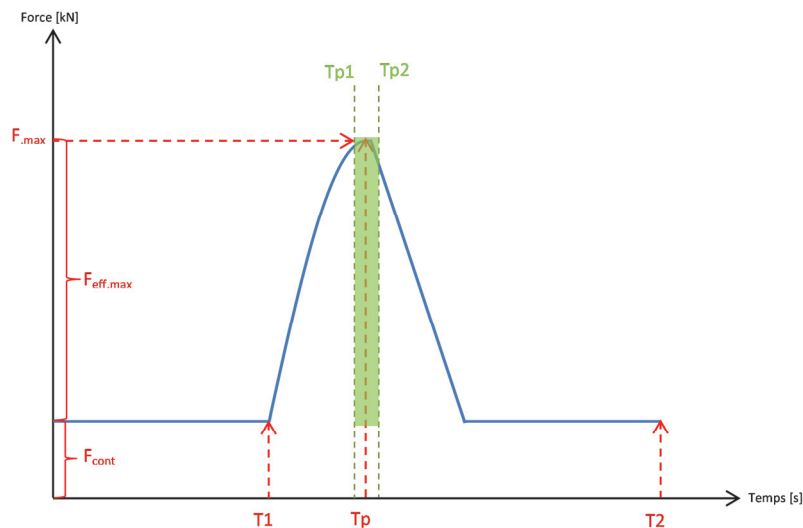


Figure 5-9 : Démarche de traitement d'un signal de mesure

La procédure détaillée et automatique de traitement des mesures est implémentée dans la fiche d'essai dont un exemple est donné dans l'Annexe A.

5.5 Préparation et conditionnement des échantillons

La préparation des échantillons se fait par compactage d'enrobé chaud à la presse à cisaillement giratoire. Les dimensions sont établies afin de respecter la normalisation. Pour cette recherche, il a été choisi de travailler à équi-compacité, avec des échantillons de diamètre $d=150$ mm et hauteur $h=75$ mm. Le choix de la hauteur est en adéquation avec l'épaisseur de la couche in-situ, tout en respectant les exigences de la normalisation. Cette épaisseur de 75 mm permet d'avoir un coefficient d'élanement h/d optimal de 0.5.

La procédure de mise en température des échantillons est primordiale. Une étude préliminaire a été effectuée avec une éprouvette témoin équipée de thermocouples. Les résultats détaillés sont disponibles en Annexe A. Le principe proposé pour le conditionnement consiste à effectuer une mise en température des échantillons dans une étuve à flux d'air. Une fois en température, les échantillons sont ensuite transférés dans l'enceinte thermique à azote (pré-conditionnée) dans laquelle les essais sont

réalisés. Sur la base de cette analyse spécifique et de (Assef-Vaziri, Pigois et al. 1984), les exigences suivantes sont fixées :

Durée de mise en température (-10 °C ... 40 °C)	min 6 heures
Durée pour transfert entre étuves	max 1 minute
Durée pour mise en température enceinte azote	min 75 minutes
Temps de stabilisation dans enceinte azote avant essai	min 20 minutes

Notons encore que ces valeurs respectent les exigences de la norme qui recommande un temps de conditionnement de minimum 4 h.

5.6 Calibration et vérification de la chaîne de mesure

La procédure de calibration et vérification de la chaîne de mesure (précision, répétabilité) s'effectue avec un anneau de calibration en acier dont le module d'élasticité est connu. Les mesures avec l'anneau permettent en tout temps de vérifier le bon fonctionnement de la chaîne de mesure. Elles sont régulièrement effectuées en début et en fin de séries d'essais.

5.6.1 Anneau de calibration

Les caractéristiques de l'anneau de calibration sont les suivantes (selon emails Cooper, 2011) :

- Matériau : acier
- Largeur : 20 mm
- Diamètre de l'anneau : 150 mm
- Epaisseur (hauteur) de l'anneau : 50 mm
- Coefficient de Poisson : 0.35

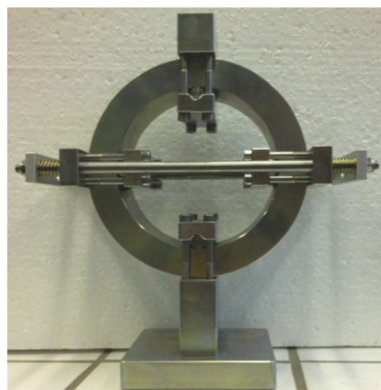


Figure 5-10 : Anneau de calibration en acier

Selon le fournisseur de l'anneau, les modules d'élasticité obtenus doivent se situer entre 2200 et 2400 MPa lorsque la déformation cible de 7 μm est visée avec un temps de pic de 124 ms. Cet anneau correspond donc bien aux exigences de la norme qui font mention d'un module d'élasticité de l'anneau de calibration entre 1500 et 3000 MPa.

5.6.2 Calibration du système

Les mesures sont effectuées à température ambiante (environ 23 °C). Dans une première phase, différentes mesures ont été faites avec l'anneau de calibration en effectuant un balayage dans la charge appliquée. Les résultats sont indiqués dans le Tableau 5-2, tableau dans lequel les valeurs ne respectant pas les seuils selon la norme EN 12697-26 sont indiquées en rouge. Nous pouvons observer :

- Comme attendu, la déformation mesurée perpendiculairement au sens d'application de la charge augmente avec l'accroissement de force verticale.
- Le facteur de surface de charge augmente également avec l'augmentation de la force appliquée.
- La valeur moyenne de module sécant mesuré, respectivement ajusté est de 2340 MPa respectivement 2240 MPa. Ces valeurs se trouvent dans le domaine prévu (2200-2400 MPa).
- Afin d'évaluer la dispersion des mesures, l'écart-type (σ) est calculé pour une population de n mesures où x_i représente la $i^{\text{ème}}$ mesure et \bar{x} la moyenne arithmétique des n mesures :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

- L'écart-type est faible et il traduit bien la dispersion réduite sur les mesures de module sécant. Les mesures effectuées avec l'anneau de calibration confirment le bon fonctionnement de la chaîne de mesure.
- Le coefficient de variation (CV), permettant de mesurer la dispersion relative, est également calculé. Ce coefficient de variation adimensionnel correspond à l'écart-type, exprimé en pourcentage de la valeur moyenne :

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}}$$

- Le coefficient de variation est là-aussi très bon. D'autres mesures effectuées sur un anneau d'acier mais avec une charge constante aboutissent à un coefficient de variation de 0.74% ce qui est proche du CV obtenu pour le module ajusté (Sandoval et Thenoux 2011). Une tolérance de 2% est généralement acceptée selon le fabricant.

Tableau 5-2 : Mesures à charge variable avec anneau de calibration

F _{vert} [kN]	Dépl. [μm]	Facteur de surface de charge [%]	Module mesuré S _m [Mpa]	Module ajusté S _m ' [Mpa]
1.22	6.28	48%	2414	2273
1.59	8.30	51%	2362	2250
1.60	8.50	48%	2352	2208
1.68	8.89	52%	2344	2250
1.81	9.56	53%	2345	2260
2.07	11.10	54%	2314	2245
2.47	13.20	54%	2317	2242
2.75	14.90	55%	2284	2227

Moyenne [MPa]	2342	2244
Ecart-Type [MPa]	39	20
CV [%]	1.7%	0.9%

La Figure 5-11 représente le module sécant mesuré en fonction de la déformation appliquée. La zone verte correspond au domaine de déformation 5 – 9 μm recommandé selon la norme. Nous pouvons observer que le module sécant mesuré diminue avec l'augmentation de la déformation (i.e. charge) appliquée. Les mesures sont par ailleurs stables, la différence entre le module sécant S_{m,min} et S_{m,max} étant de 130 MPa, ce qui représente 6% de la valeur moyenne S_{m,moy}. Cette tendance de diminution du module de rigidité avec l'augmentation de la déformation (tout en restant dans le domaine théorique de linéarité) est également observée sur les échantillons d'enrobés (voir mesures 40 °C ou (Sugair et Almudaihem 1992)). D'un point de vue expérimental, nous pouvons relever que pour rester dans le domaine de déformations 5 – 9 μm, la force verticale doit être inférieure à 1.7 MPa.

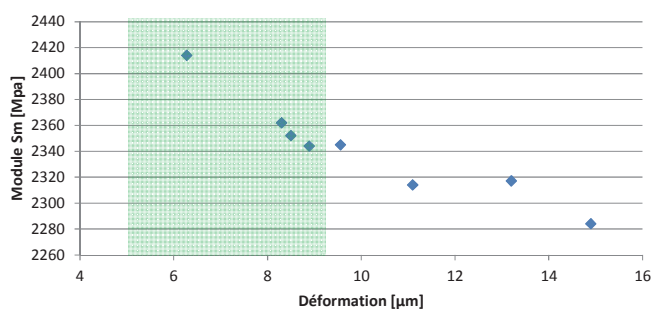


Figure 5-11 : Module sécant S_m mesuré sur l'anneau d'acier

La répétabilité de la mesure a également été évaluée pour deux niveaux de déformations. Les premières mesures sont effectuées pour une force d'environ 1.7 MPa et des déformations à la limite supérieure des exigences, ce qui permet d'avoir un facteur de charge satisfaisant. Dans ce cas de figure, le coefficient de variation est très faible (0.3%). Ces résultats permettent d'associer la variabilité obtenue sur des mesures avec enrobé aux échantillons testés et non pas à la méthode d'essai.

Les secondes mesures (Tableau 5-4) sont quant à elles effectuées avec une déformation plus faible et un facteur de charge inférieur à la limite de 50%. Nous observons comme précédemment une augmentation du module sécant mesuré avec la diminution de la charge. Dans les deux cas de figure la répétabilité est satisfaisante; la mesure étant par ailleurs plus stable lorsque le facteur de surface de charge respecte les exigences.

Tableau 5-3 : Répétabilité pour déformation d'environ 9 μm (anneau d'acier)

F_{vert} [kN]	Dépl. [μm]	Facteur de surface de charge [%]	Module mesuré S_m [Mpa]	Module ajusté S_m' [Mpa]
1.68	8.89	52	2344	2250
1.67	8.90	54	2326	2252
1.69	9.00	53	2336	2254
1.69	9.00	54	2336	2267

Moyenne [MPa]	2336	2256
Ecart-Type [MPa]	7	8
CV [%]	0.3%	0.3%

Tableau 5-4 : Répétabilité pour déformation d'environ 6.2 - 6.8 μm (anneau d'acier)

F_{vert} [kN]	Dépl. [μm]	Facteur de surface de charge [%]	Module mesuré S_m [Mpa]	Module ajusté S_m' [Mpa]
1.28	6.80	40	2356	2117
1.27	6.40	43	2466	2254
1.22	6.19	48	2435	2293
1.22	6.28	48	2414	2273

Moyenne [MPa]	2418	2234
Ecart-Type [MPa]	46	80
CV [%]	1.9%	3.6%

5.7 Premiers essais exploratoires sur enrobé

5.7.1 Type de mélange

Les premiers essais exploratoires sur enrobé sont réalisés sur un enrobé AC 4 L (diamètre maximal des grains de 4 mm) au liant 70/100, fabriqué en centrale d'enrobage. La teneur en liant sur enrobé est de 7.45% (8.05% sur granulats) et le module de richesse M_r de 4.4. La teneur en vides hydrostatique moyenne des différents échantillons est de 1.7%. Un enrobé de courbe granulométrique continue, avec un grain fin est choisi pour favoriser une bonne homogénéité des échantillons. Il présente moins de discontinuités qu'un enrobé de type AC T 22 et permet de faire des premières mesures tout en limitant les incertitudes relatives à l'enrobé et à la confection des éprouvettes.

8 éprouvettes PCG de diamètre 150 mm et hauteur 75 mm ont été confectionnées. La hauteur de l'éprouvette peut être choisie entre 30 et 75 mm, un minimum de 2.5 fois le diamètre maximal des grains étant à respecter. En règle générale, une hauteur comparable à celle de la couche qui sera mise en place est recommandée.

La moitié des éprouvettes ont été équipées de pastilles (scotch aluminium) pour le contact avec les capteurs LVDT, alors que pour l'autre moitié les capteurs sont directement appliqués sur l'éprouvette. L'épaisseur des pastilles est de 0.05 mm. L'utilisation de pastilles permet de garantir un contact franc entre l'éprouvette et le capteur.

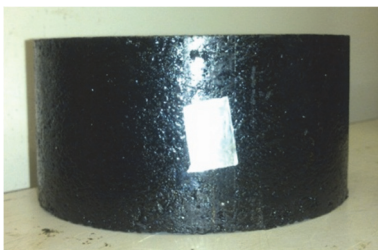


Figure 5-12 : Echantillon PCG avec pastille (hauteur 75 mm, diamètre 150 mm)

5.7.2 Discussion des résultats

Essais à 15 °C

Pour les essais à 15 °C, les différents échantillons ont été mis en température durant 17-20 heures dans une enceinte à air thermo-réglée.

La réalisation de l'essai se fait selon la procédure détaillée en Annexe A. Pour la mise en place, l'échantillon est tout d'abord installé dans l'enceinte sur le bâti NAT (15 °C) puis les capteurs LVDT installés. Cette procédure nécessite environ 1mn45 – 2mn (dont 15 s. hors étuve). Une fois l'échantillon installé, un temps de stabilisation de 30 mn est respecté puis l'essai sur le premier diamètre (0°) est réalisé. Ensuite, une rotation de 90° est appliquée à l'échantillon et les capteurs repositionnés (durée environ 1mn30 pour le changement). Un temps de stabilisation de 30 mn est à nouveau respecté avant réalisation de l'essai sur le second diamètre perpendiculaire au premier.

Dans un premier temps, la répétabilité de la mesure est évaluée par comparaison des mesures de module sécant sur les échantillons confectionnés. Pour cela, deux mesures distinctes (contact avec éprouvette refait entre chaque mesure) ont été réalisées pour chacun des diamètres (0° et 90°) des différents échantillons. Les résultats sont indiqués dans le Tableau 5-5. Dans ce tableau, la valeur moyenne des deltas est calculée sur la base des valeurs absolues.

De manière générale, la répétabilité de la mesure est bonne avec une différence moyenne de 1.4% entre deux mesures selon le même diamètre ; ce qui correspond à environ 50 MPa à cette température d'essai. Le module sécant mesuré est en général plus élevé lors de la première mesure que lors de la seconde mesure.

Des différences entre les échantillons ainsi que entre les mesures avec/ sans pastilles sont également relevées. Ces différences sont inhérentes à la confection des échantillons et non pas relatives à la chaîne de mesure. Elles seront évaluées par la suite, de même que l'effet des pastilles.

Tableau 5-5 : Répétabilité de la mesure à 15 °C (P=Pastille)

Echantillon		Diamètre	Module sécant mesuré S_m [MPa] à 15 °C			
			Mes. 1	Mes. 2	Δ [%]	Δ [MPa]
Sans pastille de contact	1	0°	3809	3811	-0.1%	2
		90°	3813	3789	0.6%	-24
	3	0°	2962	2912	1.7%	-50
		90°	2744	2779	-1.3%	35
	5	0°	3167	3091	2.4%	-76
		90°	3021	2966	1.8%	-55
7	0°	3970	3896	1.9%	-74	
	90°	3951	3851	2.5%	-100	
Avec pastille de contact	2P	0°	3818	3729	2.3%	-89
		90°	3672	3638	0.9%	-34
	4P	0°	3498	3461	1.1%	-37
		90°	3352	3392	-1.2%	40
	6P	0°	3440	3410	0.9%	-30
		90°	3575	3625	-1.4%	50
	8P	0°	3655	3623	0.9%	-32
		90°	3922	3862	1.5%	-60
	5P	0°	3387	3351	1.1%	-36
		90°	3278	3217	1.9%	-61
Moyenne (abs)				1.4%	49	

L'analyse du module sécant à 15 °C calculé pour les différents échantillons est proposée dans le Tableau 5-6. Pour cette analyse, la première mesure effectuée selon les différents axes a été prise en considération. Les valeurs de facteur de surface de charge ne respectant pas les exigences de la norme (0.6 ± 0.1) sont indiquées en rouge.

Tableau 5-6 : Résultats essais sur enrobé AC 4 L à 15 °C (P=Pastille)

Echan.	Dépl.		Facteur f		Module sécant mesuré S_m				Module sécant ajusté S_m'			
	0° [μm]	90° [μm]	0° [%]	90° [%]	0° [MPa]	90° [MPa]	Δ [%]	Moy [Mpa]	0° [MPa]	90° [MPa]	Δ [%]	Moy [Mpa]
1	6.9	6.9	54%	54%	3809	3813	0%	3811	3674	3679	0%	3677
3	7.0	7.5	53%	53%	2962	2744	-7%	2853	2846	2646	-7%	2746
5	7.2	7.6	52%	51%	3167	3021	-5%	3094	3037	2881	-5%	2959
7	6.6	6.7	52%	51%	3970	3951	0%	3961	3786	3755	-1%	3771
2P	6.9	7.2	50%	49%	3818	3672	-4%	3745	3596	3445	-4%	3521
4P	7.8	8.4	49%	48%	3498	3352	-4%	3425	3277	3125	-5%	3201
6P	8.1	7.7	49%	49%	3440	3575	4%	3508	3231	3354	4%	3292
8P	7.8	7.6	48%	49%	3655	3922	7%	3788	3408	3670	8%	3539
5P	7.8	8.1	49%	49%	3387	3278	-3%	3333	3183	3090	-3%	3136

Moyenne (tout)	3502	3316
Moyenne (sans past.)	3430	3288
Moyenne (past.)	3560	3338

Ecart-type (tout)	366	CV=10%	341
Ecart-type (sans past.)	539	CV=16%	512
Ecart-type (past.)	199	CV=6%	184

Nous pouvons constater :

- L'ordre de grandeur de module sécant semble réaliste compte tenu de la température (15 °C) et de la fréquence (2 Hz) d'essai.
- Pour les différents résultats, l'incertitude sur la confection des éprouvettes est à prendre en considération, car elle est plus importante que dans le cas d'un anneau en acier. L'utilisation d'un mélange de granulométrie fine permet à priori de limiter cette incertitude.
- Des différences sont observées entre certains échantillons. En particulier, les échantillons 3 et 5 ont un module sécant significativement plus faible que les autres échantillons 1 et 7 sans pastille.
- La mesure selon le second axe (90°) est souvent plus faible que celle selon le premier axe (0°). Cette tendance, déjà observée lors des essais de calibration avec l'anneau d'acier, sera également discutée plus loin.
- Les essais avec pastille fournissent une valeur de module (mesuré ou ajusté) supérieure aux essais sans pastille. La différence est de l'ordre de 50-150 MPa (<5%). Ceci est confirmé par la mesure 5P qui est d'environ 240 MPa supérieure à la mesure 5 effectuée sans pastille.
- La différence entre deux diamètres de mesure d'une même éprouvette est faible (max 8%) et respecte bien les exigences. Les essais avec pastille semblent plus stables et avoir une meilleure répétabilité. Leur écart-type calculé est 2.7 fois inférieur (199 MPa) à celui des essais sans pastille (539 MPa). La pastille présente l'avantage de proposer une surface de contact franche et homogène, ce qui n'est pas nécessairement le cas sans pastille où la pointe du capteur peut être en contact avec du mastic ou un granulats. Ceci n'est pas sans incidence sur les mesures, en particulier pour un mélange avec module de richesse élevé ($M_r=4.4$) et à haute température où la composante visqueuse est importante.
- Les coefficients de variation se situent entre 6% et 16%. Ceci est comparable à (Sandoval et Thenoux 2011) qui obtient des coefficients de variation allant de 7% à 19% (échantillons Marshall) et (Sugair et Almudaihem 1992) qui mesure un CV entre 7% et 16% selon la charge

et la teneur en liant. Le même auteur propose de considérer un CV entre 10% et 20% dans le cadre de la pratique. Cette variabilité est liée aux éprouvettes et non à la méthode d'essai.

- Le module sécant de l'enrobé AC 4 L à 15 °C, 2 Hz est certainement à la limite inférieure en ce qui concerne le facteur de surface de charge. Ceci serait à analyser avec davantage de mélanges afin d'en déduire un module minimal garantissant un facteur de surface de charge suffisant selon le type d'enrobé. Le facteur de surface de charge est par ailleurs discuté dans la section 5.8.
- Une analyse complète de l'effet des pastilles pourrait être recommandée, ainsi que des essais comparatifs avec des modules complexes sur éprouvettes trapézoïdales. Sur la base des premiers résultats et de l'effet bénéfique des pastilles sur l'écart-type de la mesure, l'utilisation de pastilles en particulier dans le cas d'enrobés à gros grains est conseillée.

Le facteur de surface de charge est très souvent à la limite de la valeur admissible. On remarque cependant que le facteur est toujours légèrement plus élevé lors d'essais sans pastille ce qui est à priori surprenant. Comme discuté plus loin, le facteur de surface de charge est principalement fonction de la machine d'essai.

Afin d'augmenter le facteur de surface de charge, une démarche analogue à celle effectuée sur l'anneau de calibration pourrait être effectuée, démarche qui consiste à augmenter la déformation, tout en restant dans le domaine de comportement linéaire des enrobés. Nous pouvons encore mentionner que des données relatives à l'écart-type dans le cas d'un essai deux points sur éprouvettes trapézoïdales (2PB-TR) sont discutées dans (Corté, Gourdon et al. 2001). Selon cet article, pour un enrobé de module complexe élevé 15'000 Mpa (15 °C, 10 Hz), l'écart-type de répétabilité obtenu est d'environ 120 MPa. Le coefficient de variation est donc de 0.8%. L'essai IT-CY semble donc, comme attendu, être moins précis que l'essai sur éprouvette trapézoïdale pour ce qui est de la répétabilité. Cependant l'écart-type obtenu lors de ces premiers essais ainsi que le coefficient de variation sont proches des valeurs obtenues par d'autres auteurs.

Essais à -10 °C

Une campagne réduite d'essais à -10 °C a également été menée. Le calcul des modules sécants proposé dans le Tableau 5-7 est effectué avec l'hypothèse d'un coefficient de Poisson de 0.25. Les résultats sur deux échantillons aboutissent à un module sécant S_m moyen de 18'460 MPa. La force nécessaire pour atteindre la déformation cible est ici sensiblement plus importante puisque environ 17 kN sont appliqués, alors qu'environ 3.5 kN sont nécessaires à 15 °C et moins de 1 kN à 40 °C. Les forces appliquées dépendent du type d'enrobé, mais l'ordre de grandeur est réaliste. L'application d'une force élevée à basse température permet d'augmenter sensiblement le facteur de surface de charge puisque ce dernier est de 57%. Les essais à basse température mettent également en évidence l'importance d'une bonne confection des éprouvettes. Par exemple, des éprouvettes dont les génératrices ne sont pas parfaites (démoulage précoce) auront pour conséquence une répartition inégale de la charge par les barreaux de chargement. Ce type de défaut structurel est rédhibitoire lors d'essais à basse température et se traduit par de grandes différences entre les diamètres de mesure.

Une analyse de répétabilité effectuée sur ces deux éprouvettes a donné un delta moyen de 56 MPa (0.3%). La répétabilité de la chaîne de mesure à basse température semble également satisfaisante.

Tableau 5-7 : Résultats essais sur enrobé AC 4 L à -10 °C

Echan.	Dépl.		Facteur f		Module sécant mesuré S_m				Module sécant ajusté S_m'			
	0° [μm]	90° [μm]	0° [%]	90° [%]	0° [MPa]	90° [MPa]	Δ [%]	Moy [Mpa]	0° [MPa]	90° [MPa]	Δ [%]	Moy [Mpa]
2P	6.3	6.2	57%	57%	17592	18204	3%	17898	17208	17763	3%	17486
4P	6.2	6.2	57%	57%	19089	18958	-1%	19023	18638	18480	-1%	18559

Nous pouvons donc observer que la chaîne de mesure ainsi que la méthodologie fonctionnent également à basse température, mais une attention toute particulière doit être portée à la confection ainsi que la mise en place de l'échantillon. En particulier aux basses températures, la moindre excentricité de charge se traduit immédiatement par une mesure erronée.

Essais à 40°C

Des essais ont également été exécutés à la température de 40 °C. Le module complexe à haute température n'est pas utilisé dans le cadre d'un calcul de dimensionnement, mais il permet de donner une idée sur la sensibilité à l'orniérage du produit. Par exemple, un mélange dont le module chute fortement à 40 °C indique une sensibilité accrue aux déformations permanentes.

Le Tableau 5-8 donne les résultats de l'analyse de répétabilité pour quatre échantillons avec pastille. Pour le calcul du module sécant, un coefficient de Poisson de 0.4 a été considéré. A l'exception de l'échantillon 3P pour lequel des différences de 9% environ ont été obtenues entre les deux mesures d'un même axe, les différents résultats sont très proches. Le delta moyen est de 19 MPa (en valeur absolue) ce qui correspond à 3.9%. La répétabilité est donc satisfaisante, même si le delta en pourcent est 2.8 fois plus élevé que celui calculé à 15 °C.

Tableau 5-8 : Répétabilité de la mesure à 40°C

Echantillon	Diamètre	Module sécant mesuré S_m [MPa]			
		Mes. 1	Mes. 2	Δ[%]	Δ[MPa]
1P	0°	573	565	1.4%	-8
	90°	601	581	3.3%	-20
3P	0°	473	430	9.1%	-43
	90°	434	472	-8.8%	38
5P	0°	426	425	0.2%	-1
	90°	411	429	-4.4%	18
7P	0°	630	616	2.2%	-14
	90°	522	530	-1.5%	8
Moyenne				3.9%	19

Le module sécant des différents échantillons a ensuite été calculé. Les résultats sont consignés dans le Tableau 5-9.

- La charge appliquée afin de rester dans le domaine de déformation stipulé dans la norme est très faible. Une force verticale effective de 0.3 – 0.4 kN est suffisante.
- En raison de la charge réduite, le facteur de surface de charge chute et se trouve relativement éloigné de la valeur seuil de 50%. Ceci est lié à la machine d'essai.

- Les éprouvettes 3P et 5P ont un module sécant sensiblement inférieur à celui des deux autres éprouvettes (1P et 7P). Cette tendance avait également été mesurée à 15 °C (mesure sans pastille). Des essais avec l'anneau de calibration en acier étant régulièrement effectués et les tendances étant similaires à 40 °C et 15 °C, nous pouvons en déduire que les différences observées dans les modules sécants sont propres aux matériaux et à la confection des éprouvettes (démoulage, historique thermique,...). Les éprouvettes testées sont les mêmes que à 15 °C.
- Après comparaison avec des produits de la base de données du Lavoc, la valeur moyenne de module sécant obtenue semble plausible.
- L'écart-type calculé est de 85 Mpa (17%) ce qui est environ trois fois supérieur à l'écart-type calculé à 15 °C (6%). Ceci corrobore les résultats obtenus avec les mesures de répétabilité.

Tableau 5-9 : Résultats essais sur enrobé AC 4 L à 40 °C

Echan.	Dépl.		Facteur f		Module sécant mesuré S_m				Module sécant ajusté S_m'			
	0° [μm]	90° [μm]	0° [%]	90° [%]	0° [MPa]	90° [MPa]	Δ [%]	Moy [Mpa]	0° [MPa]	90° [MPa]	Δ [%]	Moy [Mpa]
1P	5.7	5.2	31%	31%	573	601	5%	587	523	546	4%	535
3P	5.6	6.2	25%	24%	473	434	-8%	453	427	392	-8%	410
5P	6.6	6.7	27%	28%	426	411	-4%	419	389	377	-3%	383
7P	5.0	6.4	30%	31%	630	522	-17%	576	570	478	-16%	524

Moyenne	509		463
Ecart-Type	85	CV=17%	78

Comme mentionné précédemment, la force permettant de respecter le critère de déformation selon la norme est faible (< 1 kN), ce qui n'est pas sans conséquences sur le facteur de surface de charge. Le tableau ci-dessous illustre l'effet d'une augmentation de la force verticale sur le facteur de surface de charge, qui augmente également. Les exigences en termes de déformation perpendiculairement à la charge ne sont alors plus respectées. Conformément aux calculs effectués dans la section 5.3.4, la déformation maximale garantissant le respect du domaine de linéarité est de 15 μm. Les mesures 1P et 7P sont donc à la limite. Dans le cas des mesures 3P et 5P, la déformation est de $0.024/150=160 \cdot 10^{-6}$ m/m. Cette valeur est supérieure à la valeur limite du domaine de linéarité et un comportement non linéaire (apparition de déformations permanentes) peut alors être atteint. Ces mesures doivent donc être considérées avec précautions.

Tableau 5-10 : Résultats essais sur enrobé AC 4 L à 40 °C - Déformations élevées

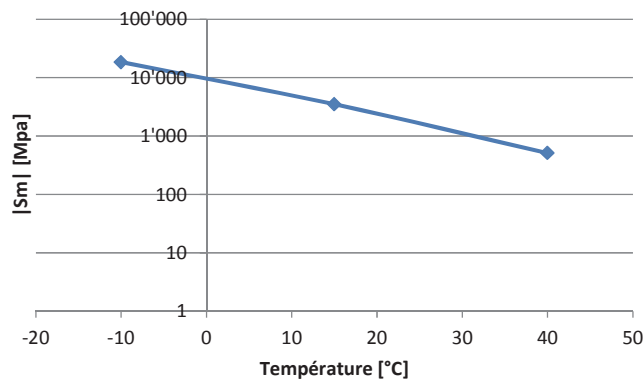
Echan.	Dépl.		Facteur f		Module sécant mesuré S_m				Module sécant ajusté S_m'			
	0° [μm]	90° [μm]	0° [%]	90° [%]	0° [MPa]	90° [MPa]	Δ [%]	Moy [Mpa]	0° [MPa]	90° [MPa]	Δ [%]	Moy [Mpa]
1P	17.9	19.0	44%	46%	463	425	-8%	444	442	410	-7%	426
3P	24.0	23.8	44%	44%	322	330	2%	326	310	318	3%	314
5P	23.9	24.0	43%	45%	328	328	0%	328	315	317	1%	316
7P	16.6	18.2	43%	45%	491	433	-12%	462	467	416	-11%	442

Moyenne	390	375
Ecart-Type	73	69

CV=18%

Au vu de la richesse du mastic, il semble que 40 °C soit la température limite (voire trop élevée) pour réaliser des essais avec ce type de mélange. Une température de 25-30 °C est à préférer afin d'améliorer la fiabilité de la mesure et éviter l'apparition de déformations permanentes.

Les résultats de ces premiers essais sur enrobé AC 4 L permettent de tracer les premiers points d'une courbe isochrone à la fréquence de 2 Hz. La pente de la courbe isochrone permet notamment d'évaluer la susceptibilité thermique de l'enrobé à une fréquence donnée.

**Figure 5-13 : Isochrone du module sécant mesuré sur AC 4 L (Fréq. 2 Hz)**

5.8 Analyses spécifiques

Au vu des premiers résultats sur enrobés et de l'expérience acquise avec l'application de l'essai, une analyse spécifique de différents paramètres clés est menée.

5.8.1 Analyse des pics

Comme indiqué initialement, les signaux filtrés (filtre passe-bas 35 Hz) et les signaux bruts sont enregistrés pour la force et les déplacements.

L'analyse est effectuée dans un premier temps sur l'anneau d'acier (cas purement élastique) afin d'éviter tout biais relatif à l'éprouvette testée. La Figure 5-14 représente les signaux filtrés et bruts pour le premier pic d'une mesure effectuée avec l'anneau d'acier. L'impulsion de chargement est donnée après 32 s. Selon la procédure d'essai, le pic de déformation doit alors être enregistré après 124 ± 4 ms, zone qui est grisée dans la figure. En raison du décalage entre le signal filtré et le signal brut, il est choisi de considérer la valeur maximale du signal brut dans l'intervalle 124 ± 4 ms. En effet, une mesure sur le

signal filtré donnerait des valeurs erronées (trop faible en raison du décalage dû au filtre) ou alors nécessiterait une nouvelle définition de l'intervalle de temps entre l'impulsion de chargement et le pic.

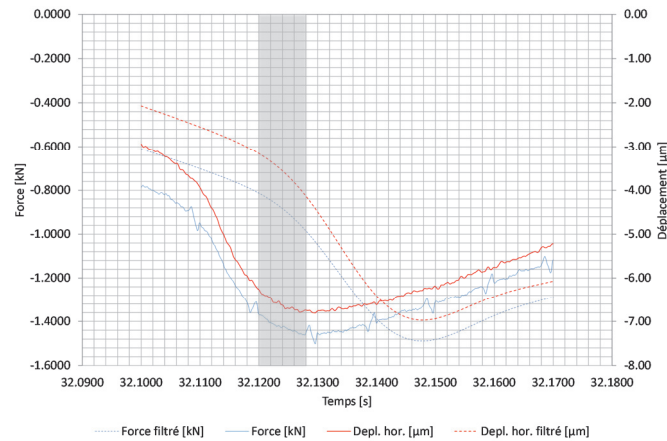


Figure 5-14 : Identification des signaux bruts et filtrés (anneau acier)

L'erreur effectuée lors de la lecture de la valeur maximale dans l'intervalle 124 ± 4 ms après l'impulsion est calculée en comparant ces valeurs avec la valeur maximale absolue enregistrée pour l'entier du pic (signal brut). Les résultats sont consignés dans le Tableau 5-11 dans lequel nous utilisons les notations suivantes (notations conservées pour la suite de la section) :

- T_{124} : Temps [s] où la valeur maximale de déplacement/force est mesurée, sur l'intervalle 124 ± 4 ms après l'impulsion de chargement.
- T_{abs} : Temps [s] où la valeur maximale de déplacement/force est mesurée sur l'entier d'un pic donné (jusqu'à 3.0 s après l'impulsion).

Le déplacement horizontal maximal est tout d'abord identifié (T_{124}). Cette valeur peut être comparée à la valeur maximale de déplacement enregistrée sur l'entier du pic (T_{abs}). La différence entre les deux valeurs est alors inférieure à 0.1 microns, ce qui est inférieur à la précision garantie par les capteurs LVDT. La différence moyenne sur la mesure de déplacement s'élève à 0.06%, ce qui est négligeable. La mesure du pic sur l'intervalle 124 ± 4 ms après l'impulsion offre donc une précision suffisante.

La force maximale est déterminée dans une seconde étape ; la procédure d'essai imposant des limites en termes de déplacements. Trois possibilités existent pour la détermination de la force maximale :

- Détermination de la force maximale simultanément au temps T_{124} pour lequel le déplacement mesuré est le plus grand. Ce temps est appelé ici $T_{124,dép}$ (« Force correspondant au déplacement maximal sur T_{124} »).
- Détermination de la force maximale sur l'intervalle T_{124} , indépendamment du temps $T_{124,dép}$ auquel la déformation maximale a été enregistrée.
- Détermination de la force maximale sur T_{abs} . Cette option n'est à priori pas conforme à la procédure d'essai, mais elle permet d'évaluer la position réelle du pic de force.

Nous pouvons observer que la différence entre le pic de force imposé par le déplacement maximal ($T_{124,dép}$) et le pic de force sur l'intervalle T_{124} est très faible. La différence moyenne est de 7 N, ce qui dans ce cas représente 0.5% de la force appliquée. Nous pouvons donc en déduire que, dans l'intervalle de 124 ± 4 ms après l'impulsion, la mesure du pic de force au même temps que celui auquel le pic de déplacement est mesuré ne fait pas apparaître de différence majeure en terme de force maximale. La différence entre la mesure du pic de force sur T_{124} et la mesure du pic de force sur T_{abs} a également été calculée. On peut observer que l'erreur est légèrement plus importante en ce qui concerne la force, la

différence moyenne étant de 3.1%. Ces différences sont cependant acceptables au vu de l'essai et leur incidence sur la valeur de module sécant calculé par la suite est inférieure à l'écart-type de l'essai.

Tableau 5-11 : Comparaison entre maximum sur 124 ±4 ms après impulsion et maximum absolu des pics de déplacement et de force (anneau acier)

	Pic N°1	Pic N°2	Pic N°3	Pic N°4	Pic N°5
Déplacement hor. max sur T ₁₂₄ [μm]	6.8	6.9	6.8	6.9	7.0
Déplacement hor. max sur T _{abs} [μm]	6.8	6.9	6.8	6.9	7.0
Différence dépl. T ₁₂₄ vs T _{abs} [μm]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Différence dépl. T ₁₂₄ vs T _{abs} [%]	0.2%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%
Force max selon dépl. max sur T _{124,dép} [N]	1456	1483	1472	1471	1472
Force max sur T _{abs} [N]	1501	1525	1510	1525	1524
Force max sur T ₁₂₄ [N]	1462	1484	1472	1484	1485
Différence force T _{124,dép} vs T _{abs} [N]	-45	-42	-38	-54	-51
Différence force T _{124,dép} vs T _{abs} [%]	-3.1%	-2.8%	-2.6%	-3.7%	-3.5%
Différence force T ₁₂₄ vs T _{124,dép} [N]	-6	-1	0	-14	-13
Différence force T ₁₂₄ vs T _{124,dép} [%]	-0.4%	-0.1%	0.0%	-0.9%	-0.9%

Suite à cette première analyse, une démarche similaire est effectuée sur les échantillons en enrobé bitumineux afin d'étudier les différents pics. Dans un premier temps, l'effet de la composante visqueuse (partie imaginaire du module complexe) peut être observé dans la Figure 5-15 représentant le déplacement horizontal mesuré pour différentes températures d'échantillon (température d'essai). Le déplacement mesuré avec l'anneau d'acier est également représenté afin de différencier les comportements des matériaux. Abstraction faite de l'amplitude des pics de déplacement (dépendant de la force appliquée), le signal illustre bien l'augmentation de la composante viscoélastique avec l'augmentation de la température, ceci étant traduit par les déplacements résiduels mesurés lors de la période de repos suite au pic de déplacement (ou déformation). A basse température (-10°C), la composante visqueuse est très faible et c'est alors la partie réelle du module complexe qui devient prépondérante. Dans ce cas, le comportement est proche de celui de l'anneau d'acier (comportement purement élastique). A température intermédiaire, l'effet de la viscosité est visible et le déplacement résiduel est de l'ordre de 0.5 μm. Cet effet est encore plus marqué à haute température (40 °C). Etant donné le matériau et son module de richesse très élevé, le comportement viscoélastique est ici particulièrement marqué. Ce phénomène sera plus faible par exemple dans le cas d'enrobés à gros grains pour couches de base. Les tendances mesurées semblent donc consistantes.

Lors de la réalisation de l'essai, une mise à zéro des capteurs de déformation est effectuée avant chaque impulsion de chargement. Ceci évite à la mesure d'être affectée par la composante viscoélastique résiduelle et garanti une bonne répétabilité des pics de déformation enregistrés. Nous pouvons finalement observer qu'à température intermédiaire et haute température, un temps de repos supérieur à 2.752 s. serait nécessaire afin de laisser au matériau le temps de retrouver son état initial.

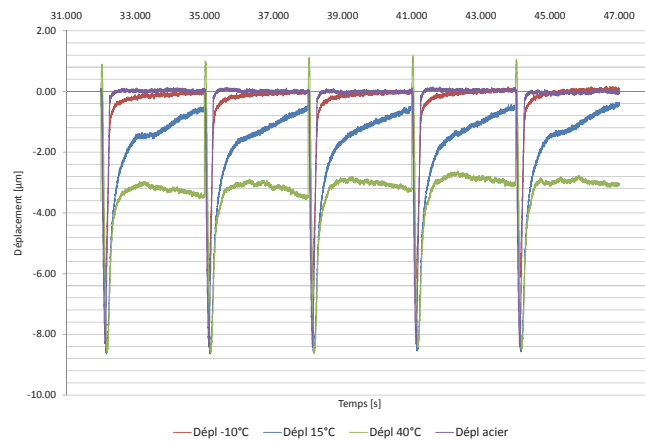


Figure 5-15 : Déplacements mesurés sur enrobé AC 4 L (différentes températures) ainsi que sur l’anneau d’acier

Une analyse similaire à celle effectuée précédemment pour l’anneau d’acier peut être conduite afin d’évaluer la différence entre une mesure de déplacement maximal dans l’intervalle 124 ± 4 ms (T_{124}) et sur l’ensemble du pic (T_{abs}), ceci en fonction de la température d’essai. Les résultats (Tableau 5-12) indiquent une différence négligeable (inférieure à la précision des capteurs) à basse température, la composante viscoélastique étant très faible. Ceci illustre le bon fonctionnement et la précision du système de mesure à basse température où le comportement est assimilable à celui de l’anneau en acier. La différence entre le pic dans l’intervalle T_{124} et le pic de déplacement sur l’ensemble du signal (T_{abs}) est comme attendu croissante avec l’augmentation de la température. Cette différence approche les 30% à 40 °C.

Une procédure analogue est conduite pour l’analyse du pic de force. Le Tableau 5-12 répertorie la force maximale simultanément au pic de déplacement ($T_{124,dép}$) ainsi que la force maximale sur l’entier du pic (T_{abs}). Il apparaît que la différence entre ces deux forces est très faible, ceci spécifiquement à basse température (différence moyenne de 0.1%) et température intermédiaire (différence moyenne de 0.2%). A 40 °C, la différence moyenne entre le pic absolu et le pic à $T_{124,dép}$ est plus importante (moyenne 8.1%). Ces résultats illustrent le bon fonctionnement du vérin de sollicitation à basse température et à température intermédiaire. Dans ce cas, la force réelle appliquée suit bien la consigne qui impose un pic de force à 124 ms (essai contrôlé en force et non pas en déformation). Par contre, à haute température, on peut observer que la presse a plus de difficultés à suivre la consigne imposée. Cette différence n’est pas directement liée à la température d’essai, mais à la force appliquée sur l’échantillon. La machine d’essai a en effet plus de difficultés à appliquer strictement la consigne dans le cas de faibles forces (i.e. hautes températures). Ceci n’est pas sans effet sur le facteur de surface de charge (voir section 5.8.2).

Tableau 5-12 : Comparaison entre maximum sur 124 ±4 ms après impulsion et maximum absolu des pics de déplacement et de force à différentes températures (enrobé AC 4 L)

-10°C	Pic N°1	Pic N°2	Pic N°3	Pic N°4	Pic N°5
Déplacement hor. max sur T ₁₂₄ [µm]	6.2	6.2	6.2	6.1	6.1
Déplacement hor. max sur T _{abs} [µm]	6.3	6.2	6.2	6.2	6.1
Différence dépl. T ₁₂₄ vs T _{abs} [µm]	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Différence dépl. T ₁₂₄ vs T _{abs} [%]	1%	0%	1%	0%	0%
Force max selon dépl. max sur T _{124,dép} [N]	16530	16609	16511	16586	16571
Force max sur T _{abs} [N]	16534	16609	16574	16586	16571
Différence force T _{124,dép} vs T _{abs} [N]	-4.55	0.00	-62.78	0.00	0.00
Différence force T _{124,dép} vs T _{abs} [%]	0.0%	0.0%	-0.4%	0.0%	0.0%
15°C	Pic N°1	Pic N°2	Pic N°3	Pic N°4	Pic N°5
Déplacement hor. max sur T ₁₂₄ [µm]	7.9	7.9	7.8	7.9	7.9
Déplacement hor. max sur T _{abs} [µm]	8.7	8.6	8.6	8.5	8.6
Différence dépl. T ₁₂₄ vs T _{abs} [µm]	-0.8	-0.8	-0.8	-0.6	-0.7
Différence dépl. T ₁₂₄ vs T _{abs} [%]	10%	10%	10%	8%	9%
Force max selon dépl. max sur T _{124,dép} [N]	3561	3558	3564	3550	3558
Force max sur T _{abs} [N]	3574	3567	3568	3558	3559
Différence force T _{124,dép} vs T _{abs} [N]	-13.70	-9.33	-3.40	-8.23	-1.34
Différence force T _{124,dép} vs T _{abs} [%]	-0.4%	-0.3%	-0.1%	-0.2%	0.0%
40°C	Pic N°1	Pic N°2	Pic N°3	Pic N°4	Pic N°5
Déplacement hor. max sur T ₁₂₄ [µm]	6.5	6.7	6.6	6.6	6.6
Déplacement hor. max sur T _{abs} [µm]	8.6	8.6	8.6	8.4	8.5
Différence dépl. T ₁₂₄ vs T _{abs} [µm]	-2.1	-1.9	-2.0	-1.8	-1.9
Différence dépl. T ₁₂₄ vs T _{abs} [%]	33%	28%	30%	28%	29%
Force max selon dépl. max sur T _{124,dép} [N]	507.31	515.91	521.97	519.79	518.67
Force max sur T _{abs} [N]	557.22	557.83	560.11	558.18	559.75
Différence force T _{124,dép} vs T _{abs} [N]	-49.92	-41.92	-38.13	-38.39	-41.08
Différence force T _{124,dép} vs T _{abs} [%]	-9.8%	-8.1%	-7.3%	-7.4%	-7.9%

Cette analyse illustre la différence entre les pics de déformation/déplacement et les pics de charge (Figure 5-16 et Figure 5-17). Dans la Figure 5-17 le pic de force (trait discontinu) et le pic de déplacement sont presque simultanés lorsque la température est basse. A 15 °C, on peut observer un léger décalage entre le pic de force et le pic de déplacement. Cet effet est encore plus important à haute température.

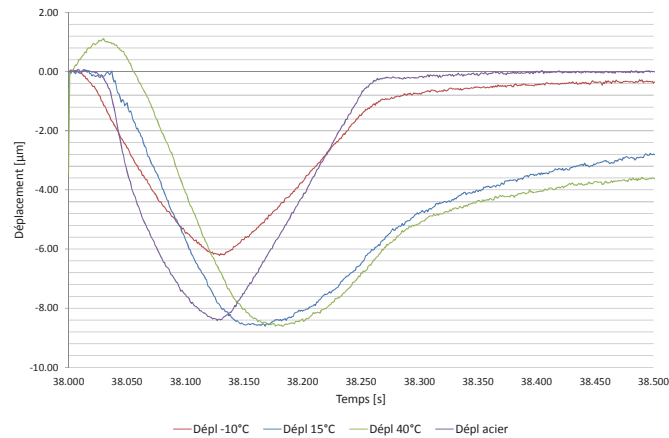


Figure 5-16 : Pic (N°3) de déplacements pour enrobé AC 4 L à différentes températures

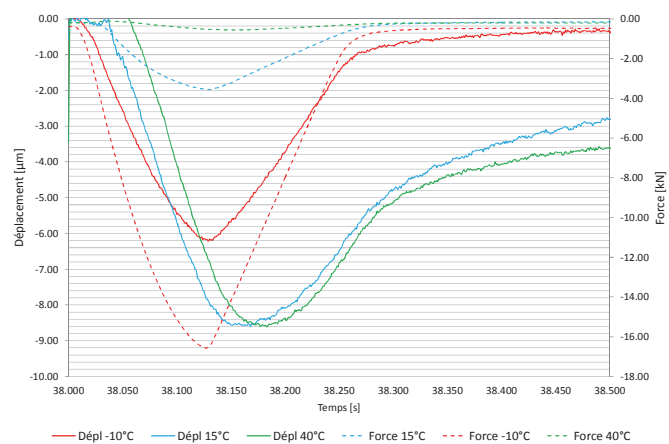


Figure 5-17 : Pic (N°3) de forces et de déplacements à différentes températures

L'essai étant contrôlé en force, le pic de force apparaît à $124 \text{ ms} \pm 4 \text{ ms}$. Les différences observées avec le pic absolu (T_{abs}) étant liées à la difficulté de la presse à suivre la consigne de force. Dans le cas de forces très faibles (environ 0.5 kN), cette différence est de l'ordre de 8%, puis elle diminue avec l'augmentation de la force appliquée. Les résultats obtenus avec l'anneau d'acier confirment ce phénomène. Le pic de déplacement peut par contre être légèrement décalé avec le pic de force, ceci selon le type de matériau testé et la température d'essai (composante visqueuse). Il est également important de mettre en évidence que le cas étudié (AC 4 L) représente un cas « extrême » avec une teneur en liant élevée. L'effet de la composante viscoélastique sera plus faible dans le cadre d'enrobé AC T 22S dont le module de richesse est sensiblement inférieur.

La procédure d'essai demande de considérer la déformation maximale sur l'intervalle $124 \pm 4 \text{ ms}$. Le choix de prendre la valeur maximale de déformation, puis conserver la force enregistrée simultanément est effectué étant donné la très faible incidence par rapport à la prise en compte du maximum de force sur l'intervalle $124 \pm 4 \text{ ms}$. Ceci est également en accord avec l'hypothèse d'un comportement élastique linéaire pour des déformations infinitésimales.

(Chailleux, De La Roche et al. 2010) rapporte également un décalage de temps entre le maxima de la force et de la déformation diamétrale, ce décalage étant attribué à la réponse électronique des capteurs LVDT. Dans son étude, l'auteur prend en compte les valeurs maximales de force et de déformation, ceci même si ces pics ne sont pas simultanés.

On peut finalement se demander si l'intervalle de mesure du maximum de déplacement ne devrait pas être décalé dans le temps selon les conditions d'essais (hautes températures) et le type de matériau testé (par ex. enrobé riche en mastic). La mesure du maximum de déplacement enregistré pourrait alors être corrélée avec la force maximale appliquée. Cela demande cependant de considérer un intervalle supérieur à 124 ± 4 ms. Dans ce cas, la composante visqueuse est alors prise en considération. L'incidence sur le module sécant serait le cas échéant à analyser.

(Collop et Airey 2003) propose une méthode de détermination des propriétés viscoélastiques du matériau sur la base des résultats de l'essai de traction indirecte (IT-CY). Son étude est basée sur la relation suivante dans laquelle la réponse est divisée en une composante en cisaillement (G) et une composante volumétrique (K), les autres éléments étant définis conformément au chapitre 5.3.2 :

$$\Delta H = \frac{P(0.273 + \nu)}{h \cdot S_m} = \frac{P}{h} \left(\frac{0.258}{G} - \frac{0.081}{K} \right)$$

L'auteur propose une modélisation comprenant un modèle de Maxwell avec un modèle de Voigt (en série).

5.8.2 Facteur de surface de charge et module sécant corrigé

Le facteur de surface de charge est un des éléments clés et passablement discuté de cette méthode d'essai. Ce facteur dépend de la machine d'essai et de l'impulsion imposée et il intervient dans le calcul du module sécant corrigé.

L'essai de traction indirecte s'effectue en force (ou déformation) contrôlée. Aucun contrôle sur le mode d'application de la charge n'est effectué. C'est pourquoi le facteur de surface de charge (k) a été introduit. Comme défini précédemment, le facteur de surface de charge doit être calculé afin de corriger les résultats d'essais en le ramenant au facteur cible (0.6). Le facteur de surface de charge est défini de manière générale comme le rapport entre l'intégrale de chargement $F(t)$ et le produit du temps de montée (t_{max}) par la valeur de crête de la charge (F_{max}) (Figure 5-8).

$$k = \frac{\int_0^{t_{max}} F(t) dt}{F_{max} \cdot t_{max}}$$

D'un point de vue pratique, les premiers essais avec l'anneau de calibration en acier montrent que ce ratio cible peut s'avérer difficile à atteindre, ceci selon les forces appliquées. La Figure 5-18 illustre deux cas de chargement : le premier avec une force cible de 1.4 kN et le second avec une force cible de 6 kN. Pour chacun des cas, la consigne (trait discontinu) et la force réelle appliquée sont représentées. On observe que dans le premier cas avec force faible, le signal réel a des difficultés à suivre la consigne imposée. L'impulsion de la force démarre avec un temps de retard significatif puis applique un chargement abrupt afin de compenser ce retard initial. Dans le second cas (force de 6 kN), la consigne est beaucoup mieux suivie par le signal réel, ceci malgré le léger retard initial. L'aptitude à suivre la consigne se traduit au niveau du facteur de surface de charge qui est de 40% dans le premier cas et de 56% dans le second cas.

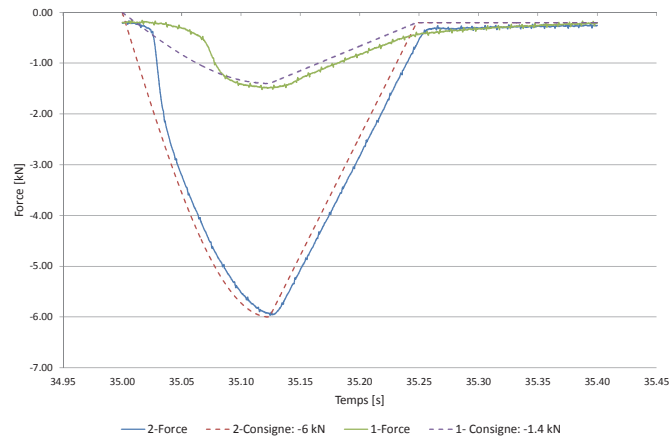


Figure 5-18 : Comparaison de valeur de consigne et valeur mesurée pour deux cas de chargement

Un ajustement des PID (supposés pas assez réactifs) et une nouvelle mesure ($P=0.9$, $I=0$, $D=0$) est effectuée afin de vérifier que le problème n'est pas lié aux PID choisis. Le ratio obtenu avec de nouveaux PID pour une force de 1.4 kN est de 41% ce qui est semblable au cas initial. La problématique n'est donc pas relative aux PID, mais elle est liée aux caractéristiques de la machine d'essai (valve d'injection d'huile). Les PID dépendant entre autre du matériau testé, des essais avec modification des PID ont également été réalisés pour les échantillons d'enrobés. Les résultats obtenus sont similaires.

Il ressort de cette première analyse que le facteur de surface de charge ne peut pas être contrôlé, mais uniquement vérifié à posteriori. De plus, il n'est pas directement lié à l'échantillon et ses caractéristiques intrinsèques mais à la machine d'essai.

Avec l'installation utilisée pour cette recherche, les forces très faibles ont pour conséquence le non-respect du facteur de surface de charge. Afin de palier à ceci, il pourrait être proposé d'imposer une déformation horizontale plus importante sur l'éprouvette, ce qui aurait pour conséquence d'augmenter la force nécessaire et ainsi s'approcher du facteur de surface de charge souhaité. Afin d'évaluer cela, différents essais ont été réalisés sur l'anneau de calibration, en variant la force appliquée. Les résultats sont indiqués dans le Tableau 5-13 dans lequel les valeurs ne respectant pas les exigences de la norme sont indiquées en rouge. On observe que pour un déplacement de 8.3 à 9 μm (limite maximale pour un échantillon de diamètre 150 mm), le facteur de surface de charge respecte les exigences.

Tableau 5-13 : Analyse du facteur de surface de charge pour différentes forces (anneau acier)

Mesure	F_{vert} [kN]	Déplacement [μm]	Facteur de surface de charge [%]
0049	1.22	6.3	48%
0050	1.59	8.3	51%
0052	1.68	8.9	52%
0051	1.81	9.7	53%
0053	2.07	11.1	54%

Sur cette base, la charge minimale (F_{eff}) permettant de respecter le critère relatif au facteur de surface de charge est de 1.6 kN. En considérant un déplacement de 9 μm et un coefficient de Poisson de 0.35, ceci correspond à un module sécant minimal de 2200 MPa. Dans le cas où le module sécant est inférieur à cette valeur, alors des déformations supérieures doivent être appliquées afin d'augmenter la force nécessaire. Cette remarque est établie sur la base d'essais avec l'anneau de calibration en acier, un nouveau calcul devant être fait avec les échantillons d'enrobé bitumineux testés.

Dans le cadre des essais proposés ici, nous appliquons un chargement suivant une fonction $\frac{1}{4}$ de sinus. Cependant, une certaine « latitude » existe au niveau du choix du signal de chargement. De manière générale, les trois cas suivants peuvent se présenter :

- $k < 0.5$: courbe de chargement convexe
- $k = 0.5$: courbe de chargement linéaire
- $k > 0.5$: courbe de chargement concave

L'intégrale de chargement est calculée entre l'impulsion (temps 0) et la force maximale (F_{\max} à $t_{\max} = 0.124$ s). Si la sollicitation imposée est $\frac{1}{4}$ de sinus telle que nous la proposons ici, nous pouvons alors calculer :

Sollicitation : $y = A \cdot \sin(bt)$

Avec A : amplitude

b : période amplitude A

Donc,

$$y = A \rightarrow \sin(bt) = 1 \text{ d'où } \frac{\pi}{2} = b \cdot t_{\max} \rightarrow b = \frac{\pi}{2t_{\max}}$$

$$\begin{aligned} \text{Il vient : } \int_0^{t_{\max}} A \sin(bt) dt &= A \int_0^{t_{\max}} \sin(bt) dt = A \cdot \frac{1}{b} [\cos(bt)]_0^{t_{\max}} \\ &= -A \cdot \frac{2t_{\max}}{\pi} = -0.08A \end{aligned}$$

Ainsi, le facteur théorique de surface de charge k , indépendant de l'amplitude A , est :

$$k = \frac{0.08A}{0.124A} = 63\%$$

Ce calcul montre que le ratio théorique idéal est de 0.63 pour une sollicitation de type $\frac{1}{4}$ sinus. Le ratio de 0.60 ± 0.1 peut donc être théoriquement atteint avec ce type de signal.

Le choix du type de signal de charge est intimement lié au facteur de surface de charge bien que ce dernier soit récemment remis en question. Comme mentionné, le chargement (montée en charge) choisi pour l'essai IT-CY se fait selon $\frac{1}{4}$ de sinus, conformément à la version allemande de la norme. La version française respectivement anglaise (fait foi) de cette même norme demande une forme type onde de choc ou haversine. Le guide de dimensionnement MEPDG (Guide for Mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures) recommande une sollicitation haversine car elle est plus proche de l'état de sollicitation réel lors du passage d'un véhicule. Une comparaison entre un chargement sinusoïdal et haversine est illustrée ci-dessous.

$$\text{haversin}(\theta) = \frac{1 - \cos(\theta)}{2} = \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

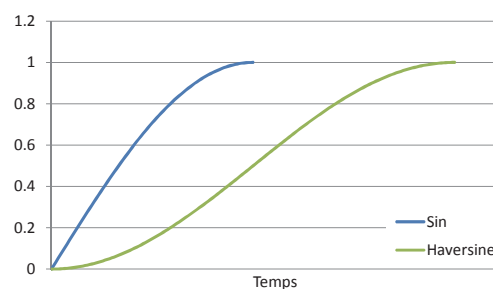


Figure 5-19 : Illustration chargement sinus ou haversine

Le facteur de surface de charge de la fonction sinus, calculé précédemment, est de 0.63. Nous pouvons relever ici que la fonction haversine présente un facteur de surface de charge de 0.5 (Hakim, Said et al. 2008). Ceci est plus éloigné de la consigne de la norme qui est de 0.6.

(Chailleux, De La Roche et al. 2010) analyse de manière théorique différentes lois de chargement de type $F(t)=At^m$, avec m compris entre 0.3 et 1.7. Le facteur de surface de charge est alors situé entre 0.77 et 0.37. Cette analyse montre que pour un même niveau de contrainte, l'augmentation du facteur de surface de charge entraîne également une augmentation de la déformation horizontale. Le module sécant diminue donc lorsque le facteur de surface de charge augmente, ce qui est en accord avec les premières observations sur enrobé effectuées ici.

La Figure 5-20 propose la comparaison entre un chargement $\frac{1}{4}$ sinus et un chargement selon une rampe sinus qui est une autre alternative possible. L'effet sur le facteur de charge et les résultats n'étant pas significatif, le chargement de type sinusoïdal est conservé.

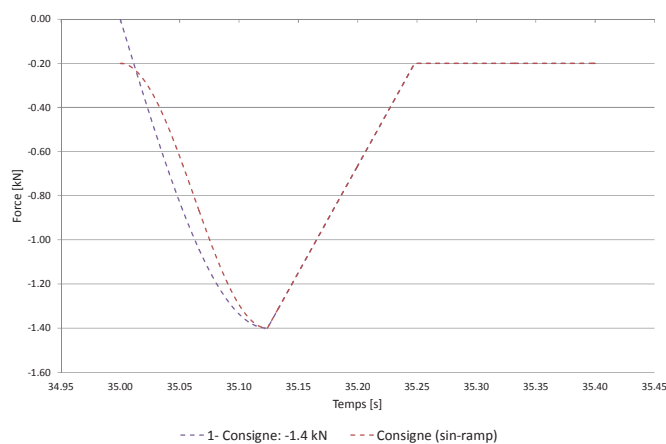


Figure 5-20: Analyse de deux types de chargements (sin et rampe sin)

La forme du signal de chargement joue également un rôle sur le type de module qui sera calculé par la suite. Dans le cas d'un chargement impulsionnel, le module sécant est mesuré en compression diamétrale. C'est ce type de chargement qui est effectué ici. Par contre, si le chargement est sinusoïdal, le module complexe du matériau est alors mesuré. Cette mesure de traction indirecte selon un chargement sinusoïdal n'est pas normalisée, mais des résultats sont proposés par (Olard, Noël et al. 2005).

Le calcul du module de rigidité de l'éprouvette ne fait pas intervenir le facteur de surface de charge. Le facteur k intervient dans le calcul du module de rigidité corrigé (S_m') dans lequel le module est ramené à un facteur de surface de charge de 0.60. L'origine de cette relation est issue des travaux de (Nunn et Smith 1997) qui identifie l'effet de la forme du signal de chargement sur la déformation produite par la contribution visqueuse du matériau. La forme du signal de chargement est caractérisée par le facteur de surface de charge discuté précédemment. Cette forme du signal de charge est inhérente à la machine d'essai et des différences conséquentes peuvent être observées (jusqu'à 18% entre laboratoires). Afin de prendre cet effet en considération, l'auteur propose de corriger les résultats de module sécant mesuré (S_m) et de définir un module sécant ajusté (S_m') qui corrige le facteur de surface de charge à 60%. La relation proposée se base sur le modèle de Burger (Annexe A), relation établie sur la base de matériaux de faible module (2000-5000 MPa) et à la température de 20 °C :

$$S_m' = (1 - A(0.60 - k))S_m$$

Avec

S_m : Module de rigidité à un facteur de charge k (température fixe)

A : Constante afin d'ajuster la mesure de module sécant à un facteur $k=60\%$

S_m' : Module de rigidité ajusté à un facteur de charge $k=60\%$

La normalisation intègre cette réflexion et propose le facteur suivant :

$$A = 0.322 \cdot (\log(S_m) - 1.82)$$

Dans l'état actuel, la norme EN 12796-26, Annexe C demande le calcul du module sécant ajusté tel qu'exprimé ci-dessus. Il faut cependant mentionner que cette expression, tout comme le facteur de surface de charge, sont passablement discutés et critiqués. (Chailleux, De La Roche et al. 2010) analyse le facteur de surface de charge et l'expression proposée pour le calcul du module corrigé. L'effet du facteur de surface de charge est notamment comparé sur des valeurs de module sécant théorique pour différentes températures entre 10 °C et 35 °C. Selon les auteurs, le facteur correctif ne semble pas adapté à toutes les conditions telles qu'illustré ci-dessous ; ce facteur devant dépendre du type de matériau et de la température d'essai.

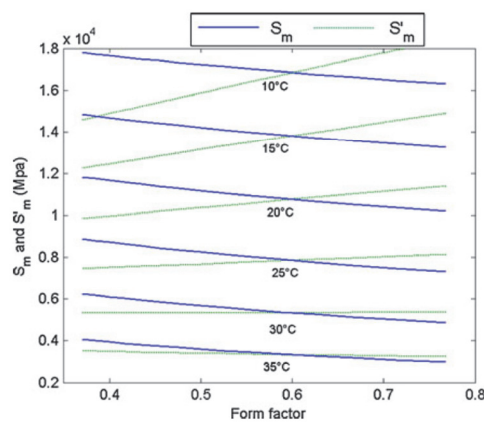


Figure 5-21 : Module sécant S_m (selon modèle) et module sécant corrigé S_m' pour différents facteurs de charge (Chailleux, De La Roche et al. 2010)

Nous pouvons finalement mentionner que, en plus de la forme du signal de chargement, la durée de chargement est également un paramètre déterminant. La procédure EN pour l'essai requiert un temps de chargement de 124 ± 4 ms. (Sandoval et Thenoux 2011) indique que ceci correspond à une vitesse de passage d'un véhicule à 100 km/h. L'auteur propose des temps de chargement entre 50 et 150 ms afin d'avoir un balayage en fréquence lors de la réalisation de l'essai.

Le guide MEPDG (Witczak, Mirza et al. 2003) propose des relations permettant de calculer le temps de chargement lors du passage d'un véhicule. La contrainte dépend alors de la profondeur du point de calcul et de la vitesse du véhicule :

$$t = \frac{L_{eff}}{17.6 \cdot v_s}$$

t : temps de chargement [s]

L_{eff} : longueur effective [inch]

v_s : vitesse [mph]

Dans cette expression, la longueur effective représente la longueur correspondant à l'impulsion de chargement et elle dépend des propriétés du matériau, de la profondeur et du type de chargement. Elle est calculée pour différentes configurations d'essieux en utilisant la transformée de Odemark, puis la

distribution des contraintes dans le sol. Une fois le temps de chargement connu, la fréquence est déterminée avec la relation $f=1/t$ [Hz].

5.8.3 Axes de mesure

La procédure d'essai demande la réalisation de deux mesures sur des axes distincts de $90\pm 10^\circ$, avec un intervalle de 20 minutes au minimum entre les deux mesures. Le choix des axes est effectué de manière aléatoire. Etant donné l'hétérogénéité des enrobés bitumineux, le même échantillon peut alors fournir des valeurs différents selon le choix des axes de mesure.

Les résultats de mesures selon deux axes distincts sont représentés dans la Figure 5-22. Ces résultats ont permis de définir le critère d'acceptabilité de la mesure selon le second diamètre : $-20\%\dots+10\%$. Il est en effet courant de mesurer 10% de moins selon le second diamètre lorsque le temps de repos est inférieur à une nuit. Afin d'améliorer la précision des résultats, la moyenne des deux diamètres est effectuée pour l'expression finale du module sécant. Une diminution de la différence entre les deux diamètres a été observée avec l'augmentation de la rigidité. Cette tendance a également été mesurée lors des essais avec l'enrobé AC 4 L (différence moyenne de 4% à 15°C, 8% à 40°C où le module de rigidité est moins élevé).

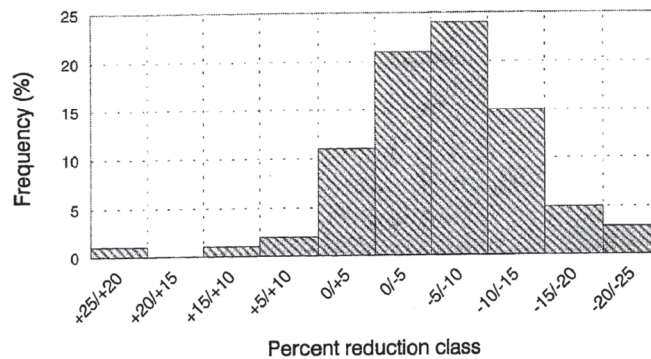


Figure 5-22 : Pourcentage de réduction de rigidité de la seconde mesure par rapport à la première (Nunn et Smith 1997)

(Nunn et Smith 1997) effectue un comparatif entre des mesures avec une période de repos de 30 mn et des mesures sans période de repos. Aucune différence significative n'a été observée pour ces mesures à 20 °C. Il montre également que les échantillons peuvent être testés plusieurs jours consécutivement, ceci sans être altérés ; l'état initial étant retrouvé après une nuit de repos à la température d'essai. Ce résultat obtenu à 20 °C ne peut pas être généralisé à toutes les températures d'essai. C'est pourquoi nous réalisons l'essai à 15 °C avec une éprouvette, puis à 40 °C ou -10 °C sur le même échantillon. Pour la réalisation de l'essai dans cette recherche un temps de repos de minimum 20 mn à température constante avant exécution d'un essai a été respecté.

5.8.4 Température d'essai

La température d'essai est un paramètre important étant donné que le comportement des enrobés bitumineux en est fonction. Pour le choix de la température d'essai, la norme EN 12697-26 recommande des températures de 2 °C, 10 °C et 20 °C pour des essais de routine, d'autres températures pouvant être utilisées. (Di Benedetto et De La Roche 1998) indique qu'en pratique, les mesures de module se font entre -10 °C et 20 °C. Le manuel d'utilisation CRT-IT-SET (Cooper, version sept. 09) indique quant à lui que la température d'essai ne devrait pas excéder 30-35 °C afin de garantir une bonne mesure, la température maximale dépendant du type de mélange et de son liant. (Di Benedetto et Corté 2004)

reprend les travaux effectués par Tayebali et al. dans le cadre du SHRP (Strategic Highway Research Program) qui propose de limiter l'usage de l'essai à des températures inférieures à 20 °C, car un fluage de l'éprouvette en cours d'essai peut être favorisé à des températures plus élevées.

Dans le cadre des essais proposés ici, nous avons effectué des mesures à -10 °C, 15 °C et 40 °C (essais exploratoires), températures identiques à celles choisies pour les essais de compression diamétrale. Bien que pas utilisé lors du dimensionnement, le module résilient à basse température est un paramètre intéressant fournissant des indications sur le risque de fissures alors que la mesure à haute température fournit des indications sur la sensibilité à l'orniérage. Des comparaisons avec les essais de module complexe effectués sur éprouvettes trapézoïdales sont également possibles. Pour les essais à des températures supérieures à 20 °C, une attention particulière doit être portée à l'apparition de déformation excessive et au fluage de l'enrobé.

Il est primordial de contrôler rigoureusement la température d'essai et le conditionnement des échantillons. Une différence de 1°C dans l'échantillon peut induire 10% sur la valeur du module de rigidité. Les matériaux à faible module de rigidité sont particulièrement sensibles à la température. (Nunn et Smith 1997) propose d'ailleurs l'établissement d'un facteur de correction lié à la température d'essai si celle-ci s'écarte de ± 2 °C par rapport à la valeur cible, ceci sur la base d'une correction de 0.11 GPa/°C. Le module sécant corrigé en fonction de la température et du facteur de surface de charge S_m'' est défini ainsi :

$$S_m'' = (1 - A(0.60 - k)) \frac{S_m}{(1 + B(T_1 - T))}$$

Avec,

- S_m'' : Module de rigidité ajusté à un facteur de charge $k=60\%$ et une température cible T
- A : Constante afin d'ajuster la mesure de module sécant à un facteur $k=60\%$
- B : Constante de correction pour la température
- T : Température cible
- T_1 : Température de l'essai ($T_1=T\pm 2$ °C)
- S_m : Module de rigidité à un facteur de charge k

5.8.5 Effets de la géométrie

La procédure d'essai demande des échantillons de diamètre 100 ou 150 mm. L'épaisseur recommandée se situe entre 30 et 75 mm. Différents auteurs ont analysé l'effet de la géométrie des échantillons.

(Lim, Tan et al. 1995) effectue des essais avec un ratio diamètre/hauteur constant (1.6). Il observe que le module résilient diminue avec l'augmentation du diamètre des échantillons, ceci avec les quatre mélanges évalués. En considérant l'équation de base pour le calcul du module résilient, ceci signifie que les déplacements horizontaux mesurés augmentent de manière plus importante que le diamètre de l'échantillon.

L'effet des dimensions est également discuté par d'autres auteurs. Par exemple, (Jahromi et Khodaii 2009) analyse l'effet de six facteurs sur le module résilient mesuré par un essai de traction indirecte, à travers d'un plan expérimental factoriel. Parmi ces facteurs, le diamètre des échantillons (100 et 150 mm) ainsi que l'épaisseur (35 et 65 mm en compactage Marshall). Cette recherche montre que des diamètres et épaisseurs plus faibles ont pour conséquence d'augmenter le module résilient. Leur effet combiné est indiqué dans la Figure 5-23. L'effet de l'épaisseur de l'échantillon est moins marqué dans le cas de diamètre important, ceci étant lié entre autre à l'arrangement granulaire (confinement). (Loulizi, Flintsch et al. 2006) obtient également des modules résilients plus faibles lors d'essais sur éprouvettes

de diamètre 150 mm comparativement à des essais sur éprouvettes 100 mm, la différence augmentant avec l'augmentation de la température d'essai.

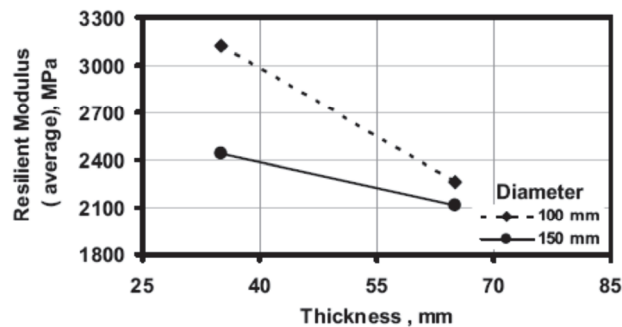


Figure 5-23 : Effet combiné du diamètre et de l'épaisseur de l'éprouvette sur le module résilient mesuré (Jahromi et Khodaii 2009)

L'effet de la taille des grains a également été analysé par (Lim, Tan et al. 1995) qui mentionne que le module résilient diminue si le ratio diamètre d'éprouvette/ D_{max} grains augmente. Par conséquent, en utilisant un diamètre faible d'éprouvette pour tester un mélange à gros grains (ratio diminue), alors le module sécant mesuré sera plus élevé que dans le cas d'un diamètre d'éprouvette élevé. Ceci est lié à l'arrangement granulaire et au « blocage » entre les grains. Afin d'éviter ce confinement trop important, il est donc recommandé d'utiliser un diamètre élevé d'éprouvette dans le cas de mélange à gros grains (min $2.5 \times D_{max}$). On peut observer ici que les différents paramètres géométriques peuvent avoir une influence significative sur le module sécant mesuré. Ceci est à prendre en considération lors de toute évaluation, de même que l'interaction entre les différents paramètres. Pour des essais sur enrobé AC T 22S, nous choisissons d'utiliser des échantillons de diamètre 150 mm étant donné le D_{max} des grains soit $150/22=6.8 > 2.5$. Une épaisseur de 75 mm est choisie par analogie avec les épaisseurs attendues in-situ. Ce choix permet d'avoir un facteur d'élanement de 0.5 pour les éprouvettes.

La géométrie joue également un rôle lors de la comparaison entre des carottes prélevées in-situ et des échantillons confectionnés en laboratoire. La variabilité attendue est beaucoup plus importante dans le cas d'échantillons prélevés in-situ, la qualité de la coupe étant cruciale. (Sandoval et Thenoux 2011) reporte des essais comparatifs entre échantillons confectionnés en laboratoire et prélevés in-situ. De manière générale, les modules mesurés in-situ sont plus faibles, la différence étant de 30% environ.

Le mode de compactage des échantillons est également un paramètre important affectant la teneur en vides ainsi que les phénomènes de friction entre les granulats et le bitume. Par exemple, le compactage PCG va aboutir à une orientation préférentielle des grains par un phénomène de pétrissage du mélange. La PCG peut cependant amener à une distribution non uniforme des vides avec des vides plus faibles en cœur d'éprouvette ou en périphérie selon le taux de compactage. Le compactage Marshall procède par chocs successifs. Le mode de compactage influence également le positionnement du film de liant par rapport aux granulats et affecte les caractéristiques mesurées (module sécant).

5.8.6 Répétabilité et reproductibilité

La répétabilité de l'essai a été partiellement évaluée lors des mesures avec l'anneau d'acier ainsi qu'avec l'enrobé AC 4 L. Ces premiers résultats obtenus ont permis de montrer la bonne fiabilité de la chaîne de mesure aux différentes températures d'essai (-10 °C à 40 °C). Les écarts-types obtenus pour les essais sur enrobés sont bons à température intermédiaire, la valeur augmentant sensiblement à haute température. La comparaison des résultats avec l'écart-type donné par (Corté, Gourdon et al. 2001) montre bien que la précision n'est cependant pas autant bonne que pour les essais de module complexe

sur éprouvettes trapézoïdales, mais elle est malgré tout acceptable. Pour des essais de rigidité, l'écart-type en répétabilité est estimé à 5% comme valeur la plus faible (Di Benedetto, Partl et al. 2001). Cette valeur limite est approchée dans le cadre des essais à basse température et à température de 15 °C.

Afin d'améliorer et évaluer mieux encore la répétabilité, il est cependant primordial de multiplier les expériences et effectuer l'essai en suivant un protocole strict. La méthode de conditionnement et le respect des températures sont également des paramètres primordiaux dans le but d'améliorer la répétabilité (et la reproductibilité). En effet, une différence de 1 °C peut avoir pour conséquence une variation de 10% dans la rigidité du matériau. (Carbonneau, Yvinec et al. 2005) recommande de travailler avec trois à quatre échantillons afin d'avoir une précision de 10% et un intervalle de confiance de 80% par rapport à la valeur « correcte ». La répétabilité peut également être évaluée par l'intermédiaire du coefficient de variation. Comme discuté précédemment, un CV de 10% à 20% peut être légitimement attendu avec cette méthode d'essai.

La reproductibilité n'a pas été évaluée dans le cadre de ce travail. Sa détermination nécessite la réalisation d'essais croisés. Ceci sera effectué dans une prochaine phase. Des considérations sont proposées par (Nunn et Smith 1997) qui rapporte les résultats d'essais effectués dans cinq différents laboratoires testant des échantillons identiques. Lors de ces essais, la reproductibilité a été estimée à 3.5 – 5% pour le module sécant mesuré et 2.2 – 3.8% pour le module sécant ajusté. L'unité utilisée est un pourcentage du logarithme de la rigidité. La reproductibilité a été améliorée par une réalisation stricte des essais et le calcul du module sécant ajusté.

5.9 Essais sur enrobé tiède

Des essais sur les enrobés tièdes sélectionnés pour la recherche et préalablement évalués en laboratoire ont été effectués dans le cadre des travaux de (Wattin 2011). Compte tenu de la taille maximale des granulats (22 mm), les essais sont réalisés sur des éprouvettes compactées à la presse à cisaillement giratoire, de hauteur 75 mm et diamètre 150 mm. La teneur en vides géométriques est de 7.5% (PCG), 4.5% hydrostatiques.

L'essai IT-CY est réalisé à trois différentes températures : -10 °C, 15 °C et 25 °C. Un échantillon testé à 15 °C est ensuite testé soit à basse soit à haute température. A chaque température quatre éprouvettes sont testées, deux semaines après leur confection. Les échantillons sont équipés de pastilles de contact entre le capteur et l'enrobé. Les résultats aux différentes températures d'essais sont indiqués ci-dessous. Pour chacune des températures d'essai, le détail des résultats par éprouvettes ainsi qu'une synthèse des quatre échantillons sont proposés. Les valeurs ne respectant pas les exigences de la norme sont indiquées en rouge.

Tableau 5-14 : Résultats d'essais sur enrobé AC T 22S, température -10 °C

		Dépl.		Facteur k		Module sécant mesuré S_m				Module sécant ajusté S_m'			
		0°	90°	0°	90°	0°	90°	Δ	Moy	0°	90°	Δ	Moy
		[μm]	[μm]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[Mpa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[Mpa]
REF	E1	5.2	4.0	45	70	23'922	23'836	0%	23'879	20'896	22'526	8%	21'711
	E2	5.3	5.2	56	45	22'757	23'922	5%	23'340	21'957	20'896	-5%	21'427
	E3	5.1	5.0	59	59	29'215	23'687	-19%	26'451	29'069	23'510	-19%	26'290
	E4	5.1	5.2	58	59	23'176	23'002	-1%	23'089	22'832	22'773	0%	22'803
ET-C	E1	5.5	5.5	59	59	23'552	23'778	1%	23'665	23'304	23'579	1%	23'442
	E2	5.3	5.9	59	59	24'439	23'170	-5%	23'805	24'178	22'971	-5%	23'575
	E3	5.1	5.7	59	59	26'529	23'818	-10%	25'174	26'274	23'633	-10%	24'954
	E4	5.2	5.2	59	58	26'076	25'961	0%	26'019	25'799	25'639	-1%	25'719
ET-P	E1	5.5	5.7	59	59	23'826	22'696	-5%	23'261	23'571	22'429	-5%	23'000
	E2	5.5	5.0	59	59	23'624	24'704	5%	24'164	23'359	24'506	5%	23'933
	E3	5.1	5.1	59	59	24'467	27'976	14%	26'222	24'231	27'771	15%	26'001
	E4	5.1	5.2	59	58	24'417	23'808	-2%	24'113	24'153	23'504	-3%	23'829
EST	E1	5.8	6.7	59	59	25'495	22'113	-13%	23'804	25'349	21'897	-14%	23'623
	E2	6.1	6.6	59	59	24'340	22'367	-8%	23'354	24'187	22'231	-8%	23'209
	E3	6.2	6.3	59	59	23'774	23'397	-2%	23'586	23'572	23'245	-1%	23'409
	E4	6.1	6.5	59	59	24'365	22'891	-6%	23'628	24'203	22'744	-6%	23'474

	S_m moyen MPa	Ecart-Type MPa	
REF	24'190	1'543	CV=6%
ET-C	24'665	1'130	CV=5%
ET-P	24'440	1'258	CV=5%
EST	23'593	185	CV=1%

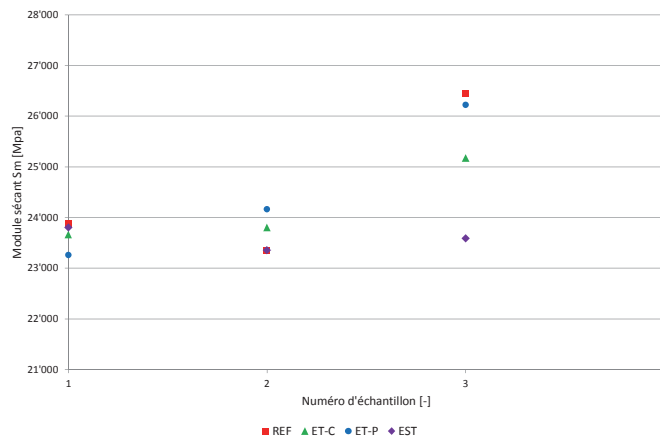


Figure 5-24 : Module sécant moyen mesuré S_m sur les différents échantillons à 2.016 Hz (-10°C)

Tableau 5-15 : Résultats d'essais sur enrobé AC T 22S, température 15 °C

		Dépl.		Facteur k		Module sécant mesuré S_m				Module sécant ajusté S_m'			
		0°	90°	0°	90°	0°	90°	Δ	Moy	0°	90°	Δ	Moy
		[μm]	[μm]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[Mpa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[Mpa]
REF	E1	6.7	6.7	51	51	8'846	8'216	-7%	8'531	8'314	7'692	-7%	8'003
	E2	6.9	7.2	54	54	8'395	8'103	-3%	8'249	8'077	7'780	-4%	7'929
	E3	6.9	7.4	54	55	8'334	7'604	-9%	7'969	7'991	7'330	-8%	7'661
	E4	7.3	7.2	54	54	7'968	8'706	9%	8'337	7'643	8'347	9%	7'995
ET-C	E1	7.2	7.2	57	56	8'602	8'618	0%	8'610	8'410	8'388	0%	8'399
	E2	7.2	7.4	56	56	9'112	8'452	-7%	8'782	8'879	8'233	-7%	8'556
	E3	7.2	6.9	56	56	9'285	9'337	1%	9'311	9'011	9'094	1%	9'053
	E4	6.5	6.8	57	55	10'556	9'854	-7%	10'205	10'307	9'485	-8%	9'896
ET-P	E1	7.2	7.3	54	54	8'418	8'113	-4%	8'266	8'061	7'776	-4%	7'919
	E2	7.3	7.3	54	54	7'945	7'229	-9%	7'587	7'632	6'921	-9%	7'277
	E3	7.0	7.4	53	55	7'972	8'046	1%	8'009	7'614	7'754	2%	7'684
	E4	7.0	7.3	54	54	8'208	7'710	-6%	7'959	7'895	7'420	-6%	7'658
EST	E1	7.3	7.2	55	55	6'894	6'992	1%	6'943	6'660	6'773	2%	6'717
	E2	7.0	7.0	55	56	6'634	7'235	9%	6'935	6'436	7'029	9%	6'733
	E3	7.0	7.2	56	55	7'506	7'039	-6%	7'273	7'295	6'802	-7%	7'049
	E4	7.0	7.2	55	55	7'195	7'007	-3%	7'101	6'963	6'780	-3%	6'872

	S_m moyen MPa	Ecart-Type MPa	
REF	8'272	234	CV=3%
ET-C	9'227	717	CV=8%
ET-P	7'955	280	CV=4%
EST	7'063	159	CV=2%

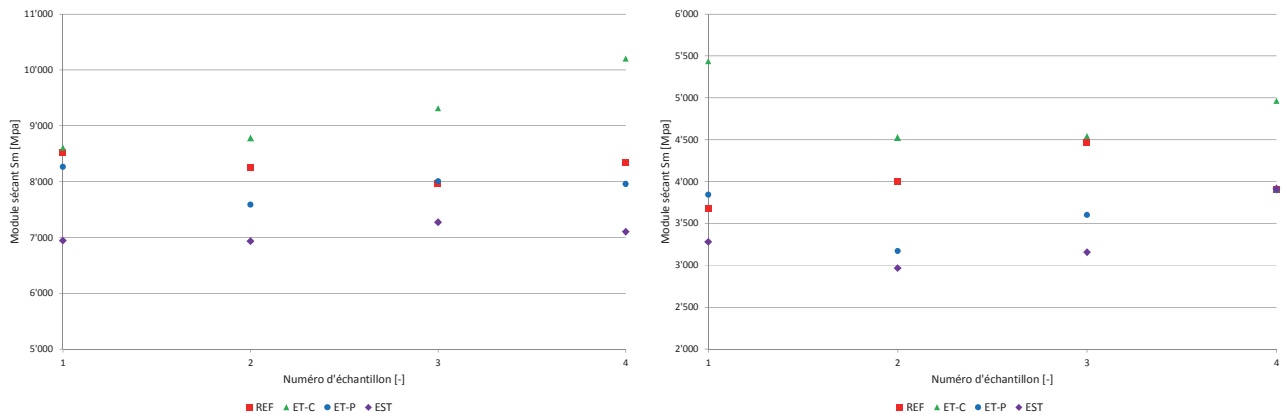


Figure 5-25 : Module sécant moyen mesuré S_m sur les différents échantillons à 2.016 Hz (gauche : 15°C, droite : 25°C)

Tableau 5-16 : Résultats d'essais sur enrobé AC T 22S, température 25 °C

		Dépl.		Facteur k		Module sécant mesuré S_m				Module sécant ajusté S_m'			
		0°	90°	0°	90°	0°	90°	Δ	Moy	0°	90°	Δ	Moy
		[μm]	[μm]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[Mpa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[Mpa]
REF	E1	6.9	6.2	51	50	3'797	3'569	-6%	3'683	3'604	3'363	-7%	3'484
	E2	6.4	6.4	51	51	3'997	4'004	0%	4'001	3'781	3'800	1%	3'791
	E3	6.0	6.5	50	51	4'674	4'255	-9%	4'465	4'408	4'029	-9%	4'219
	E4	6.4	6.2	50	50	3'987	3'823	-4%	3'905	3'769	3'610	-4%	3'690
ET-C	E1	7.4	6.6	55	54	5'249	5'628	7%	5'439	5'082	5'408	6%	5'245
	E2	7.8	7.6	53	54	4'570	4'484	-2%	4'527	4'381	4'314	-2%	4'348
	E3	7.6	7.1	54	53	4'516	4'571	1%	4'544	4'350	4'571	5%	4'461
	E4	7.1	7.4	54	54	5'061	4'865	-4%	4'963	4'868	4'697	-4%	4'783
ET-P	E1	6.2	5.7	50	49	3'857	3'831	-1%	3'844	3'634	3'590	-1%	3'612
	E2	7.3	6.6	50	50	3'265	3'080	-6%	3'173	3'086	2'909	-6%	2'998
	E3	7.0	6.4	50	50	3'457	3'746	8%	3'602	3'264	3'525	8%	3'395
	E4	6.3	6.6	50	49	4'078	3'720	-9%	3'899	3'851	3'485	-10%	3'668
EST	E1	6.7	6.3	51	51	3'290	3'272	-1%	3'281	3'123	3'272	5%	3'198
	E2	6.9	6.8	51	50	2'951	2'984	1%	2'968	2'804	2'829	1%	2'817
	E3	6.6	6.6	51	51	3'271	3'041	-7%	3'156	3'120	2'893	-7%	3'007
	E4	6.9	6.4	50	50	3'953	3'879	-2%	3'916	2'799	2'723	-3%	2'761

	S_m moyen MPa	Ecart-Type MPa	
REF	4'013	329	CV=8%
ET-C	4'868	431	CV=9%
ET-P	3'629	331	CV=9%
EST	3'330	411	CV=12%

Nous pouvons relever les éléments suivants :

- Pour les différents enrobés et aux températures choisies, l'essai a pu être réalisé. La machine permet de suivre la consigne de manière satisfaisante avec des facteurs de charge respectant les exigences (à une exception où la déformation n'est pas suffisante).
- Les échantillons sont homogènes. La différence de module sécant entre deux diamètres perpendiculaires d'une même éprouvette respecte les exigences ($D1/D2$ compris entre -20% à +10%), à l'exception d'un seul cas (ET-P, -10 °C). De manière générale, la valeur mesurée sur le second diamètre est inférieure à la valeur mesurée sur le premier diamètre conformément aux constatations faites précédemment. La différence entre les deux diamètres perpendiculaires d'une même éprouvette est globalement plus faible à 15 °C et 25 °C qu'à la température de -10 °C. La valeur moyenne (absolue) de différence entre deux diamètres est de 6% à -10 °C, 5.1% à 15 °C et 4.2% à 25 °C. Ces résultats sont satisfaisants étant donné le type d'enrobé testé.
- Le déplacement horizontal de $7 \pm 2 \mu\text{m}$ peut être atteint aux différentes températures. Dans le cas de basses températures, la force exigée est élevée et on vise alors la valeur inférieure du domaine de déformations admissibles.
- A une température donnée et compte tenu du matériau testé, la variabilité entre les éprouvettes d'un même enrobé est faible. Les écarts-types sont satisfaisants et le coefficient de variation (CV) du module sécant mesuré S_m n'excède jamais 12%, valeur obtenue à température de 25 °C

pour l'enrobé EST. En particulier, les résultats à basse température montrent une excellente stabilité.

- Pour les températures de -10 °C et 15 °C, le CV le plus faible est obtenu avec les éprouvettes EST (1% et 2%). Le coefficient de variation le plus élevé est quant à lui obtenu sur les éprouvettes REF (6% à -10 °C) et ET-C (8% à 15 °C), mais ces valeurs restent largement satisfaisantes. A la température de 25 °C, les coefficients de variation sont légèrement plus élevés que pour les autres températures d'essais.
- La comparaison du module sécant S_m des enrobés aux différentes températures (isochrones Figure 5-26) indique que le module sécant le plus élevé est systématiquement obtenu avec l'enrobé ET-C, le module sécant le plus faible étant celui de l'EST. Les modules sécants de l'enrobé de référence REF et ET-P sont relativement proches. A basse température où le squelette granulaire et la compacité jouent un rôle prépondérant, la différence entre les modules sécants des enrobés est plus faible. A température plus élevée (25 °C), la différence entre les enrobés augmente, le liant jouant un rôle important dans ce domaine de température. Cette tendance a également été observée sur les résultats de module complexe (chapitre 4).
- L'ordre de grandeur des modules sécants mesurés est comparable aux résultats de module complexe obtenus sur éprouvettes trapézoïdales (interpolation à 2 Hz). On peut observer que le module sécant S_m est systématiquement plus élevé que le module complexe sur éprouvettes trapézoïdale. La différence absolue est située entre 1450 MPa et 3000 MPa selon la température d'essai. Ces résultats sont cependant à analyser au regard de la compacité des échantillons. De plus, la corrélation entre module sécant et complexe doit faire l'objet de recherches futures.
- Les différents essais ont été réalisés à la fréquence de 2.016 Hz conformément à la norme. Afin de pouvoir tracer des isothermes, un balayage en fréquence est nécessaire. (Wattin 2011) effectue une analyse exploratoire en modifiant la fréquence (1 Hz, 3 Hz et 5 Hz), tout en conservant un temps de période de 3 s.
- Finalement, l'essai de module sécant IT-CY effectué sur enrobés tièdes ACT 22S abouti à des tendances et résultats fiables et cohérents avec les autres essais menés en laboratoire. L'essai peut donc être utilisé de manière régulière par exemple pour la comparaison de produits (échantillons fabriqués en laboratoire de préférence).

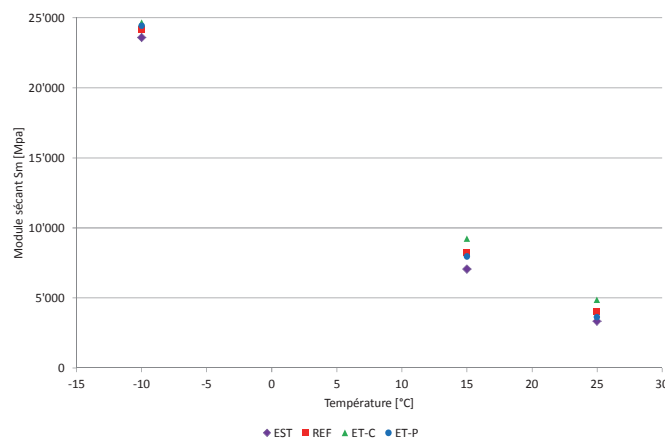


Figure 5-26 : Isochrone du module sécant S_m (fréquence 2.016 Hz)

5.10 Enseignements

Dans cette partie de la recherche, un essai de traction indirecte (IT-CY) a été mis en place et évalué de manière critique. Une procédure détaillée pour la réalisation de l'essai ainsi qu'une fiche semi-

automatique de traitement des mesures, calcul du module et vérification des exigences ont été développés.

Les premiers essais avec l'anneau d'acier ont permis de vérifier la chaîne de mesure et la bonne réalisation de l'essai. La robustesse de la chaîne de mesure est mise en évidence par la faible variabilité des résultats obtenus avec l'anneau d'acier. Les premiers essais effectués avec un enrobé de granulométrie fine (AC 4) sont également consistants au niveau des résultats (forme des signaux, tendances, valeurs). Les modules sécants mesurés sont dans la gamme attendue et la variabilité des résultats sur enrobé est conforme aux différentes expériences issues de la littérature. Les mesures préliminaires permettent de montrer que cette variabilité est inhérente au matériau et non pas à la méthode de mesure.

Sur la base de l'analyse théorique ainsi que des premiers résultats d'essais, nous pouvons tirer les enseignements suivants :

- L'essai de traction indirecte est une alternative simple et rapide permettant de déterminer le module sécant (ou éventuellement résilient) d'un enrobé bitumineux.
- Tout comme les autres essais de module et fatigue, la réalisation nécessite un soin tout particulier que ce soit dans la confection ou la mise en place des échantillons. Une légère imperfection est très vite rédhibitoire, en particulier aux températures extrêmes. Afin de limiter ceci, une procédure d'essai détaillée a été établie.
- Différentes sources d'erreurs ou d'imprécisions potentielles ont été identifiées, comme par exemple la tolérance au niveau des températures, l'influence de la courbe de chargement sur le module sécant mesuré ou encore la mesure selon différents diamètres. Dans le cas de mesures à basses températures et hauts modules, la rigidité de la presse doit être prise en considération.
- Les données géométriques des éprouvettes (hauteur, diamètre) et le mode de compaction (PCG, Marshall,...) ont un effet important sur le module sécant mesuré d'un enrobé donné.
- Des méthodes alternatives pour la mesure des déformations seraient à évaluer, par exemple des capteurs capacitifs sans contact dont la précision est très élevée.
- L'utilisation d'une pastille pour le contact entre l'éprouvette et le capteur a un effet significatif sur les résultats (écart-type réduit). Une alternative pourrait être l'utilisation de capteurs à tête plate.
- Pour un matériau et une température donnés, la précision est améliorée en prenant la moyenne de trois éprouvettes comme valeur de référence.
- Une des faiblesses de l'essai IT-CY réside en l'hypothèse effectuée pour le coefficient de Poisson. La norme propose une valeur par défaut (0.35), mais le coefficient de Poisson varie sensiblement selon la température et le type de sollicitation.
- Il est largement reconnu que la précision de l'essai IT-CY n'est pas la même que celle atteinte lors de l'essai de module complexe sur éprouvettes trapézoïdales. Cependant, si l'essai est réalisé avec soin, le module sécant fourni par l'essai IT-CY propose une précision suffisante pour effectuer des calculs de dimensionnement et durée de vie.
- L'essai s'inscrit tout particulièrement dans la comparaison de produits pour des échantillons fabriqués en laboratoire (plus homogènes) ou alors prélevés in situ.
- Les résultats obtenus sur enrobé tièdes AC T 22S sont réalistes et les tendances observées sont comparables aux tendances obtenues lors de l'essai de module complexe.
- En l'état, l'essai est fonctionnel. Les essais effectués sur enrobé constituent une analyse de faisabilité. Afin d'améliorer et évaluer la procédure mise en place, des essais croisés seraient nécessaires, ainsi que la multiplication des expériences (répétabilité).

- La norme EN 12697-26 relative à l'essai IT-CY comporte certaines imprécisions que ce soit pour la forme du signal de chargement ou la définition des déformations.

Des pistes de recherches futures sont esquissées, pistes qu'il serait intéressant d'approfondir en vue d'une amélioration de la mesure du module sécant :

- Le facteur de surface de charge est une donnée connue à posteriori et dépendant notamment des capacités de la machine utilisée. Ce facteur, largement discuté, devrait selon certains auteurs être adapté à la température et au type de matériau testé. Il serait important de le redéfinir afin de proposer un module sécant corrigé ajusté.
- Le temps de repos est également figé dans la méthode actuelle. Cependant, selon la température d'essai et le module de richesse du mélange, des temps de repos supérieurs pourraient être envisagés.
- Selon les conditions (température-fréquence), un fluage de l'échantillon en cours d'essai peut intervenir. Une analyse de ce phénomène ainsi que la prise en compte de la viscosité dans le calcul du module sécant et la procédure de réalisation de l'essai seraient à approfondir.
- La comparaison entre les résultats de carottes prélevées in-situ et celles confectionnées en laboratoire doit être davantage étudiée. La correspondance n'est pas directe et la dispersion est généralement plus importante pour les échantillons prélevés in-situ.
- Tel que proposé actuellement, l'essai de traction indirecte ne permet pas d'effectuer de balayage en fréquence, le temps de chargement étant fixe (124 ms). Une procédure pour la réalisation d'un balayage en fréquence pourrait être mise en place en variant le temps de montée entre 50 et 150 ms. Le temps de chargement étant relié à la fréquence d'essai, il pourrait être adapté aux conditions attendues in-situ. Ceci permettrait de pouvoir définir non seulement des isothermes, mais également des isochrones du module sécant.

A ce sujet, nous pouvons mentionner que le projet de norme européenne EN 12697-26 : 2010-02 (pas encore en vigueur actuellement) intègre une nouvelle annexe F. Dans cette annexe, un essai cyclique de traction indirecte (CIT-CY) est décrit. Cet essai utilise la même installation et configuration que l'essai IT-CY étudié dans cette recherche, mais propose un chargement sinusoïdal et des fréquences de chargement allant de 0.1 Hz à 10 Hz au minimum (60 Hz recommandé). La température d'essai doit selon ce projet de norme être située entre -10 °C et 20 °C.

- Les déplacements mesurés sont proches des limites de précision des capteurs LVDT. Tout en restant dans le domaine de linéarité des enrobés, des déplacements supérieurs pourraient être évalués selon les conditions. Ceci permettrait par ailleurs d'augmenter le facteur de surface de charge. Les premiers tests effectués ainsi que la littérature tendent à montrer que le module de rigidité diminue avec l'augmentation de la déformation imposée. La déformation optimale, représentative des résultats obtenus sur éprouvettes trapézoïdales serait à déterminer.
- Afin d'évaluer la sensibilité à l'eau et son effet sur le module, des mesures de module sécant avec/sans conditionnement pourraient être proposées. Ceci apporterait des compléments aux essais de sensibilité à l'eau traditionnels (compression diamétrale par exemple). Une expérience est reportée par (Sunghwan et Coree 2005) qui utilise l'essai IT-CY comme test de chargement dynamique jusqu'à la rupture de l'échantillon.

6. CONSIDERATIONS ENERGETIQUES ET ENVIRONNEMENTALES EN CENTRALE D'ENROBAGE

La première partie de cette recherche est consacrée à l'évaluation des propriétés mécaniques des enrobés tièdes ainsi qu'à la mise en place d'un essai de traction indirecte pulsé pour la détermination du module sécant. Dans la seconde partie, le développement et la mise en place du modèle multicritère d'évaluation des enrobés seront détaillés (chapitres 7, 8 et 9). Le présent chapitre 6 effectue la transition entre ces deux principales contributions de la recherche.

Les gains énergétiques et environnementaux sont un des fondements à l'origine du développement des enrobés tièdes. Nous proposons une analyse détaillée se focalisant sur le processus unitaire de la fabrication des enrobés en centrale. Comme il le sera montré plus loin, cette phase est l'une des étapes les plus importantes du cycle de vie d'un enrobé. L'analyse est effectuée par le recueil d'informations issues de centrales suisses, ainsi que par l'analyse de données de la littérature et la réalisation d'un calcul théorique. Ces différents éléments seront par la suite intégrés dans le modèle multicritère. Une analyse de sensibilité permettant d'identifier les principales sources de consommation énergétique et des considérations relatives à l'optimisation des centrales seront finalement formulées.

6.1 Données relatives aux centrales d'enrobage suisses

On distingue globalement deux grandes familles de centrales d'enrobage.

Les centrales discontinues sont les plus fréquentes en Europe et en Suisse. Dans ce type de centrale, les granulats chauds sont criblés et pesés séparément, de même que le bitume, avant de constituer individuellement des gâchées de 0.5 à 5 tonnes environ. Le tambour sécheur rotatif est un des principaux composants. Son inclinaison (environ 6°) ainsi que sa vitesse de rotation sont des paramètres déterminants. Les hautes températures de l'air sont obtenues par un brûleur consommant du mazout ou du gaz naturel. La chaleur dans le tambour sécheur est principalement transférée par convection. Après avoir quitté le tambour sécheur rotatif, les granulats chauds (135-180 °C) sont acheminés par un élévateur au sommet de la tour avant le processus de malaxage. Dans le cas de centrales dites hot-stock, le séchage des granulats constitue une étape indépendante du processus général (Figure 6-1). Au lieu d'être insérés dans le malaxeur immédiatement après séchage et chauffage, les granulats sont séparés en différentes fractions et stockés à chaud dans des silos thermiques pouvant contenir jusqu'à 800 tonnes de granulats. Lorsqu'une recette est demandée, les granulats sont alors acheminés vers les pré-doseurs avant d'être dirigés dans le malaxeur pour y être enrobés avec le bitume. Le filler est également ajouté à cette étape. Le bitume est pompé des silos de stockage dans lequel il est conservé à une température supérieure à 130 °C afin de garantir une viscosité suffisamment faible pour le pompage. L'enrobé bitumineux terminé est directement acheminé dans le camion. La durée de malaxage varie entre 25 et 90 secondes. Les centrales hot-stock autorisent une grande flexibilité dans les formules et quantités produites.

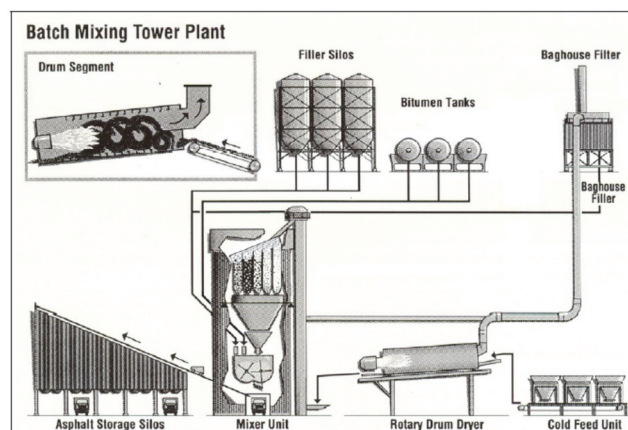


Figure 6-1 : Centrale discontinue type hot-stock (EAPA 2007)

Dans les centrales continues, le chauffage et le séchage des granulats ainsi que le malaxage des granulats, du filler et du bitume ont généralement lieu dans le même tambour. La quasi-totalité des postes d'enrobage continu en France sont des tambours sécheurs-enrobeurs (TSE), apparus en Europe dès 1975. Globalement, seul le processus de malaxage diffère entre les centrales discontinues et celles continues. Les granulats sont acheminés dans la zone de séchage du tambour. Ensuite, dans la zone de mélange du tambour, le filler et le bitume liquide sont injectés et le mélange est réalisé par les matériaux en rotation. L'enrobé terminé est finalement acheminé dans des silos de stockage chaud ou alors directement dans un camion. En 1984, les TSE évoluent de manière significative avec un allongement des tubes de 15% environ et un grossissement du tube côté flamme. L'objectif d'alors était d'éloigner la zone de combustion de la zone d'enrobage, afin de ne pas vieillir le liant par surchauffe. Par la suite, les TSE évoluent encore avec l'allongement successif des tubes et l'apparition des palettes de malaxage avant la généralisation de ces palettes à la fin des années 1980 (Ducasse 2003). Les centrales continues simplifient le processus de fabrication et permettent de s'affranchir du stockage des granulats chauds. Ce type de centrale peut facilement être déplacé, mais il est cependant moins flexible pour ce qui est du changement entre les recettes et pour la production de petites quantités d'enrobé. C'est pourquoi les centrales discontinues sont généralement préférées, ceci tout particulièrement en Suisse.

6.1.1 Enquête de consommation énergétique et émissions des centrales suisses

De nombreuses publications proposent des données de consommation énergétique. Ces données constituent autant de cas particulier. En effet, la consommation énergétique d'une centrale d'enrobage dépend de nombreux facteurs parmi lesquels : température extérieure, humidité de l'air, type et âge de la centrale, calibration et puissance du brûleur, énergie(s) utilisée(s), type d'enrobé produit, cadence de production, isolation de la centrale, période de la journée, taux d'humidité des granulats,...

L'utilisation du modèle multicritère développé par la suite requiert des informations relatives à la consommation énergétique et aux émissions en centrale d'enrobage. Afin de proposer des données représentatives du contexte suisse, une enquête a été menée auprès de différentes centrales d'enrobage. Le Tableau 6-1 synthétise les résultats de l'enquête concernant la consommation énergétiques. La durée annuelle de la production des centrales est également indiquée, celle-ci variant selon les régions et leur climat. Les détails sont disponibles dans la première partie du modèle relative à l'analyse du cycle de vie et implémentée dans MS-Excel. Une copie se trouve en Annexe C.

Tableau 6-1 : Résultats enquête de consommation énergétique des centrales suisses

Centrale N°	N°1			N°2		N°3	N°4		N°5		N°6	N°7		
Type de centrale	Ammann Uniglobe 200			Hotstock		Disc. 200 t/h	Hotstock 160 t/h		Disc. 200t/h		Disc.	Disc. 320 t/h		
Enrobé	Chaud			Chaud		Chaud	Chaud	Chaud	Chaud	Chaud	Chaud	Chaud	Chaud	Tiède
Nombre recettes	Env. 40			45		110	>100		>100		150	-		
Année référence	2007	2008	2009	2008	2009	2010	2008	2009	2008	2009	2009	2009	2010	
Production [t/an]	64'430	50'410	65'162	69'519	72'036	70'000	88'661	93'341	24'860	19'324	97'000	65'534	ND	
Durée production annuelle [mois]	10	10	10	10	10	11	11	11	10	10	12	11	11	
Fioul [kWh/t]	-	-	-	12.1	12.8	95.4	-	-	-	-	77.9	96.9	54.0	
Gaz [kWh/t]	82.9	86.0	81.5	74.8	74.4	-	100.3	93.2	108.0	92.3	-	-	-	
Electricité [kWh/t]	5.5	7.0	5.6	6.8	6.8	21.4	4.04	3.87	9.72	11.05	6	10.1	10.1	
Total [kWh/t]	88.5	93.0	87.1	93.7	94.0	116.8	104.4	97.0	117.8	103.3	83.9	107.0	64.0	
Total [MJ/t]	318.6	334.8	313.5	337.4	338.3	420.4	375.7	349.4	423.9	372.0	301.9	385.1	230.5	

Nous pouvons relever les éléments suivants issus des questionnaires et entretiens :

- Les centrales sont toutes de type discontinu.
- Une seule donnée concernant des mesures de consommation énergétique avec enrobé tiède est disponible (centrale N°7). Cette donnée concerne un enrobé avec ajout d'eau pour moussage du bitume. Il est très difficile de recueillir des données concernant la production d'enrobé tiède en Suisse car peu de centrales sont équipées et pour celles qui le sont le recul n'est pas encore suffisant.
- Pour les enrobés à chaud, la consommation énergétique varie entre 84 kWh/t et 118 kWh/t. La moyenne est de 99 kWh/t (356 MJ/t) et l'écart-type de 11 kWh/t (40 MJ/t). Le coefficient de variation (ratio entre l'écart-type et la moyenne, exprimé en pourcentage) est de 11%.
- La majorité des centrales utilisent de l'énergie électrique afin de faire fonctionner les moteurs et parfois également pour le maintien en température des cuves à bitume. Cette énergie représente en moyenne 7% de l'énergie totale, sauf dans le cas de la centrale N°3 où la consommation d'énergie électrique représente 18% du total. Les agents énergétiques principaux sont le gaz et le fioul (ou fuel). Le fioul ou mazout est un combustible dérivé du pétrole ; la différence entre le fioul, le mazout et l'huile de chauffage est le raffinement et les additifs utilisés (i.e. la couleur). La Figure 6-2 illustre la répartition de la consommation énergétique des centrales suisses

interrogées (N°7-2* concerne l'enrobé tiède). On peut relever que la majorité des centrales utilisent le gaz comme agent énergétique principal.

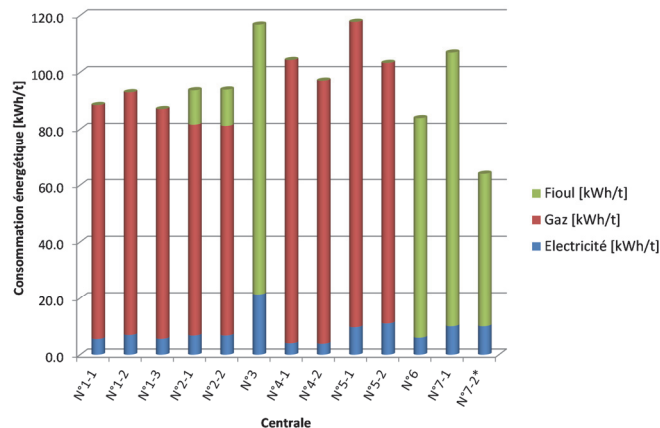


Figure 6-2 : Répartition de la consommation énergétique par type d'énergie (centrales suisses)

Lors de la même enquête, des données relatives à la mesure des émissions lors de la production des enrobés ont été récoltées. Ce genre de données est difficile à obtenir car relativement peu de mesures sont effectuées contrairement à la consommation énergétique qui fait généralement l'objet d'un suivi en continu. De plus, ces mesures sont souvent réalisées dans le cadre du contrôle de routine des installations (tous les 3 ans selon la législation fédérale) et les propriétaires des centrales ne les communiquent pas volontiers. Les émissions sont d'ailleurs très souvent estimées sur la base de la consommation énergétique. Les données récoltées sont résumées dans le Tableau 6-2.

Tableau 6-2 : Résultats enquête mesures d'émissions des centrales suisses

Centrale	N°1	N°2	N°6	N°7
Type de centrale	Uniglobe 200	Hotstock	Discontinue	Discontinue 320 t/h
Enrobé	Chaud	Chaud	Chaud	Chaud
Année	2008	2008	2006	-
NO ₂ [mg/m ³]	97±10	15	58	-
NO ₂ [g/h]	2200±300	468	-	-
SO ₂ [mg/m ³]	5±5	-	-	-
SO ₂ [g/h]	100±100	-	-	-
CO [mg/m ³]	173±17	>1105	339	-
CO [g/h]	3900±500	>34777	-	-
Poussières [mg/m ³]	16±2	2	-	-
Poussières [g/h]	350±60	69	-	-
CO ₂ [%]	5.0±0.5	3.5	5.2	4.3
O ₂ [%]	13.2±0.9	16.2	14.1	-

Les données d'émissions concernent uniquement les enrobés à chaud. La variabilité des mesures sur les différentes centrales est importante, tout particulièrement en ce qui concerne le monoxyde de carbone (CO). Des considérations relatives à la normalisation et aux valeurs limites en vigueur sont proposées

dans le chapitre 7.4.2. De manière générale, les aspects suivants d'une campagne de mesure d'émissions peuvent être mis en évidence :

- Trois mesures de 30 mn minimum sont réalisées lors d'une campagne de vérification de centrale. Lors de ces mesures, la centrale doit fonctionner à pleine capacité. Les valeurs reportées dans le tableau sont des moyennes horaires maximales.
- Le débit volumique et les poussières sont mesurés par échantillonnage.
- Les mesures suivantes sont effectuées en continu : température, oxygène, dioxyde de carbone, monoxyde de carbone, oxydes d'azote (NO et NO₂), dioxyde de soufre.
- Par convention, les valeurs des concentrations et des volumes sont exprimées à l'état sec, aux conditions normales de température et pression (0 °C et 1013 mbar).

Pour la réalisation d'une analyse du cycle de vie, il est nécessaire de connaître les émissions de gaz à effet de serre par tonne d'enrobé produite. Le calcul peut être fait sur la base d'un rapport de mesures d'émissions en centrale (Tableau 6-2). Le débit de CO₂, Q_{CO2}, exprimé en m³/t_{enr} est calculé ainsi :

$$Q_{CO2} = C_{CO2} \cdot Q_t$$

C_{CO2} Concentration de CO₂ [%] mesurée sur la centrale

Q_t Débit d'air [m³/t_{enr}]

Avec :

$$Q_t = Q_h / P$$

Q_h Débit d'air [m³/h] mesuré à la centrale

P Production d'enrobé [t_{enr}/h] mesurée à la centrale

Les émissions de CO₂, exprimées en kilos par tonne d'enrobé produite, peuvent ensuite être déterminées en multipliant le débit Q_{CO2} par la masse volumique du dioxyde de carbone (1.976 kg/m³ dans des conditions standards).

Sur la base de la consommation d'énergie et des agents énergétiques utilisés, le coût énergétique par tonne d'enrobé produite peut être déterminé. Le coût énergétique ne prend pas en considération l'achat des matériaux de base et éventuels additifs ; il ne correspond également pas au prix de vente du producteur. Le détail des calculs et les hypothèses sont disponibles en Annexe C ainsi que dans le modèle. Pour l'enquête effectuée sur les centrales suisses, le coût énergétique de la production des enrobés à chaud varie entre 7.0 CHF/t et 11.5 CHF/t. Le coût énergétique moyen est de 9.8 CHF/t. Le coût énergétique pour la production de l'enrobé tiède de la centrale N°7 est de 6.0 CHF/t, ce qui représente une diminution de 39% par rapport au coût énergétique moyen de la production des enrobés à chaud.

6.1.2 Exemple de mesures en centrale d'enrobage

Dans le cadre du projet de recherche PLANET dans lequel le Lavoc est particulièrement actif, des mesures d'émissions en centrales seront réalisées. Un premier test de faisabilité a été effectué sur une centrale discontinue utilisant principalement du fioul ainsi que de l'électricité pour les moteurs de la centrale et le maintien en température des cuves à bitume. Un enrobé à chaud normalisé AC T 22S avec bitume 50/70 est utilisé comme référence. L'enrobé tiède fabriqué est également un enrobé AC T 22S, mais avec un bitume 50/70 additivé par du Greenseal®. Le principe de cet additif pour enrobé tiède consiste à agir chimiquement avec les molécules saturées du bitume. La teneur en additif est de 1% par rapport à la masse du bitume et la température de sortie visée pour l'enrobé tiède est de 120 °C.

Les résultats des mesures de consommation énergétique sont indiqués dans le Tableau 6-3. Dans le cas présent, la fabrication de l'enrobé tiède avec additif chimique Greenseal® permet de diminuer la consommation énergétique de 22% par rapport à l'enrobé à chaud.

Tableau 6-3 : Mesures de consommation énergétique lors de la production d'enrobé tiède et d'enrobé à chaud

	Enrobé à chaud	Enrobé tiède
Quantité produite [t]	71.64	328.68
Température sortie malaxeur [°C]	160	115
Consommation fioul [l/t]	7.39	5.69
Consommation électricité [kWh/t]	2.48	2.78
Energie totale [MJ/t]	305	238

Des mesures d'émissions ont également été réalisées lors de la production des enrobés (Figure 6-3). Les paramètres suivants sont mesurés : composés organiques totaux (COT), CO, NO₂, O₂. La concentration en CO₂ est calculée. L'humidité et la température des gaz sont également mesurées. Les mesures d'émissions sont réalisées à la sortie du filtre, juste avant le passage dans la cheminée de la centrale.



Figure 6-3 : Instruments utilisés pour les mesures d'émissions en centrale d'enrobage

Les mesures étant effectuées à titre exploratoire, elles ne sont pas réalisées selon les protocoles suivis lors des opérations de contrôle d'installation (rendement de brûleur, nombre et durée des périodes de mesures). Pour des raisons de propriété nous ne pouvons indiquer le détail des mesures d'émissions, mais les éléments suivants sont à relever :

- La température des gaz en sortie de filtre varie sensiblement selon le procédé. Pour les enrobés tièdes, la température mesurée des gaz est de 50-70 °C, ce qui est relativement bas. Lors de la production des enrobés à chaud, la température des gaz remonte à 100 °C. Une diminution de la température des gaz peut avoir pour conséquence un risque de condensation et/ou de corrosion. Un autre risque est le blocage du filtre.
- Lors de la production de l'enrobé à chaud, le rendement du brûleur est de 70 à 80%. Pour la production d'enrobé tiède, le rendement du brûleur est abaissé à 40-45%. Ce rendement plus faible du brûleur a pour conséquence une combustion incomplète et une augmentation des émissions (COT) par rapport à la production d'enrobé à chaud.

Une diminution de la consommation énergétique ne signifie donc pas nécessairement une diminution des émissions. Pour cela, le brûleur et son rendement doivent être ajustés. Pour pallier à cette problématique, un second brûleur pourrait être utilisé dans le cas d'enrobés tièdes. Cependant, les coûts

relatifs sont importants. Une autre solution, et c'est un des domaines actuels de recherches, consiste à utiliser des brûleurs proposant plusieurs gammes de puissances.

6.2 Données de la littérature

De nombreuses données relatives à la consommation énergétique en centrale d'enrobage peuvent être trouvées dans la littérature. Le Tableau 6-4 illustre quelques exemples qui seront par la suite repris dans la base de données pour l'inventaire du cycle de vie (partie 1 du modèle, chapitre 7). Lorsque renseignées, les émissions de CO₂ sont également indiquées. L'allocation énergétique peut être utilisée pour le calcul des coûts ou alors pour la détermination des émissions si ces dernières ne sont pas fournies.

Tableau 6-4 : Consommation énergétique et émissions en centrale d'enrobage selon la littérature

Référence	Agents énergétiques	Type d'enrobé	Energie MJ/t	Emissions kg CO ₂ /t
(Stripple 2000)	Fioul, électricité	Chaud	276.00	19.58
(Stripple 2001)	Fioul, électricité	Chaud	321.00	22.50
(Ventura, Monéron et al. 2009)	Gaz, électricité	Chaud	189.00	9.02
(Ventura, Monéron et al. 2009)	Gaz, électricité	Tiède	87.60	3.18
(Abdo, Agnesina et al. 2005)	-	Chaud	251.70	-
(Groz, Alvarez et al. 1996)	-	Chaud	260.43	-
(Cholava 2009)	Gaz, électricité	Chaud	285.85	18.95
(Chappat et Bilal 2004)	-	Tiède	234.00	20.00
(Gonzalez, Ligier et al. 2009)	Gaz	Tiède	181.04	13.40
(Gonzalez, Ligier et al. 2009)	Gaz	Chaud	227.18	15.60

La moyenne de consommation énergétique des enrobés à chaud est de 259 MJ/t, ce qui est 27% plus faible que la moyenne de consommation énergétique relevée lors de l'enquête sur les centrales suisses. L'écart-type des données issues de la littérature est par contre comparable (42 MJ/t) à celui des données issues des centrales suisses (40 MJ/t) alors que le coefficient de variation des données de la littérature est de 16% ; un coefficient de variation de 11% étant obtenu dans le cas de l'enquête suisse.

La variabilité des données de consommation énergétique est élevée, ceci en raison des nombreux facteurs influençant cette consommation. De manière globale, (Stripple 2000) propose des valeurs allant de 276 MJ/t à 389 MJ/t pour un enrobé à chaud. (EAPA 2007) indique des valeurs typiques de consommation en centrale entre 252 MJ/t et 360 MJ/t. (Marshall et Fifer 2009) dans une enquête portant sur plus de 200 centrales du Royaume-Uni, rapporte une consommation énergétique plus importante, allant de 252 MJ/t à 540 MJ/t ; la valeur moyenne pondérée étant de 403 MJ/t. Ceci illustre la grande variabilité de la consommation énergétique des centrales d'enrobage.

Les données disponibles pour les enrobés tièdes sont moins nombreuses. La consommation moyenne d'énergie selon les données du Tableau 6-4 est de 168 MJ/t, cette valeur devant être prise avec précaution au vu du faible nombre de données et de leur grande variabilité.

De nombreuses recherches concernant les émissions des enrobés bitumineux ont été publiées au cours des dernières années. Afin d'illustrer ceci, nous présentons de manière non exhaustives quelques exemples particuliers.

Dans une étude de cas, (Lecomte, Deygout et al. 2008) propose des résultats de mesures d'émissions lors de la production et de la pose d'un enrobé WAM-Foam® produit à 120-125 °C, comparativement à un enrobé à chaud de référence (180 °C). Les réductions d'émissions mesurées dans la cheminée de la centrale d'enrobage sont de 35% environ pour le CO₂, 8% pour le CO alors que les oxydes d'azotes (NO_x) sont réduits de 60% environ. Des réductions de 25-30% peuvent également être obtenues pour les poussières et émissions de SO₂.

La recherche de (Paranhos 2007) propose une analyse à différents niveaux (échelles) des émissions. Dans une première échelle, la centrale d'enrobage et les plages d'émissions ont été analysées. La Figure 6-4 illustre les émissions de CO₂ moyennes dans une centrale TSE fonctionnant au gaz naturel. On remarque que les émissions de CO₂ augmentent avec la cadence de production et la température de fabrication, donc avec la consommation de combustible. L'auteur conduit une seconde analyse à l'échelle du laboratoire afin d'évaluer le procédé de malaxage, en caractérisant les émissions et le vieillissement de l'enrobé produit.

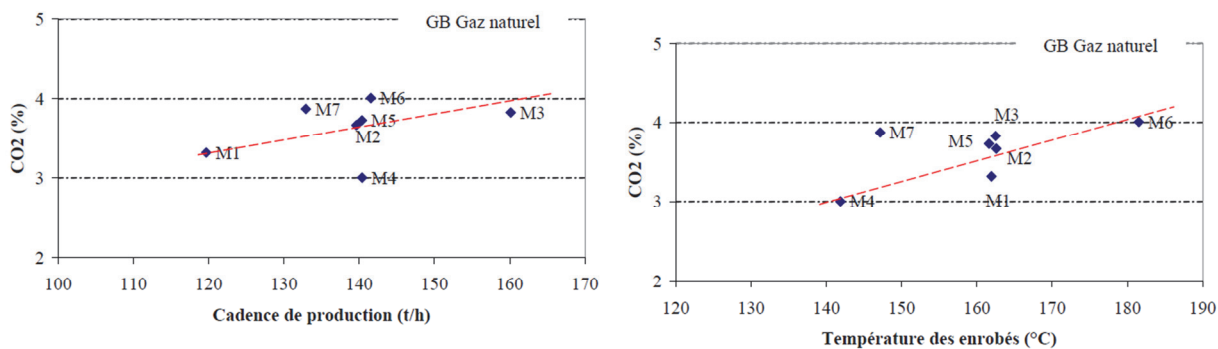


Figure 6-4 : Tendances d'émissions de CO₂ en centrale TSE au gaz naturel (période stabilisée) (Paranhos 2007)

(Viranaiken, Gaudefroy et al. 2010) décrit un système générateur de fumée permettant la mesure des émissions de l'enrobé, et non pas du bitume seul comme de nombreux autres systèmes. Cette installation, développée initialement par (Paranhos 2007), consiste en une cheminée en acier inoxydable adaptée à un malaxeur de laboratoire ; la cheminée acheminant les fumées aux différents dispositifs de mesure. Le dispositif initial de Paranhos a été modifié par l'ajout de systèmes de mise en température de la cheminée et des dispositifs de mesure spécifique d'émissions. Ces développements ainsi qu'un nouveau protocole expérimental permettent de reproduire les conditions rencontrées in-situ de la fabrication de l'enrobé jusqu'à la pose sur chantier.

D'autres auteurs s'intéressent à la mesure des émissions des enrobés par des mesures en laboratoire. (Mallick, Bergendahl et al. 2009) propose une analyse d'enrobé tiède (Sasobit®) en utilisant pour la mesure des tubes « Dräger » insérés dans des Erlenmeyers contenant l'enrobé. La recherche étudie l'effet sur les émissions de la température, de la teneur en bitume ainsi que de la teneur en cire. Les résultats obtenus indiquent que la température de l'enrobé est le paramètre le plus significatif influençant les émissions. Les réductions d'émissions sont estimées à plus de 30%. La précision limitée de la mesure n'a pas permis de mettre en évidence l'effet de la teneur en bitume.

La mesure des émissions lors de la pose est difficile en raison de la circulation des rouleaux de compactage. Pour cela, (Jullien, Monéron et al. 2006) propose un système alternatif de mesure des émissions de l'enrobé in-situ. La méthode consiste tout d'abord à réaliser une plaque (650 cm x 100 cm) dont l'épaisseur est identique à l'épaisseur mise en place sur le chantier. Ensuite, une chambre de mesure, sous la forme d'un demi-tonneau en acier, est déposée sur la plaque. Les mesures effectuées

concernent principalement les composés organiques volatiles (COV) et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). L'odeur est également caractérisée par un facteur de dilution (facteur de concentration). La technique appliquée permet de déterminer la concentration maximale des polluants et leur flux, ainsi que l'identification du niveau maximal d'émissions atteint après la pose. Des résultats comparatifs entre enrobé à chaud et enrobé semi-tiède LEA® sont reportés dans (Ventura, Monéron et al. 2009). Les auteurs mesurent une diminution des émissions lors de la fabrication des enrobés tièdes comparativement à un mélange à chaud ; le monoxyde de carbone CO et le méthane CH₄ pouvant selon les cas rester constants, voire augmenter. Ceci est lié à la réaction de combustion du gaz naturel.

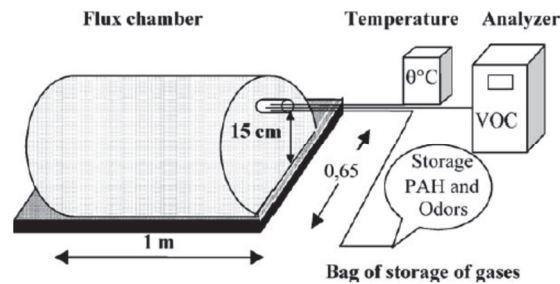


Figure 6-5 : Chambre de mesure des flux d'émissions (Jullien, Monéron et al. 2006)

(Ventura, Monéron et al. 2007) discute de la qualité et des incertitudes des données environnementales relatives à un procédé d'enrobage (centrale TSE). Les mesures sont effectuées au niveau de la cheminée, destinée aux rejets à l'atmosphère. Les flux de substances (masse de composés émis) sont calculés à partir des mesures de fraction volumique (concentration) des composés chimiques suivis. L'auteur réalise le calcul d'incertitude sur la base d'une étude statistique de nombreuses mesures. Les incertitudes dépendent également d'hypothèses relatives à la fixation arbitraire d'erreurs de mesure (pression, diamètre des cheminées, débits, durée de prélèvement, masse d'eau condensée). La méthodologie est illustrée par un exemple de calcul lors d'une campagne de mesure. Les incertitudes relatives sur le flux de CO₂ (kg/h) varient de 16% à 42% pour cet exemple. Dans ses conclusions, l'auteur indique que les erreurs relatives minimales sur les flux sont de l'ordre de 15%, ceci dans le cas d'une bonne maîtrise des conditions de mesure. De plus, dans un procédé stabilisé du point de vue de la production, les données environnementales présentent encore des variabilités importantes. Cette étude met également en évidence la complexité et la pluridisciplinarité du calcul des flux massiques des polluants atmosphériques.

6.3 Calculs théoriques

Les données relatives à la mesure de consommation énergétique en centrale sont parfois difficiles à obtenir, en particulier pour les enrobés tièdes où peu de données sont disponibles. Ceci est d'autant plus vrai en ce qui concerne les émissions étant donné la complexité de la mesure et le matériel nécessaire. Nous proposons ici une analyse de la consommation théorique d'énergie en centrale d'enrobage. L'utilisation d'un calcul de la consommation énergétique est particulièrement intéressante pour la réalisation d'analyses de sensibilité et l'identification des paramètres déterminants.

Le principe des calculs théoriques consiste à déterminer la consommation énergétique, en KJ ou MJ par tonne d'enrobé produite. Les émissions peuvent ensuite être déterminées sur la base de la consommation énergétique et des sources d'énergie utilisées. Le coût énergétique est également déterminé sur la base de l'énergie consommée, prenant en considération le prix des différentes énergies.

6.3.1 Energie de chauffage des composants

L'énergie de chauffage des composants est déterminée par un calcul de la thermodynamique. Nous détaillons ici les hypothèses de base ainsi que les relations utilisées pour le calcul. Cette démarche a été implémentée dans le modèle multicritère (Partie 1) qui sera discuté dans la suite du rapport. Nous pouvons postuler :

- Prise en considération d'additifs pour les technologies tièdes.
- Possibilité de travailler avec une fraction froide et une humidité résiduelle du sable.
- Prise en compte possible d'un rendement théorique afin de caler les calculs sur des mesures en centrale ou données de la littérature.
- Flexibilité permettant en tout temps à l'utilisateur de modifier les constantes et hypothèses de base.

On notera que d'éventuels matériaux recyclés ne sont pas pris en considération. Les constantes indiquées dans le Tableau 6-5 sont proposées par défaut. Les données relatives à la cire et à l'additif chimique sont issues du fournisseur de l'additif considéré.

Tableau 6-5 : Constantes utilisées pour le calcul de l'énergie de chauffage des composants

Constante	Unité	Valeur
Chaleur massique des granulats $C_{p_{gra}}$	kJ/kg·K	0.837
Chaleur massique du bitume $C_{p_{bit}}$	kJ/kg·K	2.093
Chaleur massique de l'eau $C_{p_{eau}}$	kJ/kg·K	4.185
Chaleur latente de vaporisation de l'eau L_v	kJ/kg	2256
Chaleur massique de la vapeur d'eau C_{p_v}	kJ/kg·K	1.83
Chaleur massique de la cire solide $C_{p_{cire,s}}$	kJ/kg·K	1.7
Enthalpie de fusion de la cire L_c	kJ/kg	240
Chaleur massique de la cire liquide $C_{p_{cire,l}}$	kJ/kg·K	2.3
Chaleur massique de l'additif chimique $C_{p_{add}}$	kJ/kg·K	2

Les données de base nécessaires à la réalisation du calcul sont les suivantes :

- Teneur en eau des granulats, du sable et du filler [%]
- Température initiale des granulats, du sable et du filler [°C]
- Température initiale du bitume [°C]
- Température finale des granulats, du sable et du filler [°C]
- Température finale du bitume [°C]
- Teneur en liant sur enrobé [%]
- Composition granulométrique

Dans le cas d'enrobé tiède avec cire (ET-C) des données complémentaires concernant la température initiale et la température de fusion de la cire, ainsi que son dosage sont nécessaires. L'enrobé avec additif chimique (ET-P) nécessite la connaissance de la température initiale de l'additif ainsi que son dosage. L'enrobé avec maîtrise de la teneur en eau (EST) demande des informations concernant la proportion de sable humide ainsi que l'humidité finale du sable avant enrobage.

L'augmentation d'énergie ΔQ associée au chauffage (augmentation de la température), sans changement d'état est :

$$\Delta Q = m \cdot Cp \cdot (T_f - T_i)$$

Où :	m	Masse [kg]
	C _p	Chaleur massique du matériau [kJ/kg·K]
	T _f	Température finale [°C ou °K]
	T _i	Température initiale [°C ou °K]

Ainsi, l'énergie à apporter pour chauffer 100 kg de granulat de 15 °C à 160 °C est de 12.14 MJ.

La chaleur latente mesure l'augmentation d'énergie associée avec un changement d'état : fusion de la cire ou vaporisation de l'eau. Dans le cas de la vaporisation de l'eau l'énergie à apporter Q est définie par :

$$Q = m \cdot Lv(T)$$

m	Masse [kg]
Lv(T)	Chaleur latente de vaporisation à la température de transition T

La vaporisation de 10 kg d'eau requiert une énergie de 22.5 MJ, ce qui est 1.85 fois plus important que l'énergie nécessaire à chauffer 100 kg de granulats de 15 °C à 160 °C.

Le calcul global consiste à effectuer la somme des énergies de chauffage, de vaporisation et de fusion des différents composants selon leur état dans le mélange enrobé final.

Une validation de la méthode a été effectuée en calculant des exemples de la littérature (Romier, Audéon et al. 2004; Raess et Pittet 2008) ainsi qu'en comparant avec d'autres calculateurs théoriques privés ou publics (calculateur LEA-CO® par exemple). En particulier, un calcul comparatif a été réalisé avec le logiciel ECOROOT (version d'essai), propriété conjointe de ARTS (société d'étude et de recherche des Arts et Métiers ParisTech) et du CETE Ile de France (Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement). Un exemple de résultat est indiqué en Annexe C. La différence entre les résultats proposés par ECOROOT et le calculateur développé dans notre recherche est inférieure à 10%. Cette différence s'explique notamment par la méthode appliquée : ECOROOT base ses calculs sur la température de sortie souhaitée de l'enrobé, et non pas sur la température initiale des constituants comme dans le cadre de notre recherche. Suivant ce principe, ECOROOT distingue les différents types d'enrobés uniquement sur la base de la température finale du mélange, tout en prenant en compte l'eau résiduelle de l'enrobé. L'outil ECOROOT ne permet par contre pas de considérer des additifs ou d'effectuer une affectation de l'énergie entre différentes sources pour le calcul des émissions.

Une approximation de la température du mélange final T_{enr} peut être faite :

$$T_{enr} = \frac{T_{bit} \cdot Cp_{bit} \cdot M_{bit} + T_{gra} \cdot Cp_{gra} \cdot M_{gra}}{Cp_{bit} \cdot M_{bit} + Cp_{gra} \cdot M_{gra}}$$

T _{bit}	Température finale du bitume [°C]
M _{bit}	Masse de bitume [kg]
T _{gra}	Température finale des granulats [°C]
M _{gra}	Masse des granulats [kg]

Ce calcul de la température du mélange est une approximation. Il est relativement bien ajusté pour le cas des enrobés à chaud et des enrobés tièdes avec cire ou additif chimique. Pour les enrobés semi-tiède, la température calculée du mélange est mal ajustée, car le calcul ne prend pas en considération la température du malaxeur.

Un calcul précis de la température de l'enrobé et son évolution est complexe. Des modèles ont été développés afin de considérer l'évolution de la température dans l'enrobé lors de sa fabrication et de la pose. (Harder, LeGoff et al. 2008) propose les résultats d'un modèle physico-mathématique permettant de déterminer l'évolution de la température des différents constituants de l'enrobé. Ce modèle prend en compte la diffusion de la chaleur dans les granulats, les transferts de chaleur entre les granulats, le bitume et les parties fines ainsi que l'évaporation partielle de l'eau qui est largement dépendante des conditions extérieures. Ce modèle qui considère chaque composant ou partie de composant comme un nœud dont la température évolue sous l'effet des flux de chaleur et des interactions avec ses voisins, a été développé par le Professeur Yves LeGoff de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM) de Paris.

Nous pouvons également mentionner le logiciel « PaveCool », développé par le Minnesota Department of Transportation. Cet outil a pour but d'assister dans le choix de la pose d'enrobé dans des conditions difficiles (température) par un calcul de l'évolution de la température dans l'enrobé.

6.3.2 Energie de chauffage du malaxeur

La plupart des calculs théoriques s'intéressent exclusivement à l'énergie de chauffage des granulats et évaporation de l'eau qui représentent la part la plus importante de l'énergie totale. Nous considérons ici l'énergie nécessaire au chauffage de l'air du malaxeur afin d'estimer par la suite sa contribution par rapport à l'énergie totale et affiner le bilan théorique. L'énergie de chauffage du malaxeur sera différente selon la production d'un enrobé tiède ou d'un enrobé à chaud car la température du malaxeur est différente.

Nous donnons les bases du calcul qui a ensuite été implémenté dans le modèle (Annexe C). Ces développements sont issus de discussions avec le M. J. A. Gonzalez Léon (Arkema).

Nous faisons l'hypothèse de granulats secs à l'entrée du malaxeur. L'énergie nécessaire à l'évacuation de l'eau provenant des granulats est prise en considération dans le calcul de l'énergie de chauffage des composants. L'humidité présente est donc celle relative à l'humidité de l'air. Les données initiales nécessaires au calcul sont les suivantes :

- Débit d'air dans le malaxeur Q_{air} [$\text{m}^3_{\text{air}}/\text{h}$]
- Cadence de production d'enrobé P [$\text{t}_{\text{enr}}/\text{h}$]
- Humidité de l'air en entrée H_a [%]
- Température de l'air en entrée T_{ent} [$^{\circ}\text{C}$]
- Température de séchage $T_{\text{séch}}$ [$^{\circ}\text{C}$]

Les différentes constantes sont indiquées dans le Tableau 6-6.

Tableau 6-6 : Constantes utilisées pour le calcul de l'énergie de chauffage du malaxeur

Constante	Unité	Valeur
Pression atmosphérique P_{atm}	Pa	101325
Masse molaire de l'eau M_{eau}	g/mol	18
Masse molaire de l'air M_{air}	g/mol	28.97
Constante universelle des gaz parfaits R	J/mol·K	8.314
Chaleur massique vapeur d'eau C_{p_v}	kJ/kg·K	1.83
Chaleur massique air sec $C_{p_{\text{as}}}$	kJ/kg·K	1.007

L'énergie totale de chauffage du malaxeur, ΔH_{tot} est la somme de l'énergie de chauffage de l'air dans le malaxeur et de l'énergie de chauffage de la vapeur d'eau éventuellement présente selon l'humidité de l'air :

$$\Delta H_{tot} = \Delta H_{air} + \Delta H_{vap} \text{ [kJ/t}_{ent}\text{]}$$

Avec ΔH_{air} Energie de chauffage de l'air [kJ/t_{ent}]
 ΔH_{vap} Energie de chauffage de la vapeur d'eau [kJ/t_{ent}]

L'énergie de chauffage de l'air est calculée ainsi :

$$\Delta H_{air} = m_{air,ent} \cdot C_{pas} \cdot (T_{sor} - T_{ent})$$

Avec $m_{air,ent}$ masse d'air sec à l'entrée [kg/t_{ent}]
 T_{sor} Température de l'air à la sortie [°C]

La température de l'air en sortie T_{sor} est définie par l'expérience acquise lors de mesures en centrales :
 $T_{sor} = 0.8 \cdot T_{séch}$ [°C]

La masse d'air sec à l'entrée $m_{air,ent}$ est exprimée par :

$$m_{air,ent} = \frac{Q_{air}}{P} \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{M_{air}}{1000} \cdot \frac{P_{atm}}{(T_{ent} + 273.15)} \cdot (1 - C_{eau,kg})$$

$C_{eau,kg}$ Concentration d'eau dans l'air [kg_{eau}/kg_{air}]

L'équation ci-dessus peut être vérifiée par un calcul des unités. Les différents paramètres sont connus, à l'exception de la concentration d'eau $C_{eau,kg}$ qui est calculée ainsi :

$$C_{eau,kg} = \frac{C_{eau,mol} \cdot M_{eau}}{C_{eau,mol} \cdot M_{eau} + (1 - C_{eau,mol}) \cdot M_{air}}$$

$C_{eau,mol}$ Concentration d'eau dans l'air [mol_{eau}/mol_{air}]

$C_{eau,mol}$ peut être déterminé par :

$$C_{eau,mol} = \frac{P_{sat,e} \cdot H_a}{100 \cdot P_{atm}}$$

$P_{sat,e}$ Pression de vapeur d'eau à saturation à l'entrée du malaxeur [Pa]

La pression de vapeur d'eau à saturation à l'entrée du malaxeur $P_{sat,e}$ est définie par une relation empirique (approximation de Magnus-Tetens). Cette équation est issue de la relation de Clausius-Clapeyron décrivant de manière générale l'évolution de la pression d'équilibre en fonction de la température d'équilibre au cours d'un changement d'état d'un corps pur :

$$P_{sat,e} = 610.78 \cdot e^{\frac{T_{ent}}{(T_{ent} + 238.3)} \cdot 17.2694}$$

L'énergie de chauffage de la vapeur d'eau ΔH_{vap} est exprimée de la même façon que l'énergie de chauffage de l'air :

$$\Delta H_{vap} = m_{eau,ent} \cdot C_{pv} \cdot (T_{sor} - T_{ent})$$

$m_{eau,ent}$ masse d'eau à l'entrée du malaxeur [kg/t_{ent}]

Les températures à l'entrée et à la sortie ont déjà été définies ci-dessus. La masse d'eau $m_{eau,ent}$ est calculée comme précédemment par la relation :

$$m_{eau,ent} = \frac{Q_{air}}{P} \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{M_{air}}{1000} \cdot \frac{P_{atm}}{(T_{ent} + 273.15)} \cdot C_{eau,kg}$$

Les différents paramètres ont été détaillés dans le calcul de l'énergie de chauffage de l'air.

6.4 Analyse paramétrique de la consommation énergétique et des émissions

L'objectif des calculs est d'identifier et quantifier les aspects déterminants pour la consommation énergétique lors de la fabrication d'un enrobé. Le calcul est principalement axé sur la consommation énergétique. Les émissions de gaz à effet de serre, de même que le coût énergétique sont déterminés sur la base de la consommation d'énergie.

Les hypothèses de base et limites du calcul théorique sont indiquées ci-dessous. Ces hypothèses sont communes à la plupart des calculateurs théoriques existants :

- Système fermé, parfaitement calorifugé : Pas de pertes de chaleur et d'énergie.
- Hypothèses associées à la thermodynamique.
- Travail en flux continu i.e. pas de prise en compte du chauffage de la centrale et des cuves à bitume.
- Brûleur de centrale calibré et optimisé.
- Pas de prise en compte d'éventuels matériaux recyclés.
- La totalité de l'eau est évaporée : Humidité résiduelle de 0% dans l'enrobé.

Analyse paramétrique d'un enrobé à chaud

Sauf mention contraire, nous considérons par la suite que le système ne comporte pas de pertes (rendement théorique de 100%). L'enrobé à chaud AC T 22S fabriqué en laboratoire constitue le cas de référence (Annexe C). Les paramètres de ce cas de base sont résumés dans le Tableau 6-7 où l'on remarquera que le chauffage du parc à liant n'est pas pris en compte.

Tableau 6-7 : Paramètres du cas de référence (enrobé à chaud AC T 22S)

Teneur en eau initiale des granulats	2%
Teneur en eau initiale du sable	5%
Teneur en eau initiale du filler	1%
Températures des granulats	initiale : 15 °C, finale 155 °C
Températures du sable et du filler	initiale : 15 °C, finale 155 °C
Températures du bitume	initiale : 160 °C, finale 160 °C

L'énergie nécessaire à la fabrication de l'enrobé à chaud est de 182 MJ/t. Cette énergie correspond à l'énergie de chauffage et vaporisation, sans prise en compte du chauffage de l'air du malaxeur pour l'instant. La consommation énergétique de chaque composant et fraction granulométrique par rapport au total est indiquée dans la Figure 6-6. Le sable est la fraction nécessitant la plus grande énergie (33% du total). De cette énergie, 54% est utilisée pour l'évaporation de l'humidité du sable.

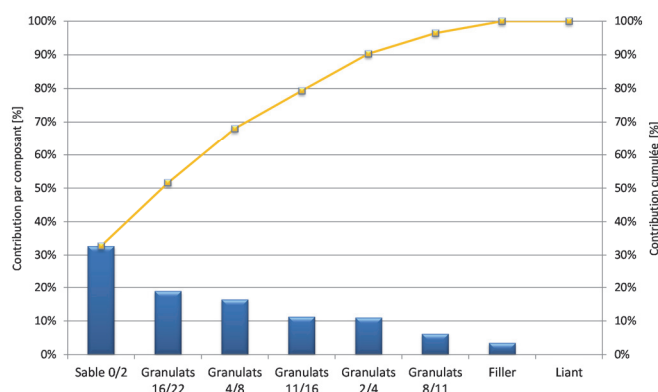


Figure 6-6 : Répartition de l'énergie nécessaire au chauffage des composants (enrobé à chaud AC T 22S)

La température de chauffage du sable ne peut être que faiblement modifiée dans le cas de la production d'un enrobé à chaud. Les fractions de granulométrie fine absorbent et stockent tout particulièrement l'humidité. Des gains considérables peuvent être envisagés au niveau de l'énergie nécessaire pour l'évaporation de l'eau du sable. La Figure 6-7 présente les résultats de l'analyse de sensibilité de la teneur en eau du sable.

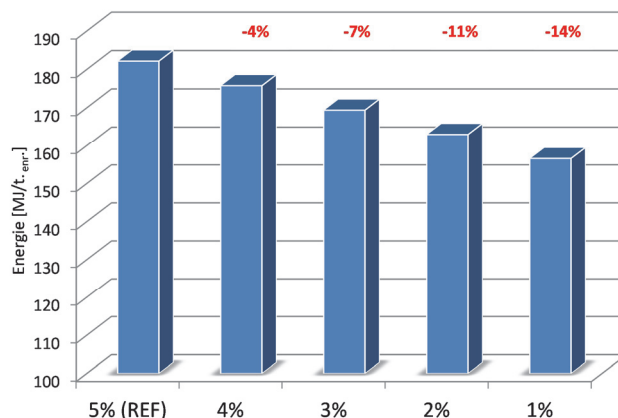


Figure 6-7 : Effet de l'humidité du sable 0/2 sur la consommation énergétique (enrobé à chaud AC T 22S)

Le filler est une fraction absorbant tout particulièrement l'humidité. La variation de la teneur en eau du filler a cependant une influence limitée sur la consommation énergétique totale en raison de la relative faible quantité. Une humidité du filler de 3% ou de 5% augmente la consommation énergétique totale de respectivement 1% et 3% par rapport au cas de référence avec 1% d'humidité.

De même, la température initiale des granulats joue un rôle modéré sur la consommation énergétique totale. Des granulats à la température de 5 °C augmentent la consommation énergétique de 3%. Des granulats à la température initiale de 25 °C diminuent la consommation énergétique de 3% par rapport au cas de référence avec des granulats à la température de 15 °C.

Il n'est pas rare que la température de chauffage des granulats soit augmentée au-delà de 155 °C (cas de référence fabriqué en laboratoire) lors de fabrications en centrale d'enrobage. Ceci est le cas par exemple lors de l'utilisation de matériaux recyclés. Par ailleurs, la normalisation ne fixe pas d'exigences quant à la température de chauffage des granulats. Une augmentation de la température de chauffage des granulats de 25 °C (température finale de 180 °C) engendre une augmentation de la consommation énergétique de 12%. Le chauffage des granulats à 210 °C nécessite quant à lui 26% d'énergie en plus que pour le cas de référence. Cet effet peut donc être une contribution importante à la consommation totale d'énergie (détails en Annexe C).

Toujours pour l'enrobé de référence à chaud, les émissions de gaz à effet de serre peuvent être calculées en fonction de l'allocation énergétique. La Figure 6-8 représente différentes variantes plus ou moins réalistes. Une allocation énergétique avec 10% d'électricité (moteur de la centrale et éventuellement maintien en température des cuves à bitume) et 90% de fioul ou gaz est fréquente. Pour une consommation énergétique identique à la tonne d'enrobé et 10% d'énergie électrique, les émissions sont 30% plus importantes si le fioul est substitué au gaz.

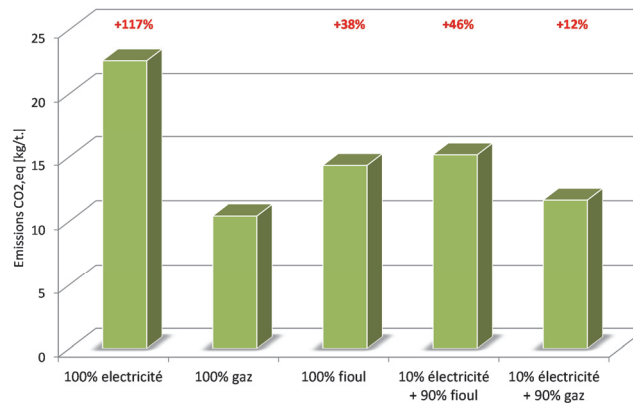


Figure 6-8 : Effet des agents énergétiques sur les émissions (enrobé à chaud AC T 22S)

Enrobés tièdes

L'analyse de sensibilité a été réalisée sur l'enrobé à chaud, mais les tendances restent applicables aux enrobés tièdes. Nous étudions ici les différents enrobés tièdes (ET-C, ET-P et EST) considérés lors de l'analyse performantielle en laboratoire, avec des conditions de fabrication (températures) telles que définies lors de cette analyse. Un enrobé semi-tiède EBT® est également ajouté à l'évaluation. Cet enrobé a été étudié dans le cadre de la recherche (Raess et Pittet 2008). Le procédé consiste à introduire le filler et le sable (fraction 0/4) froids, l'humidité du sable étant ajustée afin d'avoir une humidité totale des granulats de 1.25% avant malaxage. L'enrobé ainsi fabriqué a une température inférieure à 100 °C, diminuant sensiblement la consommation d'énergie. L'humidité et la température initiale des composants des différents enrobés sont identiques à la référence, la différence entre procédés se situant au niveau des températures finales et des éventuels additifs.

Les résultats sont indiqués dans la Figure 6-9 reportant la consommation énergétique, avec et sans prise en compte de l'énergie de chauffage du malaxeur. Nous pouvons relever :

- Sans prise en compte de l'énergie de chauffage du malaxeur, les enrobés ET-C, ET-P et EST présentent une consommation énergétique comparable. Les gains par rapport à l'enrobé de référence varient entre 10% et 12%. D'un point de vue théorique, l'économie d'énergie est donc modérée. Si par contre, l'enrobé de référence est fabriqué avec des granulats chauffés à 210 °C, alors les gains avec la production des enrobés tièdes ET-C, ET-P et EST sont d'environ 30%. Ceci est plus proche des données mesurées en centrale d'enrobage.
- Le calcul de l'énergie de chauffage de l'air du malaxeur est effectué en supposant un débit d'air de 30'000 m³/h et une production d'enrobé de 200 t/h. L'énergie de chauffage de l'air du malaxeur représente entre 11.9 MJ/t pour l'EBT et 20.2 MJ/t pour la référence. La différence entre les enrobés est significative. Cependant, l'énergie de chauffage du malaxeur est faible comparativement à l'énergie totale nécessaire ; elle représente respectivement 10% pour les enrobés REF et EBT, 9% pour les enrobés ET-C et ET-P et 7% pour l'enrobé EST (Figure 6-9).
- Le bilan énergétique total avec prise en compte de l'énergie de chauffage du malaxeur n'est que peu modifié par rapport à la prise en considération seule de l'énergie de chauffage des

composants. C'est pourquoi la composante relative au chauffage du malaxeur est généralement négligée. On observe à nouveau que pour des granulats d'enrobé à chaud « surchauffés » à 210 °C, alors le gain énergétique avec la production des enrobés tièdes est d'environ 30% pour les enrobés EST, ET-C et ET-P et 55% pour l'enrobé EBT.

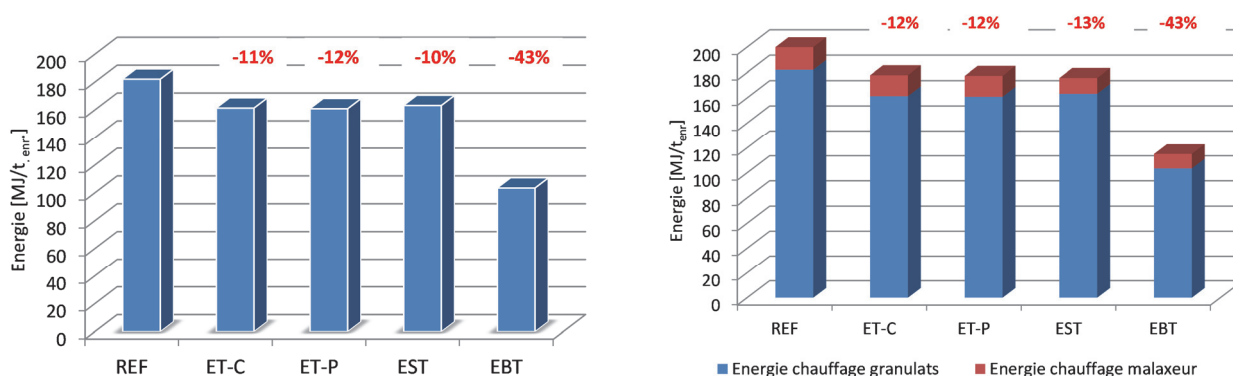


Figure 6-9 : Energie nécessaire à la fabrication des enrobés sans (gauche) et avec (droite) prise en compte de l'énergie de chauffage du malaxeur

Le coût énergétique dépend des sources d'énergie et de leur prix unitaire. Le prix de l'énergie fluctue sensiblement selon la période et la région considérée ; les valeurs reportées ne font office que d'ordres de grandeur. Prenant en considération une centrale d'enrobage 10% électrique et 90% fioul ainsi que les valeurs par défaut du modèle pour le coût de l'énergie (81.39 cts/l de fioul et 20.88 cts/kWh électrique), nous pouvons calculer le prix relatif à chaque type d'enrobé. Le coût énergétique est de 2.79 CHF/t pour l'enrobé EBT, 4.23 CHF/t pour l'enrobé EST, 4.28 CHF/t pour l'enrobé ET-P, 4.29 CHF/t pour l'enrobé ET-C, la référence ayant un coût de 4.88 CHF/t. Ce coût représente uniquement l'énergie consommée. Le prix de l'additif peut s'avérer prépondérant dans le bilan du producteur d'enrobé. Dans le cas de l'enrobé avec cire (dosage 3% de la masse de bitume), le coût de la cire est de 6.50 CHF par tonne d'enrobé produite. L'additif chimique a un coût plus faible (1.10 CHF par tonne d'enrobé), car la quantité utilisée est moins importante (0.4% de la masse de bitume). Ces prix sont également à distinguer du prix de vente du producteur qui englobe l'achat ou le coût d'extraction des matières premières ainsi que leur acheminement, les diverses taxes, l'amortissement et l'achat du matériel, le personnel, etc.

Evaluation du rendement théorique

Prenant en considération les données issues de la littérature, les résultats de l'enquête sur les centrales suisses ainsi que la procédure par calcul, il est possible de déterminer un rendement théorique permettant d'ajuster les calculs afin de correspondre aux différentes sources de données. Le rendement théorique est déterminé sur la base de la consommation énergétique, les données relatives aux émissions étant plus limitées. De plus, les émissions varient selon les sources d'énergie de la centrale. Le rendement proposé ne reflète pas le rendement réel en raison des limitations et hypothèses de base des calculs. La détermination du rendement théorique est faite sur la base de l'enrobé à chaud pour lequel davantage de données sont disponibles.

La Figure 6-10 représente les résultats de l'enquête sur centrales suisses (bleu), les données de la littérature (vert) ainsi que la moyenne de chacune de ces sources de données (trait discontinu). L'enquête sur les centrales fournit parfois différentes valeurs annuelles pour une même installation (Tableau 6-1). Dans ce cas, la donnée reportée correspond à la moyenne des données disponibles pour l'installation concernée.

Le calcul théorique (énergie de chauffage des composants et énergie du malaxeur) est finalement ajusté selon un rendement calculé de manière à correspondre à la moyenne de l'ensemble des valeurs de l'enquête et de la littérature. Un rendement de 65% est déterminé. Notons que si l'on base le rendement théorique exclusivement sur les données de l'enquête ou de la littérature, sa valeur est alors de 56% respectivement 78%. Si le cas de référence est un enrobé à chaud dont les granulats sont montés à la température de 210 °C, alors la consommation énergétique théorique augmente et le rendement théorique également. Un rendement théorique de 83% est calculé pour ce cas, ce qui est proche des rendements annoncés par les exploitants de centrales d'enrobage (généralement entre 75% et 85%).

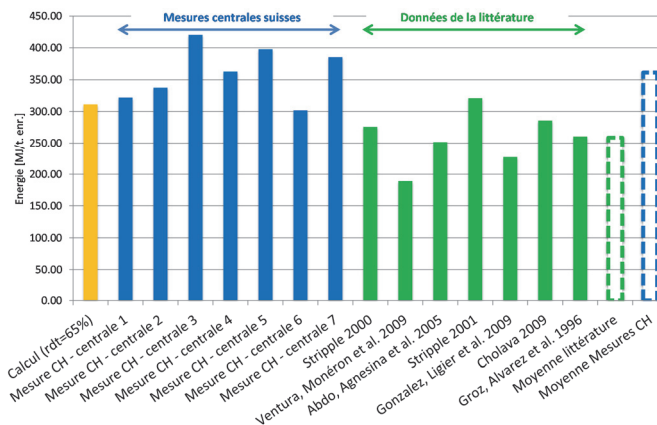


Figure 6-10 : Comparatif de consommation énergétique selon la littérature, enquête centrales suisses et calcul théorique (enrobé à chaud)

6.5 Considérations relatives à l'optimisation des centrales

L'étude théorique ainsi que l'analyse de données des centrales suisses et de la littérature permettent d'identifier les paramètres importants en vue d'une optimisation énergétique des centrales. Nous mentionnons ici quelques aspects (voir également (Bueche 2010)).

Un des paramètres les plus importants et largement reconnus est l'humidité initiale des fractions de sable. En raison de sa surface spécifique élevée et de la tension superficielle, le sable absorbe l'humidité et la conserve (le filler également). L'humidité résiduelle est difficile à évacuer. Le séchage des granulats est nécessaire afin de diminuer l'énergie thermique, mais également pour économiser de l'énergie électrique relative au débit nécessaire à-travers le filtre et l'exhausteur. Afin de travailler avec des granulats les plus secs possibles, des camions bâchés, des wagons protégés ainsi qu'un système de protection des granulats à la centrale sont recommandés. Le toit de protection des tas de granulats à la centrale pourra être optimisé avec :

- l'utilisation d'un toit foncé favorisant l'évaporation de l'humidité,
- un système de ventilation naturelle (circulation de l'air),
- un brassage régulier du tas de sable augmentant la surface de contact avec l'air,
- l'utilisation de panneaux solaires,
- le recours à un plancher bétonné avec pente,
- ...

Un bon séchage du sable permet de réduire la facture énergétique d'environ 10 kWh/t ce qui représente approximativement 10% de la consommation moyenne d'énergie.

Les pertes énergétiques en centrale d'enrobage sont nombreuses. La Figure 6-11 provenant de l'Agence de l'énergie pour l'économie (AEnEC) illustre les pertes dans une centrale d'enrobage (flèches violettes), les flèches rouges correspondant aux apports énergétiques. La consommation moyenne est de

252 MJ/t ; le rendement de la centrale analysée est très faible (35%). Les pertes les plus importantes se situent au niveau de la cheminée, sous forme de vapeur (43% de l'énergie initiale). Cette chaleur perdue pourrait être réutilisée par exemple dans le processus de séchage des granulats ou dans un système de préchauffage de l'air de combustion, ce qui agit directement sur le rendement de la centrale.

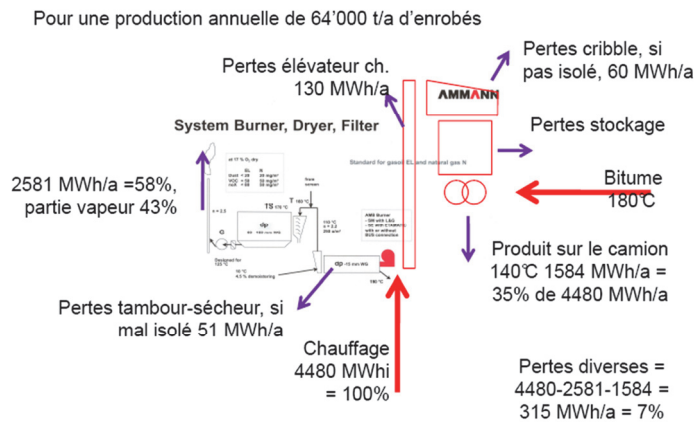


Figure 6-11 : Pertes énergétiques en centrale d'enrobage (Source : AEnEC)

Différentes méthodes peuvent être mises en œuvre afin de diminuer les pertes énergétiques :

- Amélioration de l'isolation de la centrale : Ceci concerne en particulier les cuves à bitume, le hot-stock, les conduites, les élévateurs et le tambour sécheur. Les faiblesses d'isolation peuvent être mises en évidence par des mesures thermographiques. L'utilisation de cuves à bitume verticales permet de diminuer les déperditions en réduisant la surface de contact avec l'air. Les conduites calorifugées sont également un moyen de diminuer les pertes d'énergie en centrale.
- Production continue : Les temps-morts dans la période de production augmentent la consommation énergétique par tonne d'enrobé produite. Ceci est illustré dans la Figure 6-12 où la courbe rouge représente la consommation moyenne de mazout (l/t) selon la production journalière de la centrale et la courbe bleue indique la surconsommation (%), calculée en fonction du nombre de tonnes produites, comparativement à la consommation théorique en centrale. Ces données sont issues de centrales suisses. Cette discontinuité de la production est partiellement indépendante des exploitants de la centrale d'enrobage. Elle est particulièrement importante en Suisse où les quantités produites par chantier peuvent être faibles et le nombre de recettes par centrale généralement élevé.

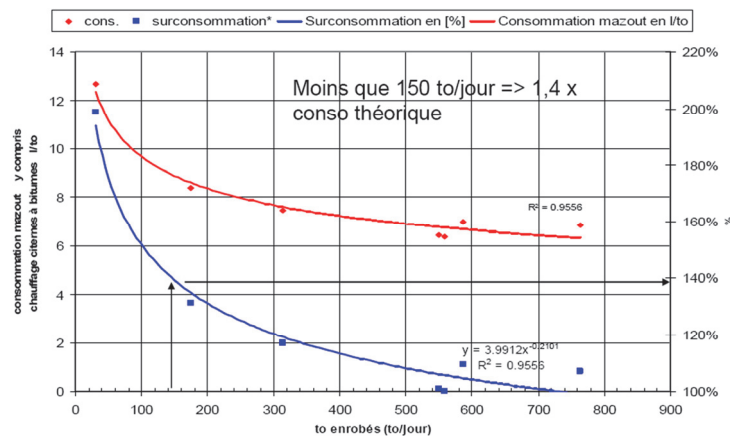


Figure 6-12 : Impact de la production journalière sur la consommation énergétique (Source : AEnEC)

Comme démontré lors de l'analyse de sensibilité, l'impact sur les émissions du type d'énergie utilisée n'est pas négligeable. (Ripoll et Farré 2008) discute des émissions relatives à la production d'enrobé. L'auteur s'intéresse notamment à la réaction de combustion dans le brûleur de la centrale (TSE). Une réaction de combustion complète nécessite certaines quantités d'oxygène pour la réaction d'oxydation : $C_mH_n + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$. De manière générale, des combustibles plus légers et volatiles sont plus efficaces que des combustibles lourds car ils possèdent moins de carbone par unité de chaleur et peuvent brûler avec de plus faibles quantités d'air. Par conséquent, ils produisent également moins d'émissions de CO_2 . L'auteur rapporte un gain de 17% sur les émissions de CO_2 relatives à la production d'une tonne d'enrobé en utilisant du gaz comme combustible au lieu du fioul. Le gaz naturel présente comme autre avantage de ne pas nécessiter de camion de livraison. La taxe de puissance pour le raccordement au gaz peut cependant s'avérer rédhibitoire si elle ne peut être négociée avec les autorités compétentes.

(Marshall et Fifer 2009) effectue une analyse des centrales d'enrobage au Royaume-Uni dans le but d'identifier les opportunités de réduction des émissions de CO_2 . Dans un suivi de quatre centrales, il apparaît qu'en moyenne 47% de l'énergie thermique fournie au brûleur est utilisée dans la procédure de chauffage des granulats et 33% sont utilisés pour l'évaporation de l'humidité des granulats. Les pertes d'énergie les plus importantes (12%) sont sous la forme d'air chaud dans la cheminée. La recherche propose également une liste de 30 opportunités ou thématiques de développement permettant de réduire les émissions de CO_2 . Les opportunités au potentiel le plus élevé sont par ordre d'importance :

- Réduction de l'humidité des matériaux.
- Contrôle du ratio air-fioul dans le brûleur par des mesures d'oxygène et l'utilisation d'un système de suivi.
- Dimensionnement et système de contrôle du sécheur.
- Préchauffage de l'air de combustion en utilisant la chaleur perdue dans la cheminée.
- Réduction du nombre de recettes.
- Production d'enrobés tièdes dans des centrales conventionnelles.

6.6 Enseignements

La fabrication de l'enrobé est une des phases déterminantes de son analyse du cycle de vie. Ce chapitre propose une étude de la consommation énergétique et des émissions en centrale d'enrobage. Des considérations relatives à l'optimisation des centrales sont également effectuées.

L'enquête réalisée auprès de différentes centrales suisses ainsi que les données provenant de la littérature mettent en évidence la très grande variabilité au niveau de la consommation énergétique. Le manque de précisions relatives à chaque mesure empêche une analyse détaillée. Cette variabilité est analysée notamment par un calcul théorique et une analyse de sensibilité. Le modèle de calcul développé ainsi que les différentes données récoltées seront intégrés dans le modèle global d'analyse multicritère élaboré dans la suite de la recherche.

Sur la base de l'analyse de la consommation énergétique en centrale, les aspects suivants doivent être spécifiquement considérés dans le but d'une optimisation :

- Humidité des matériaux granulaires, en particulier le sable.
- Température de chauffage des granulats.
- Calibration du brûleur et analyse du processus de combustion.
- Choix des sources d'énergie.
- Isolation de la centrale et utilisation de conduites calorifugées.
- Type de cuves à liant et isolation.

- Dimensionnement adapté à la production (malaxeur, sécheur, ...).
- Réutilisation de la chaleur perdue dans la cheminée.
- Discontinuités de production (quantités et recettes).
- Utilisation de panneaux solaires.
- Mise en place d'un système de monitoring et contrôle de l'installation.
- Diminution des pertes diverses (pertes structurelles).

Les émissions lors de la fabrication sont régies par un système complexe. Une consommation d'énergie plus faible ne signifie pas nécessairement une diminution des émissions. La calibration du brûleur et le choix des sources d'énergie sont des points particulièrement importants.

La production d'enrobé tiède est une mesure permettant de diminuer de manière conséquente la consommation d'énergie à la centrale d'enrobage. Elle ne s'avèrera utile et efficace que si la centrale fait l'objet d'une réflexion globale concernant son optimisation énergétique. Par exemple, les bénéfices liés à l'utilisation d'enrobé tiède peuvent être annihilés par une humidité trop élevée du sable. La réflexion doit donc se porter sur l'ensemble de la chaîne de production et même, si possible, être intégrée dans le cadre d'une analyse du cycle de vie.

7. ANALYSE DU CYCLE DE VIE

7.1 Contexte et démarche

L'analyse du cycle de vie (ACV ou Life Cycle Analysis/Life Cycle Assessment LCA) s'est progressivement développée depuis les années '70 et la fondation du Club de Rome où l'homme réalise que des limites au développement s'imposent. A cette époque, des études sur la quantification de l'énergie, des matériaux utilisés et des déchets environnementaux sur le cycle de vie d'un produit ou procédé commencent à être menées. Les premiers bilans concernent tout d'abord l'énergie, puis diverses méthodologies ont été développées afin de prendre en compte l'ensemble des émissions dans l'air, l'eau et le sol. Ceci a notamment permis de développer et affiner l'inventaire du cycle de vie (ICV ou Life Cycle Inventory LCI) (Jolliet, Saadé et al. 2005).

Trois organisations œuvrent principalement dans le développement des ACV: l'Organisation Internationale de la Normalisation (ISO), la Société de Toxicologie et de Chimie Environnementale (SETAC) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE). Le SETAC est une association regroupant des universitaires et des industriels. Elle constitue l'instance de réflexion dans le domaine, en amont de la normalisation internationale ISO. C'est au cours des années '90 que la problématique de l'évaluation des impacts, des méthodes d'amélioration et que la définition claire des objectifs dans un cadre technique sont apparues. Les fondements de l'ACV ont été établis en 1993 par le SETAC lors d'un workshop ayant abouti à un code de bonne pratique pour l'inventaire du cycle de vie (Consoli, Allen et al. 1990).

Une analyse du cycle de vie peut avoir différents objectifs:

- Information, acquisition de connaissances

- Comparaison de produits, systèmes ou procédés
- Identification des opportunités d'amélioration dans la chaîne d'un produit (points critiques)
- Sélection d'indicateurs de performance environnementale
- Développement de nouveaux produits, planification stratégique
- Aide à la décision
- Minimisation des déchets
- Développement de réglementation, recommandation ou normes
- Prévisions
- Marketing
- ...

Ce chapitre présente tout d'abord quelques notions théoriques relatives aux méthodes d'analyses environnementales avant de s'intéresser aux contributions dans le domaine de la route. Les sources de données et la liste des émissions à considérer permettent ensuite d'affiner les choix dans l'optique de l'inventaire du cycle de vie qui est effectué dans la dernière partie. L'inventaire du cycle de vie et les indices de performances développés dans ce chapitre (Partie 1 du modèle) ont pour objectif de fournir la méthode et les données d'entrée nécessaires pour les calculs selon l'analyse multicritère (Partie 2 du modèle, chapitre 8).

7.2 Méthodes de base et normalisation

7.2.1 Analyse du cycle de vie et inventaire du cycle de vie

L'analyse du cycle de vie (ACV) appelée également écobilan se définit comme un bilan des émissions polluantes et des extractions de ressources sur l'ensemble du cycle de vie d'un produit, d'un service ou d'un système en relation avec une fonction particulière. Il s'agit de la méthode d'analyse environnementale la plus complète et la plus reconnue. On dit communément que l'ACV considère le produit du berceau à la tombe. Le processus est itératif, car chaque étape peut amener à revoir les résultats de l'étape précédente.

Une ACV ne comprend pas seulement une liste et analyse des émissions, mais une évaluation complète des impacts environnementaux. L'analyse du cycle de vie s'effectue généralement en quatre phases résumées dans la Figure 7-1.

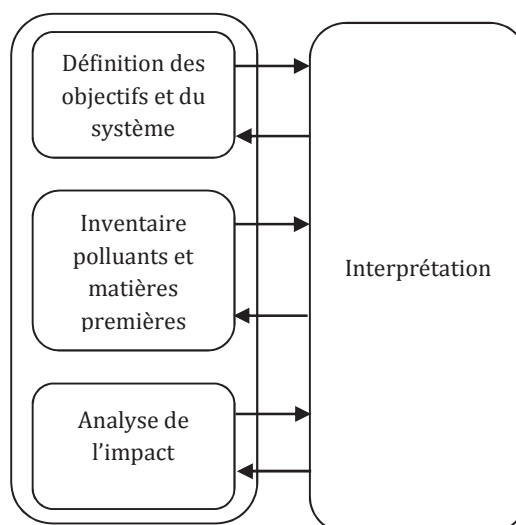


Figure 7-1 : Phases d'une analyse du cycle de vie (selon normes ISO et SETAC)

Définition des objectifs et du système

La phase de « Définition des objectifs et du système » est plutôt descriptive et triviale, mais elle joue un rôle primordial par exemple dans le choix de l'unité fonctionnelle (unité de référence) et de la délimitation des limites du système qui peuvent influencer les résultats finaux.

Inventaire des polluants et matières premières

L'« Inventaire des émissions et des extractions » permet de quantifier les différents flux traversant le système au-travers de l'inventaire. Selon (Jolliet, Saadé et al. 2005), un inventaire complet peut prendre en compte plusieurs centaines de substances et le recueil des données peut donc s'avérer complexe. Pour cela, le recours à des bases de données est souvent indispensable.

Analyse de l'impact

La phase d'« Analyse de l'impact environnemental » consiste à interpréter les données d'inventaire et les relier à leurs impacts sur l'environnement. Les impacts peuvent être complexes à évaluer notamment par le fait qu'une substance (entrée) de l'inventaire des émissions peut être liée à plus d'une catégorie d'impact (par exemple le NO_x qui a un effet sur l'acidification ainsi que l'eutrophisation). Des méthodes d'analyse de l'impact sont utilisées afin de dériver des indicateurs. Ces méthodes consistent à grouper les résultats d'inventaire ayant des effets similaires dans des catégories d'impact à un niveau intermédiaire, appelées catégories intermédiaires. Le terme intermédiaire fait référence à une position entre les résultats d'inventaire et les dommages. Les catégories intermédiaires sont ensuite affectées à une ou plusieurs catégories de dommages ; ces catégories considérant les dommages sur des sujets à protéger. A chaque catégorie intermédiaire correspond un indicateur intermédiaire et à chaque catégorie de dommages correspond un indicateur de dommages. Un exemple de structure de groupement des produits de l'inventaire en catégories de dommages est présenté dans la Figure 7-2. Des structures légèrement différentes peuvent être utilisées selon les méthodes.

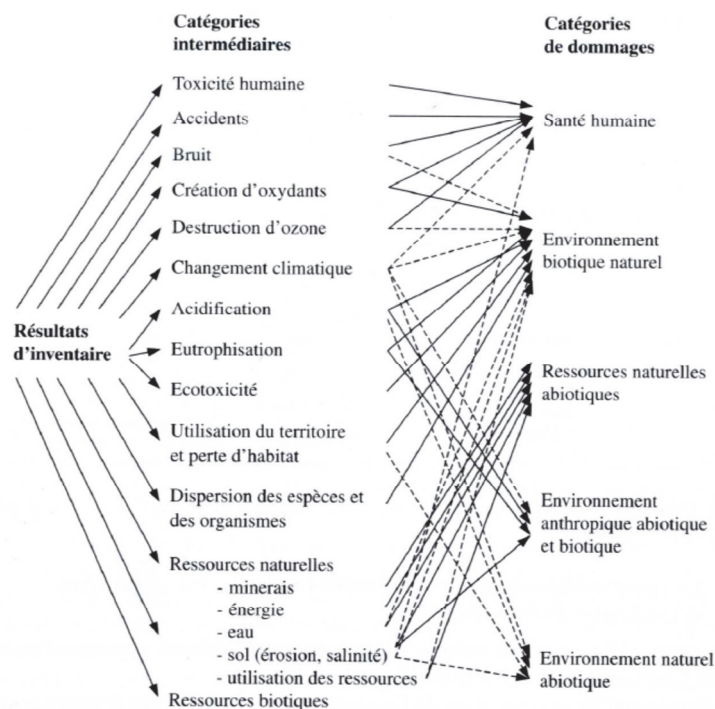


Figure 7-2 : Structure générale pour établissement des catégories de dommage (Jolliet, Saadé et al. 2005)

Selon les normes ISO 14 042, l'indicateur peut être localisé en n'importe quel point entre l'inventaire sur le cycle de vie et la catégorie de dommages. Les méthodes d'analyse d'impacts peuvent globalement être assimilées à l'une des deux écoles suivantes :

- Les méthodes d'analyse d'impacts classiques qui restreignent la modélisation au niveau intermédiaire afin de limiter les incertitudes.
- Les méthodes orientées dommages qui essaient de modéliser l'ensemble de la chaîne jusqu'au point final (dommage), avec parfois de grandes incertitudes.

Il existe de nombreuses méthodes d'analyse d'impacts, aucune ne fait office de référence universelle à ce jour. L'utilisation de différentes méthodes en parallèle est souvent recommandée. On peut citer les méthodes suivantes. Pour davantage d'informations, on pourra consulter (Jolliet, Saadé et al. 2005):

- TRACI
TRACI (Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts) a été développé par l'Agence pour la Protection de l'Environnement américaine. La méthode qui s'arrête aux catégories intermédiaires a été spécialement adaptée au contexte américain.
- Méthode des volumes critiques
Consiste à calculer pour chaque polluant, le volume équivalent pollué jusqu'à atteindre une valeur limite (provenant par exemple de la législation). Cette méthode simple à appliquer souffre de nombreux défauts (persistance, dégradation, dilution des polluants pas pris en compte, on suppose un seul polluant par volume,...) selon (Jolliet, Saadé et al. 2005).
- Ecofacteurs 97 et '06
Compare les flux de substances réels vers l'environnement avec des flux critiques découlant de valeurs cibles définies par la politique environnementale. Les flux de substance réels sont estimés sur la base de données d'émissions. Le calcul de l'écofacteur (EF) dépend du flux critique et du flux réel de la substance ainsi que d'un coefficient. Un score total d'impact S est ensuite déterminé en multipliant cet écofacteur (EF) par les émissions de la substance. Les écofacteurs s'expriment en UBP (Umweltbelastungspunkte), où 10^{12} UBP représentent le flux critique d'un polluant pendant une année.
- Méthode EPS (Environmental Priority Strategies in Product Design)
Cette méthode a été développée initialement en 1989 lors d'une collaboration entre Volvo et l'Institut de Recherche Environnementale suédois (IVL). Elle utilise la notion de « volonté de payer » afin de monétariser les différents types de dommages, le prix étant fixé par rapport à la population actuelle de l'O.C.D.E. Les impacts sont exprimés en unité de charge environnementale ELU (Environmental Load Units)(Steen 1999).
- Méthode Ecoindicateur 99
Première méthode évaluant les dommages au niveau des ressources, de la santé humaine et de la qualité de l'écosystème. La méthodologie (top-down) consiste à partir des dommages pour remonter aux émissions de l'inventaire.
- IMPACT2002+
Développée sous la supervision du Professeur O. Jolliet (EPFL puis Université de Michigan), cette méthode permet l'évaluation au niveau intermédiaire ainsi qu'au niveau des dommages en essayant de tirer parti des avantages des deux familles de méthodes. La méthodologie suit les principes proposés dans l'Initiative pour le Cycle de Vie (partenariat international initié par le SETAC et le PNUE avec pour objectif de

promouvoir les approches scientifiques d'analyse du cycle de vie à-travers le monde). La méthode distingue 14 catégories d'impacts intermédiaires qui sont ensuite regroupées en 4 catégories de dommages (santé humaine, qualité des écosystèmes, changement climatique, ressources). La méthode qui considère les émissions ou ressources sur le long terme (500 ans) propose de nouveaux concepts pour l'évaluation de la toxicité humaine et de l'écotoxicité et suggère une adaptation des méthodes existantes pour les autres catégories (Jolliet, Margni et al. 2003).

Devant la complexité de cette troisième phase d'analyse de l'impact environnemental, certains proposent de comparer les résultats des différents scénarios sur la base du seul inventaire.

Interprétation

La phase d'«Interprétation» se fait à chaque niveau de l'analyse du cycle de vie. Elle sert également de conclusion et recommandation sur la base des résultats obtenus. Elle a pour but d'identifier les étapes sur lesquelles il faudrait intervenir afin de réduire l'impact environnemental du système. C'est également dans cette phase que les analyses de sensibilité et d'incertitude sont conduites.

Par définition, l'analyse du cycle de vie se concentre sur la dimension environnementale et elle ne prend pas en considération les coûts ou d'autres paramètres sociaux, performantiels,...

Afin d'évaluer les coûts de façon cohérente pour un processus de décision, différentes possibilités existent :

- Analyse du cycle des coûts (ACC): Consiste à déterminer les flux financiers sur le même cycle de vie. Il est nécessaire de préciser le type de coûts pris en considération dans l'étude (coûts de recherche et développement, coût de production, salaires, extraction de la matière, énergie, fabrication, frais d'utilisation et de recyclage en fin de vie, ...).
- Analyse coûts-bénéfices (ACB): Mise en parallèle des aspects économiques et environnementaux afin de choisir le scénario optimisant l'investissement initial.

La comparaison des coûts et des impacts environnementaux peut se faire selon différentes méthodes. L'internalisation des coûts externes consiste à exprimer les impacts environnementaux en termes financiers afin de pouvoir les comparer par la suite. Cette procédure de comparaison sera détaillée dans le chapitre relatif à l'évaluation multicritère.

On peut observer ici que la procédure complète d'analyse du cycle de vie est complexe, requiert la connaissance de nombreuses données ainsi que des compétences étendues en matière de chimie et toxicologie. De plus, les deux dernières phases (Analyse de l'impact – Interprétation) ne sont pas définies de manière univoque. C'est pourquoi bon nombre d'analyses se limitent à effectuer un inventaire du cycle de vie (ICV) par un bilan des flux entrants et sortants. L'ICV intègre les différents produits intermédiaires entrant dans la composition du produit fabriqué. **Dans cette recherche, un ICV sera conduit afin de proposer des valeurs par produit pour la réalisation de l'analyse multicritère.**

Une première approximation de l'analyse du cycle de vie peut être effectuée à la main. En raison de la complexité croissante, le recours à des logiciels ou méthodes spécialisées est très vite nécessaire. Différents logiciels spécialisés dans l'ACV sont disponibles. La plateforme de la Commission Européenne sur l'analyse du cycle de vie contient une liste d'une soixantaine de logiciels reconnus pour les ACV. (Curran et Notten 2006) propose également de nombreux logiciels ACV contenant des bases de données d'inventaire du cycle de vie. Nous pouvons mentionner les outils suivants utilisés pour les ACV dans différents domaines:

- BEES®: BEES (Building for Environmental and Economic Sustainability) est un des logiciels ACV/ACC les plus utilisés actuellement. Il a été développé par le NIST (National Institute of Standards and Technology) aux Etats-Unis et contient plus de 200 produits dans sa version 3.0. Le logiciel est utilisé principalement dans le choix de produits de construction en appliquant la procédure ISO 14 040. La méthode TRACI est utilisée pour l'évaluation des impacts.
- SimaPro® (System for Integrated Environmental Assessment of Products): logiciel offrant une grande flexibilité et facilité d'utilisation, largement utilisé dans l'industrie et les milieux académiques. L'évaluation des impacts peut être faite selon une dizaine de méthodes à choix.
- GaBi® (Ganzliche Bilanzierung): Un des logiciels les plus utilisés pour l'ACV. Il permet de faire le calcul de l'empreinte carbone et aide l'utilisateur dans la procédure d'agrégation des données. Le logiciel possède en particulier une base de données complète continuellement mise à jour sur la base de coopérations avec l'industrie, de patentes et de la littérature technique. Le logiciel et la base de données sont des entités indépendantes, ce qui permet par exemple d'importer les données Ecoinvent. L'évaluation des impacts peut être faite selon différentes méthodes à choix (Ecoindicateur, IMPACT2002+, TRACI,...).

L'empreinte carbone (carbon footprint) représente la quantité de CO₂ et autres gaz à effet de serre (GES) associés à un produit, un bien ou un service. Elle est déterminée en effectuant un inventaire du cycle de vie limité aux émissions ayant un impact sur le changement climatique.

7.2.2 Autres méthodes d'analyse environnementale

Il existe de nombreux instruments d'analyse environnementale pouvant être utilisés dans le cadre d'un processus de décision tels que les méthodes conceptuelles (eco-conception, métabolisme industriel) ou les procédures (système de management environnemental, ecolabel, audit environnemental). L'analyse du cycle de vie (ou l'inventaire du cycle de vie) est un des instruments à disposition. Elle présente différentes caractéristiques qui la distinguent des autres méthodes d'analyse environnementale.

Le Tableau 7-1 illustre différentes méthodes d'analyse environnementale à disposition : analyse de flux de substance (AFS), étude d'impact environnementale (EIE), analyse de risque (AR) et calculateur de gaz à effet de serre (GES calc.). Le choix de la méthode influence par la suite les résultats de l'étude.

Tableau 7-1 : Comparatif entre quelques outils d'analyse environnementale

Outils	Objets traités	Echelle géographique	Etapes traitées	Outputs	Indicateurs
ACV	Produit, service, système	Globale ou régionale	Totalité du cycle de vie	Impact environnemental, bilan de masse	Quantitatifs
AFS	Une substance polluante	Régionale ou globale	Cycle de la substance	Bilan de masse	Quantitatifs
EIE	Construction d'une installation (ex: tracé)	Régionale, locale (site spécifique)	Utilisation de l'installation (pas de cycle de vie)	Variables selon les auteurs et réglementations utilisées	Qualitatifs (majoritairement)
AR	Installation ou substance chimique	Locale ou régionale	Période définie	Evaluation de l'effet	Quantitatifs et/ou qualitatifs
GES calc.	Construction d'une installation (ex: route)	Locale ou régionale	Totalité du cycle de vie (selon auteur)	Gaz à effet de serre (CO ₂ équivalent)	Quantitatifs

L'Etude d'impact sur l'Environnement (EIE), pour laquelle la loi suisse fixe le champ d'application dans une ordonnance, est une des méthodes les plus utilisées. L'approche d'une EIE est conduite généralement par étapes qui se différencient selon le niveau d'avancement du projet et le contenu du rapport qui est fourni (Hertig 2006).

La méthode d'analyse du cycle de vie décrite dans ce travail de thèse est la méthode ISO 14 000 (process-based approach). D'autres méthodes d'ACV ne suivant pas rigoureusement les exigences ISO existent. Les méthodes hybrides se focalisant sur certains processus unitaires ou la méthode « Economic Input-Output model (EIO-LCA) » sont parfois appliquées. La méthode EIO-LCA est basée sur des transactions monétaires inter-industries ou des données économiques (input-output). Les différentes relations industrielles y sont modélisées sous la forme de matrice. (Hendrickson, Horvath et al. 1997) propose une comparaison détaillée entre la méthode EIO-LCA et la méthode traditionnelle (ISO) issue des recommandations du SETAC. Il effectue également un exemple de calcul dans lequel les méthodes aboutissent à des résultats finaux comparables, mais avec des différences conséquentes dans les méthodes empêchant une comparaison directe.

7.2.3 Normalisation et organisations internationales

La prise en compte des notions environnementales et plus spécifiquement de l'analyse du cycle de vie peut être trouvée à différents niveaux.

Les normes ISO (organisation internationale de normalisation) de la famille ISO 14 000 traitent du management environnemental. La norme ISO 14 040 « Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadres » contient les caractéristiques principales de l'ACV et un guide de bonnes pratiques. L'analyse du cycle de vie est ensuite règlementée dans la norme ISO 14 041 (Analyse du cycle de vie – Définition de l'objectif et du champ d'étude et analyse de l'inventaire), ISO 14 042 (Evaluation de l'impact du cycle de vie), ISO 14 044 (Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices) et ISO 14 047 (Analyse du cycle de vie – Evaluation des impacts). La famille des normes ISO est générale et peut servir de base à des documents plus détaillés (normes nationales). Les différentes méthodes d'évaluation des impacts proposées respectent ces exigences et lignes directrices ISO.

La législation fédérale Suisse fournit également les bases légales dans une perspective d'évaluation des impacts sur l'environnement. La Loi fédérale sur la protection de l'environnement du 7 octobre 1983 mentionne au chapitre 3 la nécessité d'une étude d'impact sur l'environnement (EIE) pour « *les installations susceptibles d'affecter sensiblement l'environnement, au point que le respect des dispositions en matière d'environnement ne pourra probablement être garanti que par des mesures spécifiques au projet ou au site* ». Pour cela, la loi demande l'établissement d'un rapport relatif à l'impact sur l'environnement (RIE) servant de base à l'appréciation du projet. Le champ d'application de l'EIE est détaillé dans l'Ordonnance relative à l'étude d'impact sur l'environnement (OEIE) du 19 octobre 1988. Cette ordonnance détaille les objets soumis à l'EIE ainsi que la procédure d'exécution. Ces différents éléments législatifs suisses ainsi que la législation internationale sont détaillés dans (Hertig 2006).

L'association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS) apporte également sa contribution à l'évaluation des projets d'un point de vue environnemental avec la norme SN 641 800 « *Evaluation des projets d'infrastructure routière du point de vue du développement durable* » de février 2008 et la norme SN 640 405 « *Matériaux de construction pour la superstructure routière – Sécurité de circulation, sécurité de travail/protection de la santé, environnement* » publiée en 2011.

Au niveau européen, la première approche relative au développement durable se trouve dans le Traité de Rome de la Commission Economique Européenne (CEE) de 1957 dans lequel les Etat membres déclarent « *avoir pour but essentiel l'amélioration constante des conditions de vie et d'emploi de leur peuples* ». La première Conférence des Nations Unies sur l'environnement (Stockholm, 1972) a pour la première fois centré l'attention internationale sur les questions d'environnement, en particulier la « *pollution transfrontière* ». L'augmentation de la préoccupation environnementale au niveau international s'est traduite au fil des années par différentes conférences, rapports (position papers) et traités (protocole de Kyoto par exemple). La Commission Européenne a établi une plateforme sur l'analyse du cycle de vie visant l'harmonisation des procédures, des données et des outils tout en respectant les normes ISO. Les différents éléments proposés ont pour objectif d'assurer la qualité et la consistance des données, ainsi que de fournir des méthodes d'évaluations.

De nombreuses conférences et projets sont actuellement consacrés à l'analyse du cycle de vie. Dans le domaine des chaussées routières, on peut citer récemment un workshop de l'Université de Californie, spécialement dédié au cycle de vie des chaussées (Harvey, Santero et al. 2010). A cette occasion, des lignes directrices pour une réalisation harmonisée d'analyses du cycle de vie ont été esquissées et les lacunes en terme de connaissances spécifiques à la route discutées.

7.3 Applications au domaine de la route

Après avoir exposé les méthodes et particularités de l'analyse du cycle de vie et de l'inventaire du cycle de vie, ce chapitre est consacré aux applications relatives au domaine de la construction routière. Une analyse de quelques exemples est proposée dans un premier temps avant de parcourir des méthodes et outils couramment utilisés.

7.3.1 L'ACV dans les projets routiers

Les premières ACV étaient initialement focalisées sur le milieu des emballages, avant de se porter sur l'ensemble des secteurs économiques. Le domaine de la construction routière est également particulièrement concerné, l'importance d'une prise de conscience environnementale ayant été mise en évidence par (Blomberg 2000). La démarche d'ACV d'une route permet d'identifier les phases dominantes et le potentiel d'amélioration, mais elle peut également servir d'argumentaire pour

l'utilisation d'une technologie plutôt qu'une autre. Le Tableau 7-2 fournit de manière non exhaustive quelques exemples d'ACV/ICV pour projets routiers.

Tableau 7-2 : Exemples d'études ACV/ICV dans le domaine routier

Référence	Objectif de la recherche	Unité fonctionnelle	Limites du système	Type de données	Impacts - Résultats	Commentaires
(Stripple 2001)	ICV d'un projet de construction de route (méthodologie et analyse préliminaire)	1 km de route, 40 ans	Production, construction, opérations multiples, maintenance, trafic (estimation)	Mesures des processus ou données de compagnies	Energie, NO _x , SO ₂ , CO ₂ par km·40 ans	Hypothèses pour le trafic
(Häkkinen et Mäkelä 1996)	ACV pour comparaison de chaussées en béton et bitumineuses	1 km de route, 50 ans	Fabrication, pose, construction, salage, trafic et maintenance (diff. stratégies)	Recueil auprès des compagnies (ex. moyennes nationales)	Inventaire puis analyse des impacts (Ecoscarcity, EPS)	Evaluation varie selon méthode d'analyse d'impact
(Groz, Alvarez et al. 1996)	Comparaison enrobé chaud et froid pour une route donnée	10'000 m ² , 20 ans	Fabrication enrobé, mise en oeuvre	Données de fournisseurs	Energie, consommation mat. première et réserves naturelles	Première étude comparative, pas de prise en compte des aspects écologiques
(Hassan 2009)	Comparaison ACV enrobé tiède et chaud	1 t. d'enrobé	Production du bitume et des granulats, transport, fabrication en centrale, pose de l'enrobé	Différentes recherches, documents gouv. et bases de données	Inventaire (énergie, matériaux, émissions) & analyse de l'impact (BEES)	Nombre limité de données mis en évidence
(Bilal et Chappat 2003)	Comparaison de différentes chaussées	1 t. de matériau, 30 ans	Extraction mat. première à la pose, entretien et maintenance	Données de recherches (IVL, Athena,...)	Energie et émissions (GES)	Hypothèses de dimensionnement, transport
(Abdo, Agnesina et al. 2005)	ACV de 6 structures (béton de ciment et bitumineux)	1 km de route, 30 ans	Fabrication jusqu'à démolition et traitement des déchets	Données d'associations, recherches	Inventaire d'énergie et émission puis impacts (12 indicateurs)	Hypothèses sur trafic, dimensionnement, maintenance
(Cholava 2009)	Comparer impacts de la construction et de la maintenance	1 km de route, 25 ans	Construction de la chaussée et différentes stratégies de maintenance	Bases de données, récolte de données et littérature	Inventaire d'énergie et d'émissions par km de route	Chaussées bitumineuses seules
(Mroueh, Eskola et al. 1999)	Procédure claire et fonctionnelle pour ICV de construction de routes	1 km de route	Production et transport des matériaux, mise en place et utilisation	Données locales et finlandaises en priorité, évt. données internationales	Energie, émissions (air-eau-sol), bruit, déchets inertes	Cas finlandais, marquage, maintenance, trafic non considérés
(Jullien, Ventura et al. 2004)	ICV d'une construction avec matériaux recyclés	Production de 100 t. pendant 1 h.	Matériaux bruts, transport, production d'enrobé, construction	Mesures et données littérature ((Stripple 2001), Eurobitume)	Energie, émissions (air-eau), ressources nat., déchets solides	Cas spécifique avec mesures à la centrale et lors de la pose

(Meil 2006)	Comparaison de chaussées en enrobé et béton (ICV)	1 km de route, 50 ans	Construction de la route, maintenance	Données canadiennes (ministère, compagnies,...)	Energie et GWP (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O)	Cas spécifique Canada, hypothèses de limites de l'étude et maintenance
(NTUA 2006)	ACV d'une route à Limassol (Chypre)	1 km de route urbaine (Chypre), 50 ans	Préparation matériaux, construction, maintenance, démolition	Données de compagnie, GaBi® et littérature	Analyse d'impacts avec GaBi®	Cas spécifique d'une route (Chypre), hypothèses de maintenance
(Zapata et Gambatese 2005)	ICV pour comparaison entre chaussée rigide et souple	1 km de route haut débit (USA)	Extraction matériaux, fabrication, pose, maintenance, démolition, recyclage	Entreprises de construction, littérature	Energie	Pas de prise en compte des émissions ni du trafic
(Treloar, Love et al. 2004)	ICV construction et utilisation d'une route	5 km de route rurale, 10'000 vhc/jour (10% PL), 20/40 ans	Construction, maintenance, remplacement de la route ; construction, utilisation, maintenance des vhc	Données littérature (Australie)	Energie	Cas Australien, considère les vhc
(Horvath et Hendrickson 1998)	ICV pour comparaison entre chaussée rigide et souple	1 km de route, autoroute USA	Extraction matériaux, construction	Données littérature et agence gov. (USA)	Emission réparties en catégories de dommages	Prise en compte des coûts, méthode EIO-LCA
(Weiland et Muench 2010)	Comparaison de 3 options de reconstruction (Washington)	1 voie, 1 mile, 12 ft largeur, 50 ans	Enlèvement chaussée existante et reconstruction	Agence gov. (USA), littérature, modèles	Impacts selon TRACI (5 cat.)	Pas d'évaluation des coûts, trafic pas considéré
(Blomberg, Boussad et al. 1999)	Eco-profil pour la production bitume européen standard	1 kg bitume 50/70	Extraction du pétrole jusqu'au stockage à la raffinerie (Europe)	Raffineries, Mesures, autres recherches (Stripple 2001)	Energie et émissions (air-eau-sol) par kg de bitume	Hypothèses distillation directe, provenance du pétrole, localisation et taille raffinerie
(Nikkonen 1996)	ACV (ICV) du bitume	1 kg bitume	Extraction pétrole, transport et raffinerie	Données recueillies (compagnies et raffineries)	Energie et émissions par kg de bitume	Hypothèse provenance pétrole, localisation raffinerie

Les premières ACV sérieuses de chaussées routières ont été effectuées vers la fin des années '90. On retrouve des publications lors du congrès Eurasphalt & Eurobitume de 1996. Par exemple, (Groz, Alvarez et al. 1996) effectue un inventaire comparatif entre un enrobé à chaud et un enrobé à froid. Les résultats ne permettent pas de détacher clairement un type d'enrobé, mais ils mettent en évidence les effets de l'utilisation de produits chimiques dans la filière à froid et la complexité de la méthode. L'auteur ne fait pas d'analyse écologique étant donné le manque d'éléments et d'expérience.

La recherche de (Häkkinen et Mäkelä 1996), financée par l'industrie du ciment nordique, effectue une analyse du cycle de vie et quantifie les impacts environnementaux de chaussées en béton et bitumineuses. Les résultats obtenus pour les deux types de chaussées sont proches, ils se distinguent par les substances nocives dominantes selon qu'il s'agit d'une chaussée rigide ou souple. L'auteur illustre également la variabilité des résultats selon la méthode d'analyse d'impact utilisée. L'importance

de la teneur en ciment sur l'impact environnemental d'une chaussée rigide ainsi que la part prépondérante des émissions relatives à la production comparativement aux phases de construction et maintenance de la chaussée ont également été mis en évidence. Ceci reste cependant faible en regard des émissions liées au trafic sur la durée de vie de 50 ans.

Un des premiers inventaires du cycle de vie complet a été effectué par (Stripple 2000) suite à une demande de l'EAPA (European Asphalt Pavement Association) et de Eurobitume, avec pour objectif d'approfondir la connaissance des aspects énergétiques et environnementaux du processus de fabrication, construction, pose et maintenance d'une chaussée routière. Ce travail s'est concentré sur l'inventaire de l'énergie et des émissions et a permis d'établir une première feuille de calcul. (Stripple 2001) effectue ensuite une analyse complète d'une route sur l'ensemble de son cycle de vie, étude qui fait suite à sa première recherche. Cette recherche très complète inclut l'extraction des matériaux de base, la préparation du chantier (élagage, terrassement,...), la production des matériaux, la construction (y-compris marquage, signalisation, barrières de sécurité, éclairages), la maintenance ainsi que l'exploitation de la chaussée (enlèvement de la neige, salage, nettoyage des bordures,...). La contribution du trafic est estimée pour un calcul illustratif, mais elle n'est pas intégrée dans l'analyse de base. Deux types de chaussées bitumineuses (enrobé froid et enrobé à chaud) ainsi qu'une chaussée en béton de ciment sont comparées dans cette recherche. Le résultat obtenu est très complet et se distingue notamment par la qualité et l'exhaustivité des données utilisées. Les données (mesures, enquêtes auprès de compagnies) sont dans la mesure du possible issues du contexte suédois et en partie tirées de la première recherche. Ce travail est une des premières études conséquentes sur la thématique et a permis d'établir une feuille de calcul ACV dynamique. Dans ses résultats, l'auteur indique que la consommation énergétique sur la durée de vie (40 ans) est légèrement plus importante pour une route en béton (27 TJ/km) par rapport à une chaussée bitumineuse (23 TJ/km). La majeure partie de cette énergie consommée provient de l'exploitation (énergie électrique pour lumières et panneaux) (Figure 7-3). Pour les émissions et en particulier le CO₂, l'activité dominante est la phase de construction, avec des émissions plus importantes dans le cas de chaussées en béton (Figure 7-4). Notons que ces figures n'intègrent pas le trafic. Ce travail et ses différentes données sont ensuite repris par de nombreuses recherches.

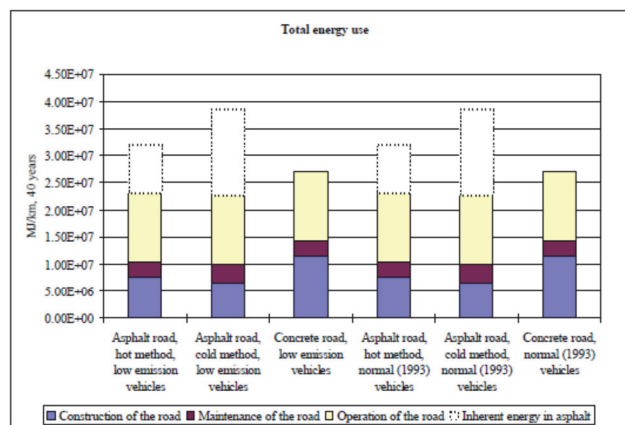


Figure 7-3 : Consommation totale d'énergie pour différents types de chaussées et deux types d'engin de construction (1 km, 40 ans) (Stripple 2001)

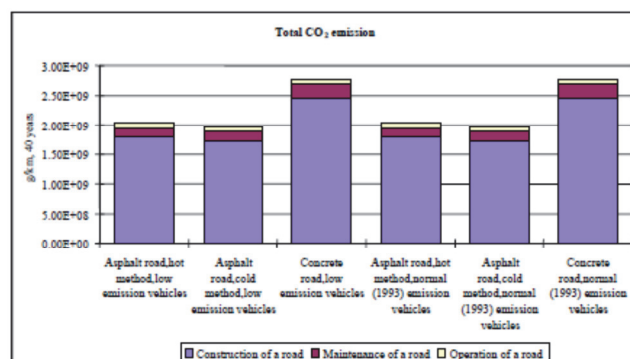


Figure 7-4 : Emissions de CO₂ pour différents types de chaussées et deux types d'engins de construction (1 km, 40 ans) (Stripple 2001)

En plus de ces études relativement complètes pour lesquelles un accent particulier a été mis sur la récolte des données, de nombreuses recherches proposent des analyses ou inventaires du cycle de vie réduites ou basées sur des données existantes.

- Le projet européen ECRPD (Energy Conservation in Road Pavement Design, Maintenance and Utilisation) est un projet de l'IEEA (Intelligent Energy Executive Agency), représentante de la Communauté Européenne. Le projet regroupe 12 partenaires et fait suite à une première recherche. ECRPD a pour but l'étude des économies d'énergie dans la maintenance des chaussées et l'utilisation des véhicules. Un paquet de recherche (WP 6) est dédié à une analyse du cycle de vie de différents enrobés bitumineux (Cholava 2009). Le modèle développé analyse particulièrement différentes stratégies de maintenance. Selon l'auteur, la phase de production de l'enrobé est la plus gourmande en énergie (92.4 – 92.9%), le transport représente environ 5.7 – 6.3% de l'énergie et le reste est attribué à la pose.
- (Mroueh, Eskola et al. 1999) propose une méthode pour l'inventaire sur le cycle de vie dans le cas spécifique de la Finlande. La recherche mentionne la difficulté d'obtenir des données, en particulier dans le cas de produits non conventionnels ou récents. La prise en compte de valeurs moyennes d'émissions limite la précision des calculs.
- (Bilal et Chappat 2003), repris dans (Chappat et Bilal 2004) propose un inventaire sur le cycle de vie de différentes chaussées dimensionnées selon la méthode française. L'étude montre que pour un enrobé à chaud, la production du liant et la fabrication en centrale sont les phases émettant le plus de GES. Sur la durée de vie de 30 ans, la consommation d'énergie et émissions relatives au trafic sont de 15 à 100 fois plus importantes que celles relative à la construction et maintenance de la chaussée. Cette recherche est une des bases de la création de l'Ecologiciel® Colas.
- (Abdo, Agnesina et al. 2005) est une étude comparative entre différents types de chaussées (béton et bitumineuses), réalisée par CIMBéton (Centre d'information sur le ciment et ses applications). Les impacts sont évalués sous la forme de douze indicateurs environnementaux. Un comparatif entre les indicateurs pour structures en béton et bitumineuses montre que la structure bitumineuses est plus favorable pour les indicateurs déchets solides, gaz à effet de serre, eutrophisation et toxicité humaine et défavorable pour les autres indicateurs (Figure 7-5). Cette recherche montre également que sur le cycle de vie complet, la phase de construction, entretien et fin de vie est très faible comparativement aux impacts de la circulation.

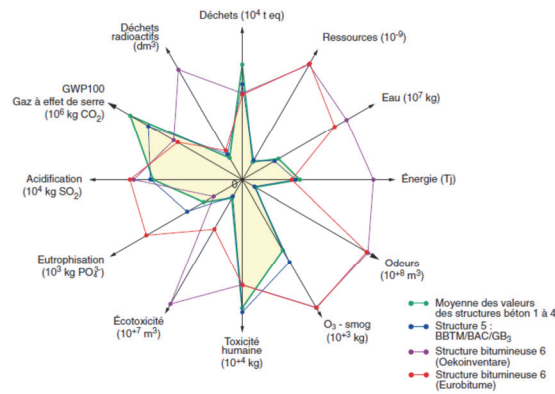


Figure 7-5 : Comparaison des impacts environnementaux entre des structures en béton et bitumineuses (Abdo, Agnesina et al. 2005)

- (Jullien, Ventura et al. 2004) propose un inventaire du cycle de vie d'un chantier avec différents taux de matériaux recyclés (0 à 30%) pour un cas réel, permettant ainsi de mesurer les émissions lors de la fabrication. Les mesures d'émissions après la pose sont effectuées à l'aide d'une « chambre de mesure » spécifiquement développée (voir chapitre 6.2). La tendance globale indique des différences significatives entre les matériaux, avec une diminution de la consommation énergétique et des émissions lorsque le taux de matériaux recyclés augmente, mais par contre une augmentation de la consommation d'autres ressources (eau par exemple).
- L'institut Athena, spécialisé dans l'évaluation des impacts environnementaux (ACV) du domaine de la construction, a réalisé de nombreuses recherches ainsi que développé différents outils. (Meil 2006) a été effectuée sur demande de l'association des cimentiers du Canada afin de comparer des chaussées bitumineuses et des chaussées en béton de ciment, dans le contexte Canadien. D'un point de vue énergétique, une distinction est faite entre la prise en compte ou non du produit en tant que matière énergétique (« feedstock energy » qui représente la valeur énergétique d'un matériau qui n'est pas utilisé en tant qu'énergie, par exemple le bitume). Sans prise en compte de la valeur énergétique des enrobés, les chaussées bitumineuses consomment selon cette étude entre 31% et 81% d'énergie en plus. Cette différence diminue légèrement avec l'utilisation de matériaux recyclés. La comparaison des émissions (Potentiel de Réchauffement Global – PRG) est également en faveur des chaussées en béton avec des différences entre 1% et 7%. Compte tenu de l'incertitude sur l'ICV estimées à 10%, cette différence n'est pas considérée comme significative. Ces résultats présentant les chaussées rigides comme avantageuses énergétiquement sont en contradiction avec d'autres auteurs discutés plus loin ; la différence se situant au niveau des hypothèses et données de base.
- Une comparaison des impacts entre chaussées bitumineuse et béton de ciment est également effectuée par (Zapata et Gambatese 2005). Dans une analyse bibliographique, la recherche met en évidence la différence pouvant être favorable aux chaussées souples ou rigides selon les auteurs et leurs hypothèses de base associées. Il mentionne aussi les nombreuses hypothèses ou incertitudes : durée de service et son influence sur la stratégie de maintenance, prise en compte de la consommation d'eau, provenance des données utilisées,... Pour une durée de vie équivalente, la chaussée en béton demande davantage d'énergie (21%) pour les phases d'extraction des matériaux, fabrication du mélange et pose de l'enrobé. La fabrication du bitume requiert moins d'énergie que la production du ciment.
- (NTUA 2006) effectue une analyse du cycle de vie avec évaluation des impacts à l'aide de GaBi® pour un cas précis de construction de route à Chypre. Selon l'analyse, les impacts sont

équitablement répartis entre la phase de construction et la phase de maintenance sur la durée de vie.

- L'étude menée par (Treloar, Love et al. 2004) prend en considération le cycle de vie des véhicules (construction, utilisation, maintenance) utilisant le tronçon de route sur la durée de vie de la chaussée. L'inventaire est fait selon une méthode hybride dans laquelle des données spécifiques au cas étudié sont utilisées pour les processus unitaires déterminants. Les résultats montrent qu'en fin de vie, 10% de l'énergie totale peut être imputée à la construction et maintenance de la chaussée. L'énergie restante est répartie entre la construction (et maintenance) des véhicules pour 28% et 62% pour l'exploitation des véhicules sur le tronçon de route. Compte tenu des hypothèses spécifiques, ces résultats sont comparables avec le calcul de (Stripple 2001) qui obtient une proportion d'énergie pour la construction située entre 4.9% et 11.8% comparativement à l'énergie utilisées par le trafic sur le même tronçon.
- (Hassan 2009) propose un inventaire du cycle de vie comparatif entre un enrobé tiède et un enrobé à chaud. Sur la base de cet inventaire, une analyse environnementale et économique est appliquée. L'analyse de l'impact est effectuée selon le modèle BEES 4.0 (Building for Environmental and Economic Sustainability). Ce modèle quantifie l'impact d'un produit sur l'environnement par l'intermédiaire de douze différents impacts environnementaux dont le réchauffement global (CO₂ comme substance de référence), l'acidification, le potentiel d'eutrophisation,... La performance économique est ensuite évaluée en déterminant le coût d'achat, d'installation et de maintenance des différentes techniques. La balance entre les performances économiques et environnementales est finalement faite en les combinant dans un score unique selon une méthode multicritère d'aide à la décision (MADA). Cette recherche conclut qu'une réduction de 24% de l'impact sur la pollution de l'air et 18% sur la consommation de combustible fossile peut être atteinte avec le recours aux enrobés tièdes. L'auteur mentionne également le nombre limité de données prises en compte lors de l'analyse des résultats.

D'autres études s'intéressent à un seul processus unitaire déterminant. Par exemple, (Nikkonen 1996) puis (Blomberg, Boussad et al. 1999) proposent un inventaire du cycle de vie de la production d'un liant bitumineux 50/70 en Europe.

Ces différents exemples illustrent la diversité des études conduites depuis le milieu des années '90 ainsi que la variabilité dans les résultats obtenus. Cette différence est liée aux bornes des systèmes et aux hypothèses de base (trafic, type de route, dimensionnement,...), mais également au type de données utilisées. La variabilité des résultats obtenus selon les hypothèses de base est illustrée par (Anderson, Weiland et al. 2011) qui compare la consommation énergétique (Figure 7-6) et les émissions de CO₂ (Figure 7-7) pour différents cas issus de la littérature. On peut finalement évaluer une valeur raisonnable de consommation énergétique entre 2 et 4 TJ/km selon le type de chaussée et matériau.

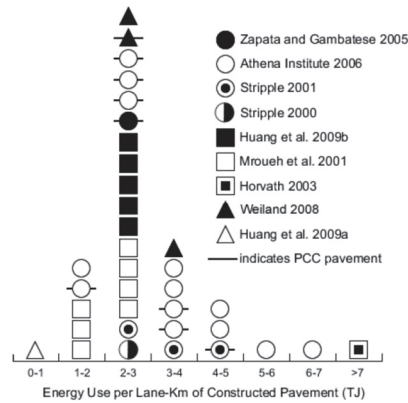


Figure 7-6 : Distribution de l'énergie nécessaire selon différentes études ACV/ICV (Anderson, Weiland et al. 2011)

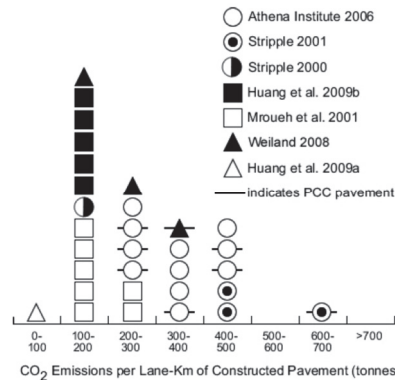


Figure 7-7 : Distribution des émissions de CO₂ selon différentes études ACV/ICV (Anderson, Weiland et al. 2011)

De nombreux travaux effectuent une comparaison entre chaussée souple et rigide. Les conclusions sont parfois contradictoires et il est difficile de déterminer sur cette base le type de chaussée le plus avantageux. (Horvath et Hendrickson 1998) illustre ceci avec des résultats de consommation énergétique pour la construction d'une route en béton allant de 70 MJ/t à 6000 MJ/t selon les auteurs (Figure 7-8). La comparaison de familles de chaussées est particulièrement difficile en raison des hypothèses de durée de vie et des stratégies de maintenance (type et fréquence) ainsi que de l'incertitude sur les données d'inventaire.

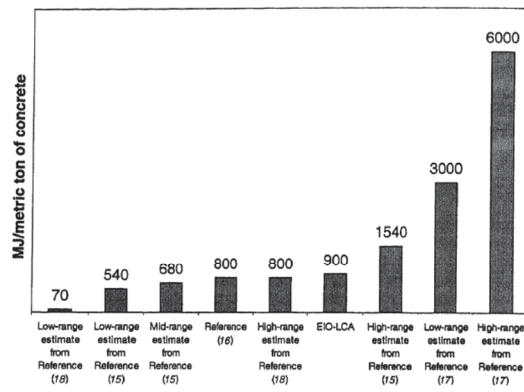


Figure 7-8 : Comparaison de l'énergie nécessaire pour le béton (armature non considérée)

(Muench 2010) propose une revue de 14 publications (66 cas calculés) traitant de l'analyse du cycle de vie de routes. Il observe notamment :

- L'énergie totale utilisée lors de la construction varie mais se situe en général entre 3-7 TJ/voie-mile (1 mile=1.61 km).

- Les émissions de CO₂ varient mais se situent en général entre 200-600 t/voie-mile.
- La production de matériaux (enrobé, bitume, granulats) correspond à environ 60-80% de la consommation énergétique et 60-90% des émissions de CO₂ associées à la construction.
- L'énergie utilisée pour la construction de la route correspond approximativement à l'énergie consommée par le trafic durant 1-2 ans.

Considérant les différentes expériences réalisées, (Huang, Bird et al. 2009) identifie diverses catégories de barrières pour la transposition des études à son propre contexte national : pertinence des données et de leur contexte géographique, adaptabilité des données selon les matériaux considérés, conformité par rapport aux méthodes (ISO), contenu des données (inputs-outputs) et disponibilité des modèles. Les auteurs expliquent ensuite les phases de développement d'un modèle d'analyse du cycle de vie spécifiquement dédié à la construction et maintenance des routes. Le modèle propose une caractérisation des dommages selon 11 catégories d'impacts.

7.3.2 Les calculateurs de gaz à effet de serre pour projets routiers

Il n'existe pas de calculateur de référence. Différents outils ont été développés pour réaliser les analyses et inventaires du cycle de vie de chaussées routières. Ces outils présentent l'avantage de disposer de données spécifiques au domaine étudié. Nous en présentons quelques-uns.

CHANGER® (Calculator for Harmonised Assessment and Normalisation of Greenhouse-gas Emissions for Roads) est un logiciel développé par la Fédération Routière Internationale (IRF). Le logiciel s'articule autour de deux modules (pré-construction, construction) qui seront ensuite complétés par un module additionnel relatif à la maintenance. Les résultats fournis sont la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre exprimés en CO₂ équivalent. Une analyse du logiciel et des bases de données utilisées a été effectuée par (Bueche et Dumont 2009).

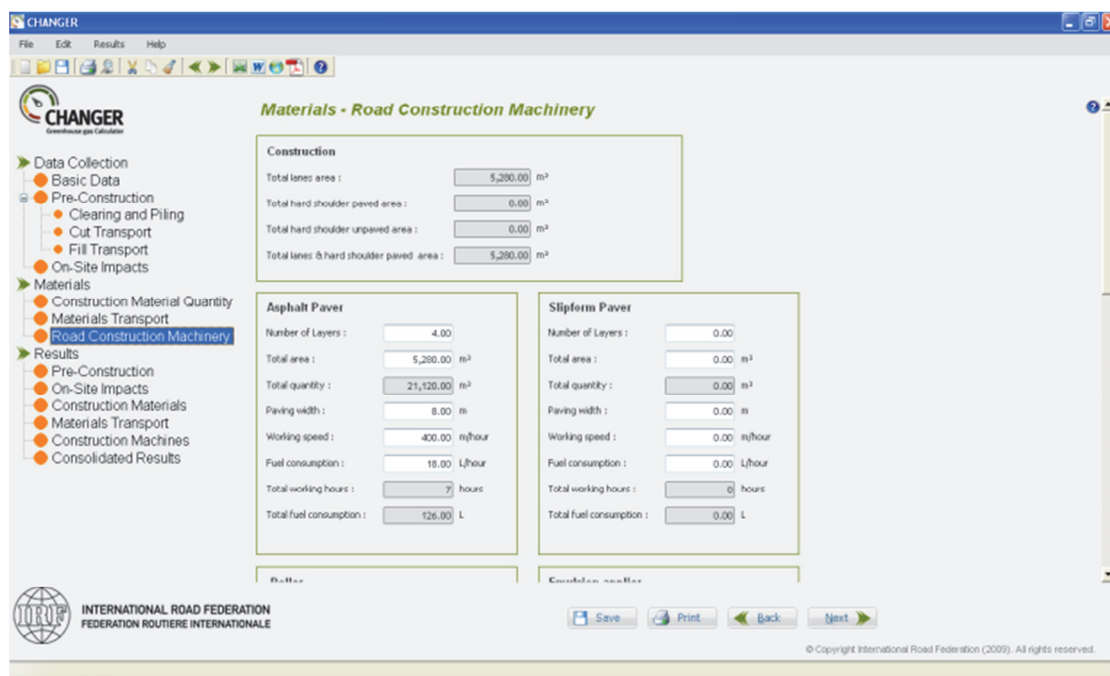


Figure 7-9 : Logiciel CHANGER® de l'IRF

Ecologiciel® a été développé par Colas et est utilisé à l'interne afin de déterminer la consommation énergétique de différentes variantes de chaussées et les émissions associées. Les résultats obtenus sont la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre. L'outil est utilisé afin de promouvoir les variantes de produits écologiques développés par la société.

ECORCE® (Eco-Comparateur Routes Construction Entretien) a été développé par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) en France. Le logiciel propose une approche globale de l'environnement avec la création de modules routiers qui représentent des tronçons types associés à un système et pour lequel les flux (gaz à effet de serre, énergie et matériaux) sont calculés (Ventura, Jullien et al. 2008). ECORCE détermine également des indicateurs ACV pour différentes catégories d'impacts (acidification, eutrophisation, ozone photochimique, éco-toxicité, toxicité chronique).

SEVE® (Système d'Evaluation des Variantes Environnementales) est un éco-comparateur développé par l'USIRF (Union des Syndicats de l'Industrie Routière Française) en 2010 sur la base des outils Colas, Eurovia et Eiffage Travaux-Publics. L'objectif est de répondre aux appels d'offres intégrant de nouveaux critères environnementaux avec une base de données commune et standardisée. Le logiciel est la synthèse de travaux relatifs à la caractérisation environnementales des matériaux menés au sein de l'USIRF (Bilal, Grosshenny et al. 2008). Le logiciel compare quatre indicateurs : la consommation énergétique, les émissions de gaz à effet de serre, la consommation de granulats et la valorisation d'agrégats d'enrobés (matériaux recyclés).

PaLATE® (Pavement Lifecycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects) est une feuille de calcul développée initialement par l'Université de Californie (Berkeley), puis modifiée par l'Université de Washington afin d'appliquer la méthode d'évaluation de projets (certification) Greenroads®. Cette méthode comprend onze différents indicateurs dont la gestion du bruit et des déchets, la gestion de la maintenance, le plan de gestion de la pollution, etc. Un de ces indicateurs est l'inventaire du cycle de vie dans lequel on détermine l'énergie totale utilisée ainsi que le potentiel de réchauffement global (PRG) de la construction d'une route. Les données proposées dans le logiciel sont principalement relatives au contexte américain. PaLATE applique la méthode EIO-LCA.

De nombreux autres outils peuvent être mentionnés : OMEGA TP® (Outil Méthodologique d'Evaluation des Gaz à effet de serre des Activités de Travaux Publics) développé par la Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP, France), Calcuette CO₂® (Eiffage T. P.), Life cycle assesment tool (Université Newcastle), Gaïa® (Eurovia), DuboCalc (RVS, Pays-Bas), LCCAExpress développé par l'Asphalt Pavement Alliance (APA), Carbon Calculator (Environment Agency, UK), Road Construction Model (Air Quality Management District, USA),...

Les calculateurs de gaz à effet de serre sont multiples et variés. Comme il n'y a pas (encore) de référence, les outils se distinguent principalement par leurs bases de données en termes de matériaux ainsi que leurs limites géographiques et temporelles. En règle générale, la phase d'élaboration de la matière première, de fabrication des mélanges en centrale et de pose sont incluses. Certains outils permettent de considérer différentes stratégies de maintenance, la fabrication des barrières de sécurité, le marquage, la signalisation, etc. mais rarement le trafic. Les émissions (et les coûts) sont en général calculés sur la base de la consommation énergétique. Bon nombre de ces outils consistent en une feuille de calcul et sont utilisés dans une optique de comparaison de projets routiers afin de déterminer la variante la plus écologique.

Nous pouvons relever :

- La comparaison détaillée au niveau des technologies d'enrobage n'est en général pas possible en raison des données limitées (à l'exception de l'Ecologiciel® qui contient des détails sur les produits Colas). De plus, la prise en compte de différentes courbes granulométrique ou teneurs en liants se situe à un niveau de détail pas adapté à ces outils.
- Les outils ne prennent pas en considération les performances (fonctionnelles, structurelles) des différents enrobés.

- Les outils permettent la comparaison de projets, mais ne fournissent pas une aide à la décision pour le choix de la « meilleure » variante, choix qui n'est pas nécessairement trivial.

C'est sur ces points que le modèle d'évaluation multicritère proposé va être axé avec une méthode de comparaison des technologies d'enrobés bitumineux.

7.4 Emissions

7.4.1 Emissions considérées et conversion

La considération des émissions est essentiellement liée au phénomène de l'effet de serre. Cet effet est dû aux « gaz dits à effet de serre - GES » présents dans l'atmosphère. Une partie du rayonnement solaire atteint le sol qui émet en retour un rayonnement thermique. Ce rayonnement thermique est absorbé par les GES, ce qui réchauffe l'atmosphère et le sol. Les GES sont donc des composants gazeux qui absorbent le rayonnement infrarouge. L'augmentation de la concentration de ces gaz est à l'origine du réchauffement climatique. Les principaux gaz à effet de serre ont à la fois des origines naturelles ainsi que des origines anthropiques (causés par l'activité humaine). C'est sur les origines anthropiques que l'on peut principalement agir. L'Office Fédéral de l'Environnement (OFEV) qui reprend les données de (Solomon, Qin et al. 2007) donne une répartition des émissions pour les principaux GES :

- La vapeur d'eau (H₂O) est le gaz à effet de serre le plus important. Sur le principe, la vapeur d'eau augmente avec toute augmentation des autres gaz à effet de serre. Comme on admet que la concentration de vapeur d'eau a toujours été plus ou moins semblable, on ne considère pas qu'elle contribue à l'augmentation de l'effet de serre.
- Dioxyde de carbone (CO₂) : Le CO₂ est le gaz à effet de serre atmosphérique d'origine humaine le plus abondant. Il est présent naturellement dans l'atmosphère. Son niveau a augmenté de manière importante depuis la révolution industrielle principalement en raison de l'exploitation des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon), la production de ciment, du déboisement et du changement d'affectation des terres. Le CO₂ est mesuré en ppm (nombre de molécules de gaz considéré par million de molécules d'air sec) et sa part des émissions totales est d'environ 85% en Suisse (77% dans le monde).
- Méthane (CH₄) : Le méthane est un gaz qui se forme lorsqu'un composé organique pourrit. Les sources d'émissions du méthane sont naturelles (40% environ) et anthropiques. Il est généré par les ruminants, exploitation de combustibles fossiles, décharges, combustion de la biomasse, riziculture, etc. Le méthane est mesuré en ppb (nombre de molécules de gaz considéré par milliard de molécules d'air sec). Sa part des émissions totales est de 7% en Suisse, 14% dans le monde.
- Oxyde nitreux (N₂O) : Egalement un gaz d'origine naturelle et humaine (40% des émissions totales de N₂O). Les sources sont diverses : océans, sols, combustion de la biomasse, engrais, processus chimiques divers,... L'oxyde nitreux est mesuré en ppb. Sa part des émissions totales est de 6% en Suisse, 8% dans le monde.
- Ozone (O₃) : L'ozone (artificiel) se trouvant à basse altitude (< 12 km) est un des polluants majeurs des villes. Il est émis par les pots d'échappement des véhicules et les activités industrielles, et il contribue au réchauffement climatique.
- Gaz synthétiques à effet de serre :
 - o Hydrofluorocarbones (HFC) et hydrocarbures perfluorés (PFC) : gaz halogènes qui ont la particularité d'absorber très fortement les infrarouges. Ces gaz étaient auparavant utilisés dans les aérosols et sont actuellement utilisés comme gaz réfrigérant

(climatisations, chaînes du froid) et dans certains procédés industriels spécifiques (mousses organiques isolantes).

- Hexafluorure de soufre (SF₆) : Puissant gaz à effet de serre produit artificiellement et utilisé comme isolant des lignes à haute tension et de câbles souterrains, fabrication de semi-conducteurs,...

Ces différents gaz ont une incidence directe sur le réchauffement. A ces gaz s'ajoutent d'autres gaz indirects qui vont influencer la formation ou la destruction de GES (monoxyde de carbone CO, oxydes d'azote NO_x, composés organiques volatiles COV,...).

Le Protocole de Kyoto considère les gaz à effet de serre (GES) suivants : CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC et SF₆. L'ozone n'est pas considéré dans le protocole de Kyoto car il n'agit qu'à court terme et à l'échelle régionale. La diminution des substances appauvrissant la couche d'ozone fait partie du « Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone », conclu à Montréal le 16 septembre 1987.

L'influence des différents gaz à effet de serre sur le réchauffement climatique est exprimée par le forçage radiatif qui varie selon les propriétés des gaz et leur durée de vie dans l'atmosphère. Les différents gaz à effet de serre peuvent être convertis en équivalent-CO₂ (CO_{2,eq}) qui est « la quantité émise de dioxyde de carbone qui provoquerait le même forçage radiatif intégré dans le temps jusqu'à une date donnée qu'une quantité émise d'un gaz à effet de serre à longue durée de vie ou qu'un mélange de gaz à effet de serre » (Solomon, Qin et al. 2007). Pour le calcul, l'émission de gaz à effet de serre considérée est multipliée par son potentiel de réchauffement global (PRG). Ce potentiel de Réchauffement Global (PRG) ou Global Warming Potential (GWP) sert à calculer l'équivalent en dioxyde de carbone des émissions anthropiques des gaz à effet de serre indiqués dans le protocole de Kyoto ; la valeur PRG=1 étant imposée pour le dioxyde de carbone. L'unité de référence est le téragramme ou million de tonne. Les valeurs de potentiel de réchauffement global sont régulièrement mises à jour par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC) (Solomon, Qin et al. 2007). L'horizon de temps joue un rôle important pour le PRG car les gaz ont une durée de vie différente. Ainsi, une molécule peut avoir un PRG élevé sur une période courte (20 ans) ou un PRG faible sur une longue période (100 ans). Nous utiliserons pour cette recherche les données du Tableau 7-3.

Tableau 7-3 : Potentiel de réchauffement global (PRG), horizon de temps de 100 ans (Solomon, Qin et al. 2007)

Gaz	PRG
Dioxyde de carbone (CO ₂)	1
Méthane (CH ₄)	25
Oxyde nitreux (N ₂ O)	298

La plupart des calculateurs et publications relatives à l'ACV/ICV prennent en considération les émissions de gaz à effet de serre sous la forme de CO₂ ou de CO_{2,eq}. La différence n'est parfois pas exprimée clairement et l'utilisation de CO_{2,eq} peut masquer l'effet de certains gaz particulièrement dangereux. Bon nombre de sources de données ne comprennent que les principaux GES car le recueil des données peut s'avérer complexe pour un gain de précision négligeable. (Harvey, Santero et al. 2010) mentionne que l'ICV doit considérer les GES principaux, incluant le CO₂, CH₄ et N₂O. D'autres polluants comme les particules NO_x peuvent également être incluses étant donné leur effet sur le potentiel de réchauffement global.

Dans la suite de la recherche, les trois gaz principaux seront considérés c'est-à-dire CO₂, CH₄ et N₂O. Ils seront ensuite convertis en CO_{2,eq}.

7.4.2 *Législation et valeurs limites*

Les valeurs limites ainsi que les aspects législatifs ne sont pas considérés dans le cadre de l'inventaire du cycle de vie de notre recherche. L'objet n'est pas de vérifier la conformité à la législation, mais de comparer différentes variantes lors de leur inventaire. La connaissance de la législation permet d'obtenir un ordre de grandeur des exigences et valeurs admissibles en matière d'émissions et évaluer les priorités politiques.

La législation en matière d'émissions est généralement propre à chaque pays et à ses engagements internationaux. En Suisse, la politique climatique est largement influencée par la loi sur le CO₂ et par les engagements liés au Protocole de Kyoto.

La loi sur le CO₂ (Loi 1999) concerne uniquement les émissions de CO₂ dues à l'utilisation énergétique des carburants et combustibles fossiles. L'objectif de cette loi (Art 2.) est de réduire d'ici à l'an 2010 les émissions de CO₂ dues à l'utilisation énergétique des agents fossiles de 10% par rapport à 1990. La moyenne des années 2008 à 2012 est déterminante. Les émissions considérées représentent, pour le cas de la Suisse, environ 80% des gaz à effet de serre selon le Protocole de Kyoto ce qui confère à cette loi un rôle primordial. La consommation de combustible dépendant des températures annuelles, la loi sur le CO₂ procède à une correction climatique des données. Pour cela, les émissions selon cette loi ne peuvent être directement comparées avec les émissions calculées selon le Protocole de Kyoto qui lui n'applique pas de correction.

Le Protocole de Kyoto (ONU 1998) s'intéresse également aux émissions de CO₂, mais il intègre en plus les émissions qui ne sont pas dues à une utilisation énergétique (raffineries, procédés, déchets,...). Le Protocole considère les émissions de cinq autres gaz à effet de serre mentionnés précédemment (chapitre 7.4.1). A ce jour, aucune loi Suisse ne fixe des objectifs de limitation pour les autres gaz à effet de serre cités dans le Protocole de Kyoto, l'accent étant mis sur le CO₂. Par la ratification du protocole de Kyoto, la Suisse s'est engagée à réduire de 8% par rapport à 1990 la totalité des émissions de ces six gaz à effet de serre.

La loi sur le CO₂ ainsi que le Protocole de Kyoto sont des moyens qui permettent de réduire les émissions de gaz à effet de serre et ainsi respecter les engagements de la Suisse dans le domaine climatique. De nombreux autres outils et mécanismes existent comme par exemple le commerce de quotas d'émissions, la loi sur l'énergie, la redevance poids lourds liée aux prestations (RPLP), etc.

Ces lois font état d'objectifs de réduction globaux à l'échelle de la nation. Les valeurs limites d'émissions pour un processus unitaire donné sont fixées par l'Ordonnance sur la protection de l'air OPair (Loi 1985). Pour les installations stationnaires (centrales d'enrobage), cette loi demande des mesures et contrôles des émissions tous les deux ou trois ans selon les cas ainsi que lors de la construction de nouvelles installations. Les mesures sont effectuées selon une procédure stricte fixée par l'Office Fédérale de l'Environnement, des Forêts et du Paysage (ancien nom de l'OFEV) (OFEFP 2001). L'intensité des émissions est exprimée sous la forme de concentration (mg/m³), débit massique (g/h) ou facteur d'émissions (kg/t), en fonction des caractéristiques de l'installation et plus particulièrement du débit massique. Le Tableau 7-4 donne un exemple de valeurs limites pour une centrale d'enrobage hot-stock discontinue. La valeur limite en concentration est applicable si le débit massique est égal ou supérieur à la valeur limite selon l'OPair.

Tableau 7-4 : Exemple de valeurs limites d'émissions pour une centrale d'enrobage (Loi 1985)

	Débit massique [g/h]	Concentration limite [mg/m ³]
Dioxyde d'azote NO ₂	2500	250
Dioxyde de soufre SO ₂	2500	250
Poussières	200	20

(Paranhos 2007) discute également des valeurs limites et de la législation pour les centrales d'enrobage dans différents pays. L'association européenne des producteurs d'enrobés bitumineux effectue une enquête des valeurs limites ou valeurs typiques d'émissions au sein des pays européens (EAPA 2007). Les comparaisons entre pays sont difficiles, mais il ressort :

- Pour les poussières, la limite se situe normalement entre 20-50 mg/Nm³ pour un taux de dilution en oxygène de 17% comme référence de base pour les centrales d'enrobage (Nm³=mètre cube normal, unité de débit permettant de comparer des mesures effectuées dans différentes conditions en les ramenant aux conditions normatives 0 °C et 1 bar).
- SO₂, NO_x : Les valeurs limites se situent généralement entre 350 et 500 mg/Nm³, selon les paramètres et la méthode de mesure utilisée. La législation suisse est donc plus sévère pour ces émissions.
- CO, CO₂ : Les valeurs typiques se situent entre 350 et 1000 mg/Nm³ selon l'agent énergétique et /ou l'utilisation de matériaux recyclés. Il n'y a pas de valeurs limites pour les émissions de CO₂ dans les pays européens, mais les lois nationales permettent d'encourager la diminution des émissions.

7.5 Principes et architecture du modèle

Sur la base de l'analyse précédente, le modèle se positionne à l'échelle des matériaux bitumineux. Contrairement à la majorité des études et calculateurs proposés, le but n'est pas de fournir un comparatif entre différents projets de routes, mais plutôt d'assister le décideur dans le choix de la technologie d'enrobage. Ceci permet de comparer les enrobés à chaud avec différentes familles d'enrobés tièdes ou encore des enrobés à froid.

L'architecture générale du modèle est présentée dans la Figure 7-10. Les critères relatifs à l'inventaire du cycle de vie (énergie, émission, coûts) sont considérés et complétés par les performances du mélange. La prise en compte des performances dans le processus de décision permet d'étayer les choix et différencier par exemple un enrobé « écologique » aux performances faibles avec un enrobé plus gourmand en énergie mais aux performances élevées. Le modèle est divisé en deux parties distinctes :

1. Inventaire du cycle de vie (ICV) et indicateurs de performances

L'établissement de ces différents indicateurs permet de déterminer les données d'entrée nécessaires au modèle d'évaluation multicritère. L'inventaire du cycle de vie aboutit aux indicateurs d'énergie, d'émissions et de coûts. L'indicateur de performance n'est pas déterminé sur l'ensemble du cycle de vie de l'enrobé mais correspond à un instant déterminé. La Figure 7-10 indique également les données sources pour l'établissement des différents indicateurs. Cette première partie du modèle est détaillée aux chapitres 7.6, 7.7 et 7.8.

2. Modèle global d'évaluation

Le modèle global d'évaluation consiste à proposer différents niveaux d'analyse pour fournir une aide à la décision. La méthode proposée prend en compte les indicateurs développés dans la première partie ainsi que de nouveaux critères qualitatifs et quantitatifs insérés selon le niveau

d'analyse. Le développement du modèle intègre progressivement la notion de préférence de l'utilisateur.

Cette seconde partie est le cœur du modèle et sera détaillée au chapitre 8.

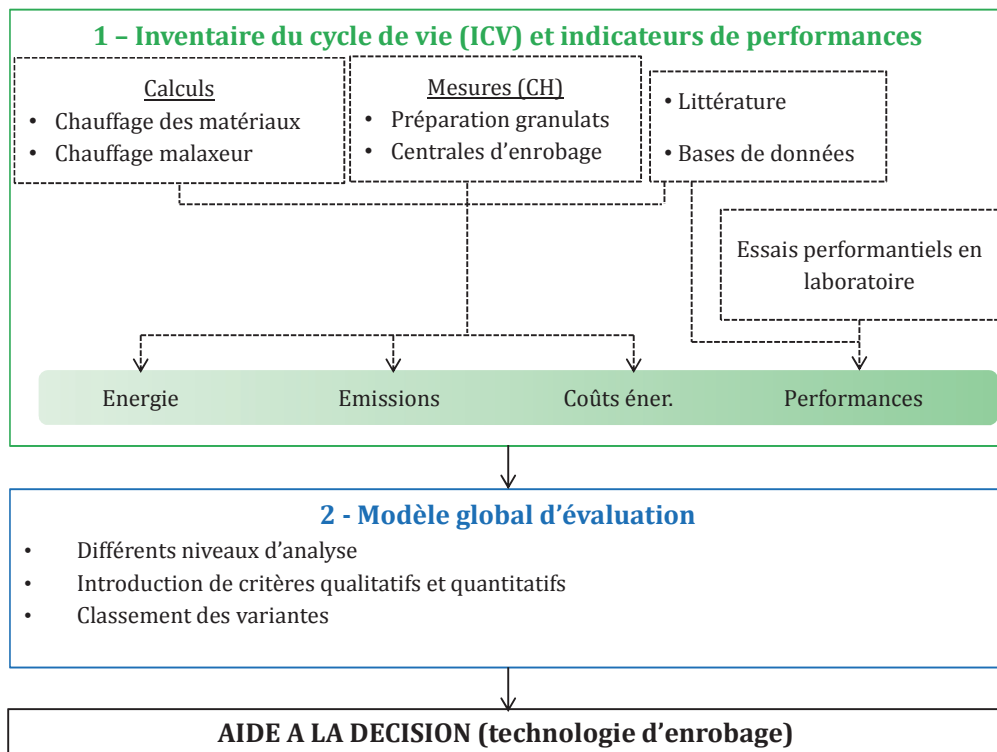


Figure 7-10 : Vue générale du modèle multicritère

Le modèle décrit dans ce rapport a été implémenté sous la forme de deux fichiers MS-Excel correspondant aux deux parties. La première partie du modèle contient les onglets suivants :

- Données calculées – chauffage des matériaux
- Données calculées – chauffage de l'air du malaxeur
- Données mesurées – préparation des granulats en carrière
- Données mesurées – Mesures en centrale d'enrobage
- Base de données / données de la littérature
- Calcul des indicateurs – inventaire du cycle de vie
- Calcul des indicateurs – indicateurs de performances
- Synthèse des résultats pour analyse multicritère

7.6 Sources de données pour le modèle

En règle générale, les données proposées pour un sous-système doivent être issues d'un suivi sur une certaine période afin d'obtenir des données lissées et représentatives. Par exemple, dans le cas de mesures d'émissions en centrale d'enrobage, les mesures sont effectuées sur deux périodes de deux heures minimum afin d'obtenir des valeurs représentatives. Cette démarche est suivie lors des contrôles de centrales. La collecte de données est une étape particulièrement longue et fastidieuse. De plus, les données relatives à des procédés d'entreprise ne sont pas nécessairement accessibles. Pour cela, on préfère souvent l'utilisation de bases de données existantes à la collecte de nouvelles données. De manière générale, les données peuvent provenir de :

- Articles de journaux
- Rapports de recherche

- Conférences
- Données de l'industrie
- Données gouvernementales
- Enquêtes
- Mesures
- Calculs
- Bases de données générales ou spécialisées

Le type de données utilisées a une incidence prépondérante sur les résultats et leur qualité. Il est important de considérer des données les plus ajustées possibles par rapport au contexte géographique et temporel de l'étude. Une erreur d'appréciation courante consiste à supposer que le produit est fabriqué de manière identique partout dans le monde (erreur d'agrégation). Le Tableau 7-5 répertorie les différentes sources de données utilisées dans le cadre de la recherche ainsi que le chapitre dans lequel le type de donnée est discuté (voir également Figure 7-10).

Tableau 7-5 : Type de données utilisées dans la recherche

	Energie	Emissions	Coûts	Performances	Chapitre
Calcul	X	X	X		6.3
Enquête centrale (Suisse)	X	X	X		6.1
Littérature	X	X	X	X	6.2, 7.3, 7.7.3
Bases de données	X	X	X		7.6.1
Essais laboratoire				X	4

La collecte des données n'est pas l'objet central du modèle développé, mais elle permet de valider la méthodologie, proposer des valeurs par défaut et effectuer des premiers calculs comparatifs. Un soin particulier est mis dans le choix de données appropriées, représentatives et transparentes, ainsi que dans la proposition de différentes alternatives (sources).

7.6.1 Bases de données

A partir du milieu des années '80, différentes bases de données ont été développées, principalement dans le milieu universitaire ou alors par des consultants. Bien qu'elles ne se rapportent en général pas au domaine spécifique de l'étude, elles fournissent des informations complètes et fiables pour certains processus unitaires. (Curran et Notten 2006) répertorient les principales bases de données accessibles dans le monde ainsi que les logiciels ACV contenant des données d'inventaires. Le rapport contient également une liste d'institutions et organisations fournissant des données pour l'ICV. Ce travail, effectué dans le cadre du SETAC, est régulièrement mis à jour. La Suisse, l'Allemagne et la Suède font partie des pays les plus actifs au niveau européen.

Il n'existe actuellement pas de base de données reconnue et contenant toutes les informations nécessaires à l'analyse du cycle de vie d'un enrobé bitumineux. Une base de données réduite qui ne se veut pas exhaustive a été créée dans le cadre de cette recherche, en tirant profit de bases de données indépendantes ou liées à des calculateurs. Un aperçu de la base de données créée est disponible en Annexe C. Une certaine flexibilité est laissée puisque l'utilisateur du modèle est libre d'insérer ses propres valeurs pour chaque processus unitaire. Les sources sont diverses et nous les décrivons ci-après :

Ecoinvent

Le centre de recherche « Swiss Center for Life Cycle Inventories », créé en 2000, est le principal institut de recherche Suisse sur les analyses du cycle de vie. Ce centre a établi la base de données Ecoinvent, mondialement connue et régulièrement complétée et mise à jour par les différents instituts des Ecoles polytechniques fédérales suisses. Ecoinvent comprend des données pour l'ICV ainsi que pour l'évaluation des impacts selon différentes méthodes (CML 2001, IMPACT 2002+, EDIP2003, eco-indicator 99, ReCiPe ...) (Frischknecht, Jungbluth et al. 2004; Frischknecht et Rebitzer 2005).

La base de données Ecoinvent contient des informations relatives à des domaines variés : énergie, matériaux de construction, métaux, chimie, papier, forêt, agriculture, transports, traitement des déchets. Elle contient actuellement plus de 4000 ICV de produits.

Pour chaque processus ou matériau, environ 1000 différents composants sont fournis à l'utilisateur. Pour le CO₂, CO et CH₄, une distinction est faite entre les sources fossiles et biogéniques ainsi que selon la densité de la région considérée. Cette exhaustivité de la base de données et sa transparence sont les principaux avantages de Ecoinvent (Curran et Notten 2006). Ceci permet à l'utilisateur de juger si les données sont adaptées ou non à la problématique étudiée. La transparence et l'exhaustivité peuvent cependant rendre Ecoinvent complexe à l'utilisation pour les non spécialistes.

Les données d'inventaire du cycle de vie Ecoinvent 2.2 proposent des données relatives au contexte suisse et européen (RER) ainsi que certaines données pour un contexte non-européen (extraction de minéraux et sources d'énergies ne provenant pas d'Europe). La distinction géographique est effectuée selon le type de produit et sa consommation (nationale ou internationale).

Les données utilisées dans notre recherche sont celles relatives au processus de production des granulats, le raffinage du pétrole et les systèmes de transports.

Gemis

Gemis (Global Emission Model for Integrated Systems) est un logiciel d'ACV gratuit contenant une base de données continuellement mise à jour pour l'énergie, les matériaux et les systèmes de transport. L'outil a été créé à la fin des années 1980 par le Öko-Institut et la Gesamthochschule Kassel en Allemagne. Le logiciel propose environ 1300 données relatives à des produits (nourriture, boissons, matériaux de construction,...) ainsi que plus de mille données relatives à des processus. Les données Gemis sont reprises notamment dans la recherche (Cholava 2009).

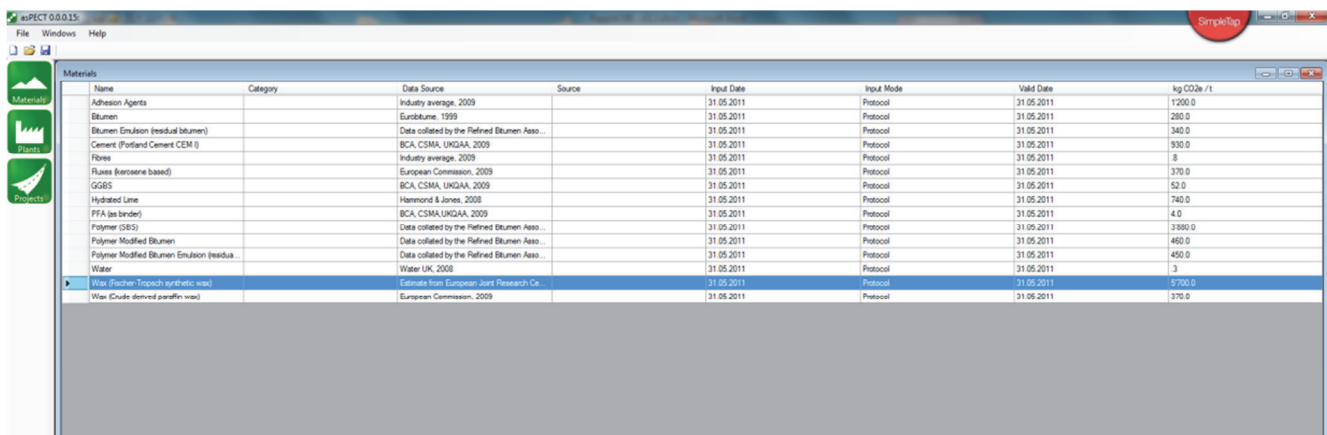
Bath University

L'université de Bath (Sustainable Energy Research Center Team) a mis au point une base de données très complète et disponible en ligne appelée « ICE – Inventory of Carbon & Energy ». La base de données concerne différents matériaux de construction (granulats, aluminium, bitume, ciment, papier, zinc,...). Les données relatives aux granulats et aux sables sont utilisées. On peut remarquer que pour certains éléments de la base de données, les données (Stripple 2001) sont utilisées. Cette base de données a la particularité de proposer des valeurs d'écart-type. Pour la production d'enrobé bitumineux, des variations de $\pm 30\%$ entre les valeurs minimales et maximales sont indiquées (valeur énergétique comprise).

asPECT

asPECT (asphalt pavement embodied carbon tool) est un outil de calcul des émissions de GES générés par l'utilisation d'enrobé pour la construction de routes. Il a été développé par le Transport Research Laboratory (TRL) au Royaume-Uni, en collaboration avec différentes associations (minéraux, bitume),

lors d'un projet de recherche s'étendant de 2008 à 2011. Le but du projet (Wayman, Schiavi-Mellor et al. 2010) est de créer une méthode standardisée et harmonisée de mesure de la contribution au changement climatique (par le calcul des GES) des produits utilisés pour la construction de routes et leurs applications, ceci afin de fournir un appui au domaine. Le logiciel asPECT ne prend pas en considération le trafic et ses émissions associées, ceci car elles ne peuvent en général pas être influencées par le constructeur de route. La base de données du logiciel reprend les données d'autres sources connues ainsi que certaines données collectées auprès de l'industrie. En particulier, les données relatives aux cires (Fischer-Tropsch et paraffines) et à la fabrication des émulsions sont utilisées.



Name	Category	Data Source	Source	Input Date	Input Mode	Valid Date	kg CO2e /t
Adhesion Agents		Industry average, 2009		31.05.2011	Protocol	31.05.2011	1200.0
Bitumen		EuroBitume, 1999		31.05.2011	Protocol	31.05.2011	260.0
Bitumen Emulsion (residual bitumen)		Data collected by the Refined Bitumen Ass...		31.05.2011	Protocol	31.05.2011	340.0
Cement (Portland Cement CEM I)		BCA, CSMA, UKGAA, 2009		31.05.2011	Protocol	31.05.2011	930.0
Fibres		Industry average, 2009		31.05.2011	Protocol	31.05.2011	.8
Flases (Eurosene based)		European Commission, 2009		31.05.2011	Protocol	31.05.2011	370.0
GGBS		BCA, CSMA, UKGAA, 2009		31.05.2011	Protocol	31.05.2011	52.0
Hydrated Lime		Hammond & Jones, 2008		31.05.2011	Protocol	31.05.2011	740.0
PPA (as binder)		BCA, CSMA, UKGAA, 2009		31.05.2011	Protocol	31.05.2011	4.0
Polymer GGBS		Data collected by the Refined Bitumen Ass...		31.05.2011	Protocol	31.05.2011	3180.0
Polymer Modified Bitumen		Data collected by the Refined Bitumen Ass...		31.05.2011	Protocol	31.05.2011	460.0
Polymer Modified Bitumen Emulsion (residu...		Data collected by the Refined Bitumen Ass...		31.05.2011	Protocol	31.05.2011	450.0
Water		Water UK, 2008		31.05.2011	Protocol	31.05.2011	.3
Wax (Fischer-Tropsch synthetic wax)		Estimate from European Joint Research Ce...		31.05.2011	Protocol	31.05.2011	5700.0
Wax (Crude derived paraffin wax)		European Commission, 2009		31.05.2011	Protocol	31.05.2011	370.0

Figure 7-11 : Base de données asPECT (version 0.0.0.15)

Defra

La base de données du Department for Environment, Food and Rural Affairs (Defra) et Department of Energy and Climate Change (DECC) du Royaume-Uni est utilisée pour les émissions relatives aux systèmes de transport, mais également pour les valeurs de pouvoir énergétique et densité des différents carburants.

Autres sources de données

En plus des bases de données, certaines données spécifiques sont issues de la littérature. Ceci est notamment le cas pour la fabrication du bitume ainsi que la production de l'enrobé en centrale d'enrobage qui sont deux processus déterminants. Ces données seront discutées dans la section 7.7 relative à l'inventaire du cycle de vie.

7.6.2 Qualité et incertitudes des bases de données

Une fois le jeu de données obtenu, il est nécessaire de vérifier la correspondance avec le cadre et les objectifs de l'étude. Cela concerne la dimension géographique et temporelle des données, les limites du système, la qualité et les lacunes des données, ... L'incertitude dépend également du type de données. Les données primaires (recueil direct auprès d'entreprises) sont à distinguer des données secondaires trouvées dans les publications, journaux, livres et bases de données et pour lesquelles toutes les informations ne sont pas nécessairement disponibles. Un risque d'homogénéisation (agrégation des données) doit également être pris en compte avec les données de type secondaire.

Peu de méthodes permettent d'estimer quantitativement la qualité des données, bien que cela soit nécessaire pour évaluer la crédibilité de l'analyse du cycle de vie. Une méthode consiste à prendre en compte les distributions de probabilité de chaque donnée puis de les combiner à l'aide de méthodes statistiques afin d'obtenir une incertitude globale sur l'inventaire. Il est cependant rare de disposer de suffisamment d'informations sur la répartition probabiliste des données. C'est pourquoi (Jolliet, Saadé et al. 2005) propose d'estimer l'ordre de grandeur de l'incertitude sur la base de différents indicateurs

de qualité pour lesquels un score de 1 à 5 est donné selon une échelle définie ; 1 représentant la meilleure appréciation. Les indicateurs sont:

- Fiabilité des données : Dépend de la méthode de mesure et des vérifications effectuées.
- Exhaustivité des données : Dépend du nombre d'entreprises consultées pour l'établissement des données.
- Corrélations géographiques, temporelles et technologiques.
- Taille de l'échantillon.

Un facteur d'incertitude est ensuite attribué aux scores obtenus ainsi qu'un facteur d'incertitude supplémentaire (appelé incertitude de base) caractérisant la substance considérée. La variance SD_{95} avec intervalle de confiance à 95% peut alors être calculée.

Cette méthode est appliquée notamment afin d'évaluer l'incertitude des données Ecoinvent (Frischknecht, Jungbluth et al. 2004). Nous pouvons effectuer un exemple de calcul pour le cas des données issues de l'enquête de consommation auprès de centrales suisses (chapitre 6.1.1) i.e. processus nécessitant une certaine quantité d'énergie. La procédure de (Jolliet, Saadé et al. 2005) est suivie :

- Score de qualité pour la fiabilité : 2 (données non vérifiées basées sur des mesures)
- Score de qualité pour exhaustivité : 2 (données représentatives d'un petit nombre d'entreprises mais pour des périodes adéquates)
- Score de qualité pour corrélation temporelle : 1 (moins de 3 ans de différence avec l'année d'étude)
- Score de qualité pour corrélation géographique : 1 (données de la zone à l'étude)
- Score de qualité pour corrélation technologique : 1 (données d'entreprises, de processus et de matériaux à l'étude)
- Score de qualité pour taille de l'échantillon : 4 (≥ 3)

En utilisant ensuite les facteurs d'incertitude par défaut pour la matrice de qualité et le facteur d'incertitude de base pour l'énergie, nous obtenons la variance pour la quantité d'énergie consommée en centrale d'enrobage :

$$SD_{95} = e^{\sqrt{\ln(1.05)^2 + \ln(1.02)^2 + \ln(1)^2 + \ln(1)^2 + \ln(1)^2 + \ln(1.1)^2 + \ln(1.05)^2}} = 1.13$$

La valeur de SD_{95} (sans dimension) ne dépend pas de la quantité d'énergie consommée en centrale d'enrobage.

Dans une procédure complète, ces différentes incertitudes sont ensuite combinées avec les données issues des autres processus unitaires.

(Harvey, Santero et al. 2010) discute de l'incertitude dans l'analyse sur le cycle de vie. Le choix de la base de données utilisée doit toujours être mis en relation avec le contexte d'étude (date, lieu) afin d'évaluer leur représentativité. Dans le cas où la quantité de données à disposition est suffisante, des outils statistiques de type Monte-Carlo (permettant de déterminer l'incertitude sur le résultat final en fonction des incertitudes sur les paramètres d'entrée du modèle) peuvent être utilisés. Nous pouvons relever les sources d'incertitudes suivantes :

- Correspondance géographique
- Correspondance temporelle, âge des données
- Variance au niveau des procédés unitaires
- Développements technologies
- Mauvaise pondération
- Mauvaise compréhension du processus

- Limites des théories et des méthodes utilisées (ACV)

L'incertitude finale est donc plus élevée dans le cas d'une analyse du cycle de vie comparativement à l'inventaire, ceci en raison des méthodes d'évaluation des impacts et de leurs hypothèses associées. Afin d'évaluer ces différentes incertitudes et leurs effets, une analyse de sensibilité et test de robustesse peuvent être conduits en fin de modélisation.

7.7 Inventaire du cycle de vie d'un enrobé bitumineux (Partie 1 du modèle)

L'inventaire du cycle de vie est implémenté dans la première partie du modèle multicritère. La mise en place est effectuée dans un souci de souplesse, laissant en tout temps à l'utilisateur la possibilité de saisir ses propres données et préférences.

7.7.1 Paramètres et hypothèses de base

L'analyse du cycle de vie se limite ici à l'inventaire du cycle de vie. Ceci permet de conserver des valeurs brutes et évite l'introduction d'une incertitude supplémentaire relative à la méthode de détermination des dommages. Par ailleurs, l'analyse du cycle de vie nécessite la connaissance de davantage de substances pour lesquelles les données ne sont pas nécessairement disponibles pour chaque processus unitaire.

Comme expliqué précédemment, le système se situe au niveau de la comparaison d'enrobés bitumineux. Les différences pour les limites du système sont nombreuses comparativement à l'ICV d'un projet de route. La construction d'une route relève une certaine complexité avec des problématiques liées à l'accessibilité, perturbations du trafic par les travaux, barrières de sécurité,... En particulier, la durée de vie de la chaussée est difficile à estimer dans le cas de comparaisons de projets routiers. Ces aspects indirects ne sont pas pris en compte lors de l'analyse d'un enrobé où les considérations relèvent de la formulation, du choix des matériaux et autres propriétés ou composants du mélange. De même, l'ICV d'une route nécessite la prise en compte de nombreux processus qui peuvent être omis lors de notre analyse :

- Élagage et préparation du sol,
- Panneaux de signalisation,
- Terrassement,
- Construction du sol et des fondations,
- Marquage sur la route, installation de la signalisation,
- Trafic sur la durée de vie de la chaussée,
- Opérations de maintenance,
- Salage, déneigement,
- Nettoyage des bordures, entretien de la végétation.

La Figure 7-12 illustre un exemple d'arbre de processus pour l'ICV d'une route avec ses différents éléments constitutifs.

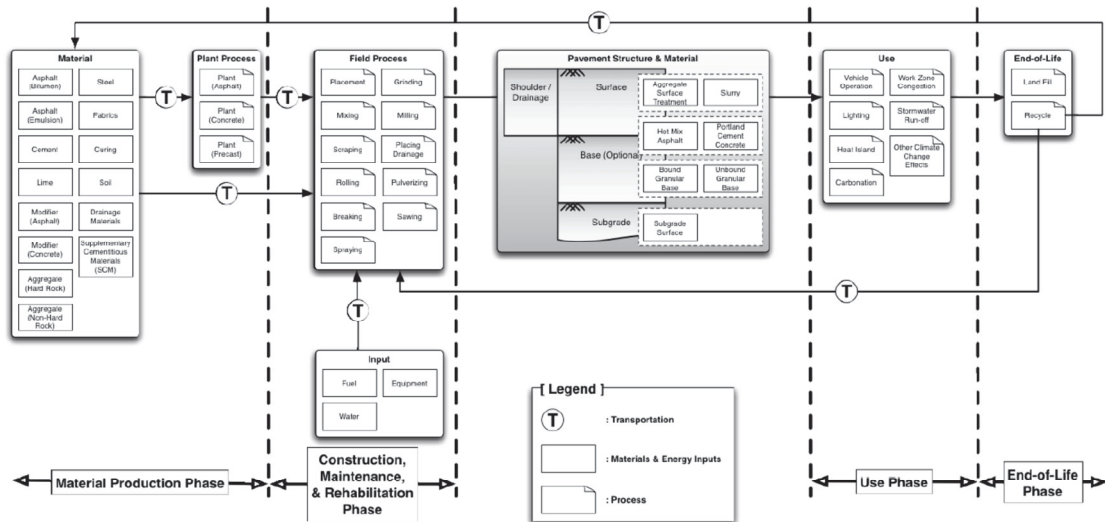


Figure 7-12 : Exemple d'arbre de processus pour ACV d'une route (Harvey, Santero et al. 2010)

Pour l'ensemble de l'inventaire du cycle de vie et de l'analyse qui suivra, nous effectuons les hypothèses et postulats suivants :

- Pour chaque processus unitaire, la consommation énergétique est déterminée. Lorsque les émissions de GES ne sont pas fournies, elles sont alors calculées sur la base de la consommation énergétique et de la répartition des agents énergétiques (électricité, carburant). Ceci suppose donc une combustion complète. Les émissions (et les coûts) dépendent de la consommation énergétique, mais également du choix de combustible. Une plus grande consommation d'énergie ne signifie pas nécessairement des émissions plus importantes. Un code couleur est utilisé dans la base de données afin d'identifier les données calculées en fonction de la consommation énergétique.
- Les coûts des différents processus unitaires sont calculés sur la base de la consommation énergétique. Le coût obtenu lors de l'ICV est donc un coût énergétique qui ne peut être comparé au prix de vente des matériaux (coût commercial). Un code couleur est utilisé dans la base de données pour identifier les données calculées en fonction de la consommation énergétique. Des considérations relatives au coût commercial sont proposées au chapitre 3.4.2.
- L'énergie considérée est l'énergie dite secondaire qui consiste en l'énergie primaire (pétrole, charbon, uranium) transformée en agent énergétique (électricité, hydrogène,...). On ne considère pas l'énergie primaire utilisée pour créer ces agents énergétiques ou produits (embodied energy) de même que l'énergie grise. Les émissions directes (émissions au point d'utilisation de la source d'énergie) sont considérées ; les émissions indirectes (émises préalablement à l'utilisation de la source d'énergie, par exemple pour l'extraction des matières premières) ne sont pas prises en compte.
- Pour les différents carburants, le pouvoir calorifique inférieur (PCI) est considéré. Le PCI représente la valeur calorifique sous conditions réelles, n'incluant pas la chaleur de condensation de l'eau. Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) représente quant à lui le pouvoir calorifique théorique maximal dans des conditions de laboratoire, y compris la chaleur de condensation de la vapeur d'eau.
- La valeur énergétique (ou énergie « matière » que l'on pourrait récupérer en brûlant le matériau) du bitume n'est pas prise en considération dans l'étude. Le bitume n'est en général pas brûlé à des fins énergétiques et il peut être réutilisé en fin de vie sous la forme de fraisat de recyclage (traduit dans le modèle par le potentiel de recyclabilité). Cette hypothèse peut être

discutée, mais elle nécessite d'être clairement stipulée en début d'analyse. (Weiland et Muench 2010) ne prennent pas non plus en compte la valeur énergétique comme carburant. La prise en compte de l'énergie « matière » est par contre proposée par (De Larrard 2009) qui rappelle que l'énergie « matière » est environ 30 fois supérieure à l'énergie « procédé » représentant l'énergie consommée pour la production du bitume. La précision des différents indicateurs (nombre de décimales) est déterminée sur la base de la précision des calculs et de l'ordre de grandeur des variations entre procédés. Deux décimales sont considérées pour les résultats d'énergie (MJ) et d'émissions (kg CO_{2,eq}) et trois décimales sont considérées pour les coûts énergétiques (CHF).

7.7.2 Définition des objectifs et du système

L'étape de définition des objectifs et du système n'est pas très technique et bien cernée dans la documentation relative. Elle permet de poser les conditions de base de l'étude (Jolliet, Saadé et al. 2005).

Objectif de l'étude

Evaluation de l'impact de différents enrobés bitumineux (i.e. scénarios) à l'aide d'un inventaire du cycle de vie. Une base de données est proposée à l'utilisateur afin d'assister dans l'évaluation des scénarios. Ces résultats sont ensuite utilisés pour une comparaison multicritère des scénarios afin de fournir des informations dans un processus d'aide à la décision du choix de la technologie d'enrobage.

Facteurs considérés

Les facteurs considérés pour l'inventaire du cycle de vie sont l'énergie (exprimée en MJ) et les émissions (exprimées en kg CO_{2,eq}). Un inventaire du cycle des coûts énergétiques (exprimés en francs suisses) est également fait en se basant sur le même système de référence (décrit plus loin, Figure 7-14).

Fonction du produit

La fonction principale des enrobés bitumineux évalués est définie comme « matériau de construction pour couche bitumineuse de base de type AC T 22S ». Des fonctions secondaires ne sont pas définies.

Unité fonctionnelle (UF)

L'unité fonctionnelle doit pouvoir correspondre aux dimensions physiques ainsi qu'à la performance du système. C'est sur cette base que les scénarios sont comparés. Dans le cadre d'un projet routier, l'unité fonctionnelle la plus représentative est souvent « 1 km de route ». Pour un ICV d'enrobés bitumineux, l'unité fonctionnelle choisie est « 1 tonne d'enrobé ». Les limites spatiales et temporelles de l'unité fonctionnelle sont décrites plus loin. Pour l'unité fonctionnelle choisie, l'inventaire des flux entrants (inputs) et sortants (outputs) du système et nécessaires à la réalisation de la fonction sont comptabilisés. Les flux sont illustrés dans la Figure 7-13 pour le cas de la centrale d'enrobage. Dans cette étude, nous considérons comme flux entrants l'utilisation de ressources énergétiques ainsi que la quantité de matière (granulats, bitume, additifs ...). Les flux sortants correspondent aux émissions de gaz à effet de serre dans l'air (CO₂, CH₄ et N₂O). Les émissions dans l'eau (hydrocarbures par exemple) ainsi que les déchets (industriels, radioactifs) ne sont pas considérés.

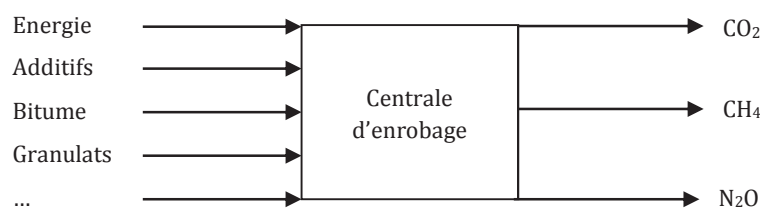


Figure 7-13 : Flux élémentaires pour un processus unitaire donné (centrale d'enrobage)

La période d'analyse de l'inventaire du cycle de vie se situe entre l'extraction des matières premières et la fin du compactage de l'enrobé.

Limites du système

Le système est constitué d'un ensemble d'éléments en interaction dynamique et ses limites permettent de le distinguer du milieu environnant (environnement et économie). Les limites contiennent l'ensemble des processus nécessaires à la réalisation de la fonction du système. Leur définition a une grande influence sur les résultats de l'analyse.

Le système étudié correspond à la production d'enrobé bitumineux et il est défini dans la Figure 7-14. Chaque activité ou processus unitaire est reliée aux autres par les flux de produits intermédiaires représentés par des flèches. Dans cette figure, les processus indiqués sur fond bleu correspondent aux processus unitaires déterminants, car ils représentent une différence plus ou moins significative entre les enrobés tièdes et les enrobés à chaud. Les processus indiqués sur fond blanc correspondent à des processus communs (ou sans grandes variations) entre les différents types d'enrobés. Lors d'un workshop consacré à l'analyse du cycle de vie des enrobés (Harvey, Santero et al. 2010), propose que lors de la comparaison de produits, les étapes communes ne soient pas considérées si les flux de référence sont strictement égaux, afin de simplifier la procédure. Ceci n'est pas fait ici afin de fournir à l'utilisateur un résultat sur l'ensemble du cycle de vie qui soit représentatif et évaluer la proportion de la contribution de chaque processus par rapport au total. Les limites du système étudié sont indiquées par un trait discontinu orange. Les processus indiqués sur fond orange correspondent au cycle du recyclage de l'enrobé, séparé de la pose de l'enrobé par la durée de service de la chaussée (solllicitations du trafic et du climat). Le cycle du recyclage n'est pas considéré dans cet inventaire du cycle de vie (limites du système). La sollicitation de la chaussée par le trafic et le climat ne sont également pas pris en considération.

Les hypothèses et simplifications suivantes sont faites dans la définition des limites du système :

- La production des machines (finisseur, compacteur), véhicules et usines (raffinerie, centrale d'enrobage) n'est pas considérée, seule l'exploitation est prise en considération.
- Le chargement et déchargement des camions ne sont pas considérés.
- Considération de liants de distillation directe. Dans le cas d'utilisation de liants modifiés (aux polymères par exemple), un processus unitaire relatif à l'usine de liant modifié serait à ajouter.
- La limite du système est définie à la fin du compactage de l'enrobé. Les opérations de maintenance ne sont donc pas considérées.
- A l'exception du pétrole acheminé par voie maritime, le transport des matériaux est admis, par défaut, réalisé par camion. Ceci peut être modifié par l'utilisateur lors de la réalisation de l'inventaire avec l'outil.
- Transport identique pour les enrobés tièdes et chaud i.e. les enrobés ont la même distance de transport et un coefficient de foisonnement similaire.

- Pas de matériaux recyclés lors de la fabrication des enrobés.
- La pose et le compactage se font à la machine.
- Le traitement des eaux usées et des déchets ne sont pas considérés. La nature et la quantité des déchets sont supposés identiques.

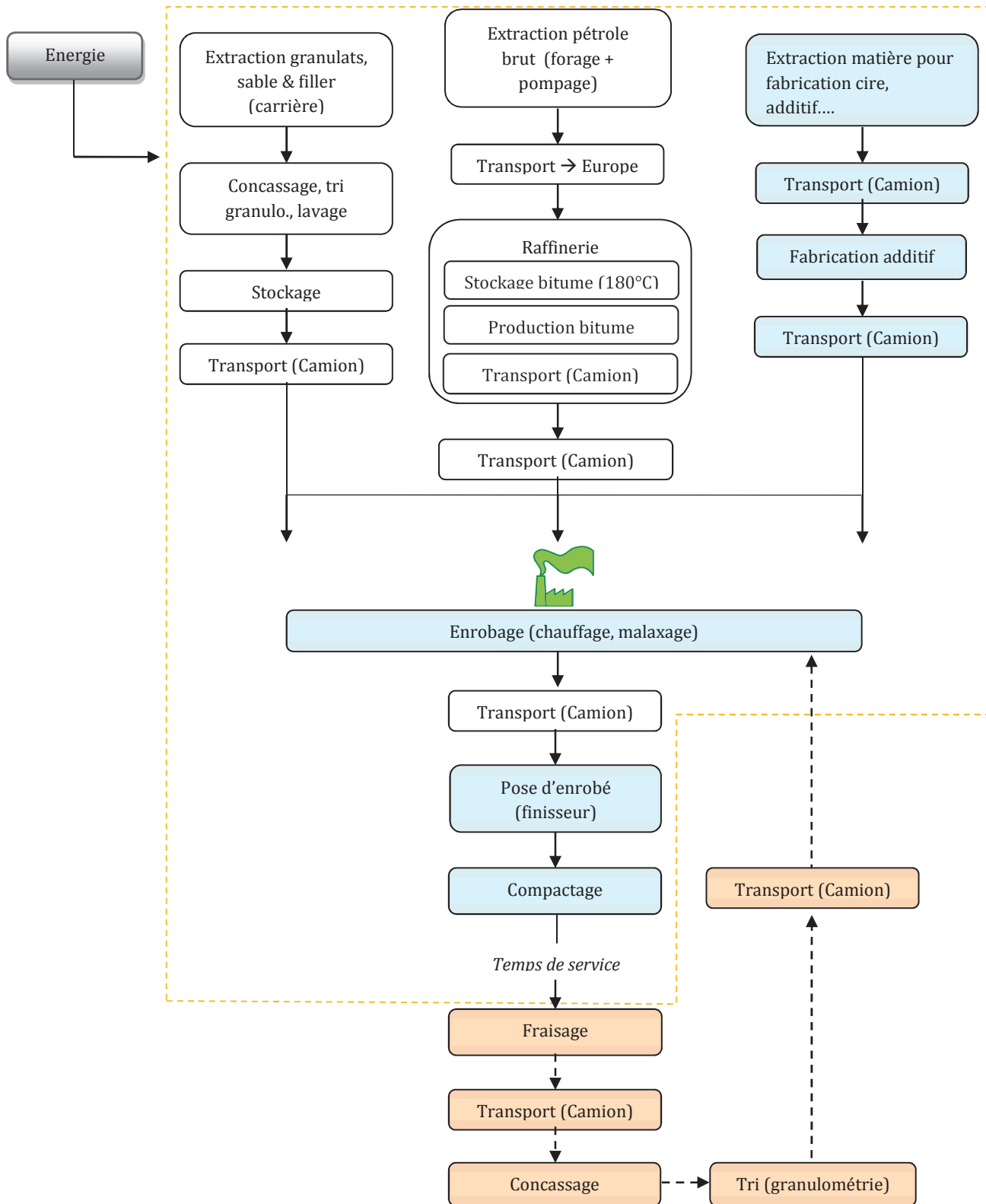


Figure 7-14 : Arbre des processus pour l'ACV d'un enrobé bitumineux (processus unitaires)

La méthode de (Jolliet, Saadé et al. 2005) mentionne également que *“sont retenus dans le système l’ensemble des processus qui contribuent à plus de x% ... Le pourcentage de seuil de x% est préalablement fixé, par exemple à 1% ou 3%”*. Dans cette recherche, les différents processus unitaires proposés sont conservés pour l’ensemble de l’analyse, leur contribution par rapport au total de l’inventaire est ensuite déterminée et analysée dans la première phase de l’analyse multicritère (partie 2 du modèle).

Potentiel de recyclabilité et matériaux recyclés

Comme évoqué plus haut, les limites du système étudié ont été définies à la fin du compactage de la chaussée. Dans une approche de comparaison entre différents procédés tièdes, le potentiel de recyclabilité de ces enrobés n’est cependant pas le même, il dépendra notamment des recyclages antérieurs, du type d’enrobé, des additifs utilisés, etc. Afin de caractériser la recyclabilité des mélanges, un indicateur qualitatif est proposé lors de l’analyse multicritère. Cet indicateur ne fait pas partie de l’inventaire du cycle de vie, mais constitue un critère supplémentaire pour l’aide à la décision.

La prise en compte des matériaux recyclés dans l’inventaire est complexe. L’allocation des matériaux recyclés aux processus unitaires est à définir. (Häkkinen et Mäkelä 1996) considère que chaque construction est responsable de la totalité des matériaux qu’elle utilise. Donc, dans l’utilisation de matériaux recyclés, le fraïsat d’enrobé est considéré comme un matériau de base. (Harvey, Santero et al. 2010) mentionne d’autres possibilités comme une allocation des émissions à 50/50 entre la construction initiale et la nouvelle construction. Dans cette recherche, on suppose que les enrobés fabriqués ne contiennent pas de matériaux recyclés, conformément à l’analyse performantielle en laboratoire.

7.7.3 Inventaire des émissions et de la consommation d’énergie

Cette étape consiste à quantifier les différents flux traversant les processus unitaires du système. L’inventaire des flux élémentaires s’effectue en multipliant l’inventaire de production – les flux de référence ou flux intermédiaires pour les processus du système - par des facteurs d’émission ou d’extraction (quantité de substance émise ou extraite). Lors de l’inventaire des flux, l’hypothèse d’agrégation des émissions d’une même substance est faite afin de simplifier la procédure. Nous donnons ici quelques précisions pour les processus clefs i.e. les processus ayant la plus grande influence sur le total de l’inventaire du cycle de vie.

Production du bitume

Les données fournies par (Blomberg, Boussad et al. 1999), reprise notamment par (Stripple 2000) sont proposées. Ces données vont de l’extraction du pétrole brut au stockage du bitume à la raffinerie, prêt à être livré au client. Un bitume 50/70 de distillation directe est considéré, dont la provenance est répartie entre le Moyen-Orient (70%) et le Venezuela (30%). La Figure 7-15 indique les processus unitaires considérés et les limites du système. Dans cette figure, la production d’électricité concerne l’impact environnemental imputable à l’électricité importée pour la fabrication du bitume. Ces données constituent une moyenne de mesures lors de la production d’un bitume standard. L’utilisation de données moyennes pour la production du bitume est pertinente, contrairement à la fabrication de l’enrobé qui nécessite des données spécifiques selon le type d’application.

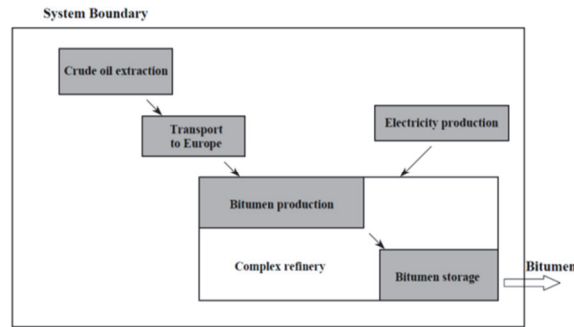


Figure 7-15 : Limites du système pour la production du bitume selon (Blomberg, Boussad et al. 1999)

Une mise à jour des données est faite par (Boustead 2005). L'auteur s'intéresse à la production et l'approvisionnement en pétrole brut de l'Europe de l'ouest, ceci en fonction de la provenance du pétrole et des flux d'importation.

L'énergie nécessaire à la production du bitume est largement discutée et différentes sources de données existent ; ces données se différenciant entre autre par les conditions technologiques, géographiques et temporelles ainsi que le processus d'allocation des différents produits obtenus par raffinage. (Zapata et Gambatese 2005) recueille des valeurs allant de 0.42 MJ/kg à 6 MJ/kg. (Wang, Lee et al. 2004) discute du processus d'allocation entre les différents produits pétroliers d'une raffinerie. En règle générale, les bilans sont effectués sur la base d'une allocation par masse, valeur énergétique ou valeur économique, au niveau des produits finis de la raffinerie. L'auteur effectue une analyse au niveau des sous-processus internes à la raffinerie et démontre les différences selon le type d'analyse effectuée et la prise en compte ou non des sous-processus. Sans une connaissance détaillée de l'allocation énergétique, une approche agrégée au niveau de la raffinerie peut conduire à des sous- ou surestimations de l'énergie utilisée pour un produit donné. Ceci explique la variabilité qui peut être trouvée dans les données relatives aux liants bitumineux. La Figure 7-16 propose un comparatif selon différentes sources. Ces données sont du même ordre de grandeur que les données proposées dans le cadre de cette recherche.

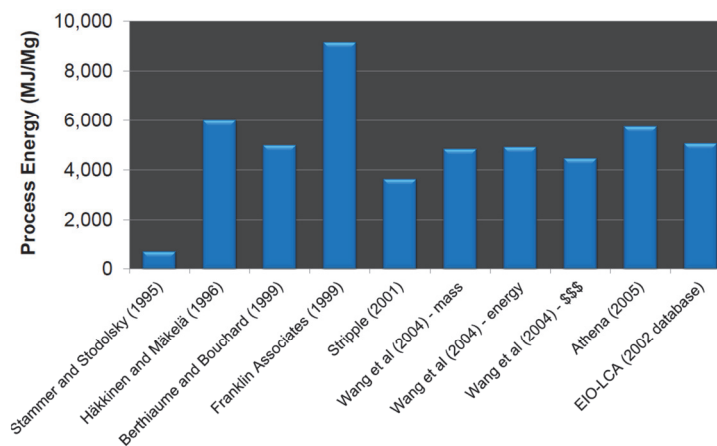


Figure 7-16 : Comparatif d'énergie nécessaire à la production du bitume (Harvey, Santero et al. 2010)

Enrobage (fabrication, malaxage)

De nombreuses données existent pour la fabrication des mélanges en centrales d'enrobage. La plupart des données à disposition concernent la production d'enrobé à chaud. Dans le cadre de ce travail, nous exploitons des données mesurées sur les centrales suisses ainsi que des données issues de la littérature.

Des données théoriques calculées de la consommation d'énergie en centrale peuvent également être utilisées. Pour plus de détails, on pourra consulter le Chapitre 6.

Concernant les données issues de la littérature, la consommation énergétique s'étend de 189 MJ/t à 321 MJ/t pour les enrobés à chaud et de 88 MJ/t à 234 MJ/t pour les enrobés tièdes. La variabilité de la consommation d'énergie peut être expliquée par l'influence de nombreux facteurs sur la consommation énergétique et les émissions : le type de centrale et son niveau de modernité, le type de mélange, l'approvisionnement énergétique, la calibration du brûleur, les conditions climatiques, etc. (Stripple 2000) propose des valeurs allant de 276 MJ/t à 389 MJ/t pour un enrobé à chaud. (EAPA 2007) indique des valeurs typiques de consommation en centrale entre 252 MJ/t et 360 MJ/t. D'autres données peuvent être insérées selon les informations à disposition de l'utilisateur. Dans la perspective d'une comparaison de différents types d'enrobés, il est nécessaire d'utiliser des données pour une seule et même installation. Ces données n'étant que rarement disponibles, un calcul de l'énergie et des émissions peut alors s'avérer pertinent.

Elaboration des additifs

Les données relatives à la fabrication des additifs, en particulier les additifs utilisés pour les enrobés tièdes, sont très difficiles à obtenir en raison de la jeunesse des produits ainsi que du secret technologique entourant ces produits. Pour la fabrication de cire, la base de données asPECT est utilisée. Pour l'additif chimique utilisé dans l'enrobé ET-C, les données proviennent du fournisseur.

Tout en gardant à l'esprit la variabilité de ces données, on peut remarquer la très grande consommation énergétique de 73 MJ/kg pour la cire et 79 MJ/kg pour l'additif chimique. Cette consommation est directement liée à la complexité technologique pour l'élaboration des additifs. La cire utilisée est une cire obtenue par synthèse de Fischer-Tropsch (FT). Le procédé de Fischer-Tropsch a été développé initialement en 1925. Il a été affiné au cours des dernières années afin de produire la cire utilisée aujourd'hui. De manière générale, le procédé FT procède à une réaction chimique de catalyse à haute pression et haute température de monoxyde de carbone et d'hydrogène afin de les convertir en hydrocarbures. Ce procédé qui nécessite des investissements très lourds permet de produire des cires solides à température ambiante ou un mélange liquide d'hydrocarbures pouvant être transformé en carburant synthétique. Le procédé de Fischer-Tropsch possède un bilan d'émissions de CO₂ très lourd ainsi qu'un rendement énergétique global relativement limité.

Selon la quantité ajoutée, la fabrication des additifs peut jouer un rôle non négligeable dans l'inventaire du cycle de vie d'un enrobé. Par exemple, la cire ajoutée à un taux de 3% de la masse de bitume représente une consommation énergétique de 110 MJ par tonne d'enrobé (teneur en bitume sur enrobé admise à 5%) alors que le bitume nécessite pour son extraction et raffinage une énergie de 217 MJ (4.34 MJ/kg). De par sa teneur plus faible (0.4% de la masse de bitume), l'additif chimique présente un impact plus réduit que la cire. Ceci peut influencer significativement le bilan global.

7.8 Etablissement des indices performantiels (Partie 1 du modèle)

L'analyse multicritère proposée considère les paramètres relatifs à l'inventaire du cycle de vie ainsi que les performances mécaniques des différents enrobés. Les performances jouent un rôle important dans un processus décisionnel, elles influencent les opérations de maintenance et donc les coûts futurs pour le gestionnaire.

Performances considérées

Les performances sont évaluées sur l'enrobé, à un instant donné (en général lors de la fabrication). Elles ne font donc pas partie de l'ICV, mais constituent un indicateur supplémentaire indépendant. Les

caractéristiques intrinsèques de l'enrobé telles que le module, la résistance mécanique (essai brésilien) ou les caractéristiques des constituants et du mélange (granulats, sable, filler, bitume, additif, module de richesse,...), ne peuvent être directement assimilées à des performances de l'enrobé. Elles ont cependant une incidence directe sur le comportement performantiel. Par exemple, un module complexe abaissé par une augmentation de la teneur en liant (matériau élastique) est idéal pour un bon comportement à la fatigue, pour autant que la compacité soit satisfaisante. Par contre, un module complexe élevé est généralement favorable si l'on considère le comportement aux déformations permanentes.

Dans l'optique d'une comparaison d'enrobés bitumineux pour couche de base (type AC T 22S), les performances suivantes ont été sélectionnées sur la base des sollicitations subies par la couche et des particularités relatives aux procédés tièdes (les essais sont détaillés au chapitre 4) :

- Sensibilité à l'eau : La sensibilité à l'eau est un des paramètres potentiellement critiques des enrobés tièdes et elle peut être une cause de dégradation prématurée de l'enrobé.
- Résistance aux déformations permanentes : La résistance à l'orniérage est une performance prépondérante dans le cas de couches de base. L'essai permet de caractériser le mélange et d'évaluer sa durée de vie.
- Résistance à la fatigue : La résistance à la fatigue de l'enrobé caractérise sa durée de vie. Il est particulièrement important d'avoir un bon comportement à la fatigue du mélange utilisé en couche de base car elle contribue de manière prépondérante à la durabilité de la chaussée.

Dans le modèle développé, le choix des performances peut être modifié selon les exigences de l'utilisateur. Par exemple l'analyse d'une couche roulement pourrait nécessiter la prise en compte du désenrobage.

Avant l'établissement des indices, une vérification préliminaire du seuil d'acceptabilité des performances est effectuée dans le modèle. Le seuil d'acceptabilité est fixé par l'utilisateur au choix selon la norme suisse, une autre norme sélectionnée ou alors une valeur personnelle. Dans le cas où la valeur seuil n'est pas respectée, un message d'alerte est indiqué et l'indice normalisé est alors de 0.

Deux types d'indices sont déterminés pour être intégrés lors de l'analyse multicritère : l'indice brut et l'indice normalisé.

Indice brut

L'indice brut correspond aux résultats numériques de l'essai. Il possède différentes unités selon la performance considérée et servira au calcul de l'indice normalisé. L'utilisation de cet indice permet d'éviter un traitement des données et ainsi une perte de précision. Nous considérons les indices bruts suivants :

- Sensibilité à l'eau : L'indice brut de la sensibilité à l'eau est le ratio ISTR représentant le rapport des résistances moyennes à la compression simple après immersion des éprouvettes à celles obtenues sans immersion. Le ratio ITSr est exprimé en pourcent ; sa valeur est à maximiser.
- Résistance aux déformations permanentes : l'indice brut est la profondeur d'ornièr à 30'000 cycles, exprimée en pourcent. La valeur de résistance aux déformations permanentes est à minimiser.
- Résistance à la fatigue : L'indice brut est le niveau de déformation ε_6 à 10^6 cycles. ε_6 représente la déformation conduisant à la rupture de l'éprouvette par fatigue sous certaines conditions (10 °C, 25 Hz) pour un million de chargements. Sa valeur est à maximiser.

La pente de la loi de fatigue pourrait également être considérée comme indice brut puisqu'elle fournit des informations concernant la durée de vie du matériau (une pente nulle correspond à une durée de vie infinie du matériau, une valeur ε_6 basse traduit la fragilité du matériau).

Indice normalisé

L'indice brut ne peut être systématiquement utilisé lors de l'analyse multicritère en raison de ses échelles et unités variables selon la performance. Les méthodes graphiques d'analyse (diagramme polaire notamment) nécessitent l'utilisation d'un indice normalisé. La procédure de calcul de l'indice normalisé d'une performance donnée est illustrée dans la Figure 7-17.

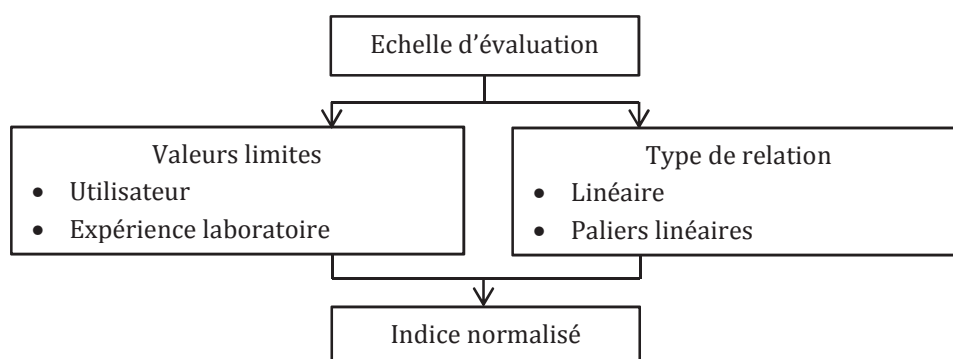


Figure 7-17 : Procédure d'établissement de l'indice normalisé pour une performance donnée

L'indice normalisé est calculé selon une échelle d'évaluation allant de 1 à 5, conformément à ce qui est proposé par (Maystre, Pictet et al. 1994). La note de 1 correspond à un comportement mécanique très mauvais, mais respectant le seuil d'acceptabilité. Lorsque la valeur est inférieure au seuil limite, la note de 0 est attribuée.

Tableau 7-6 : Echelle d'évaluation pour l'indice normalisé

Evaluation verbale	Evaluation chiffrée
Très bon	5
Bon	4
Moyen	3
Mauvais	2
Très mauvais	1

Les évaluations verbales (ou chiffrées) sont ensuite mises en relation avec les résultats d'essais pour le calcul de l'indice normalisé. Pour cela, il est nécessaire de définir une correspondance entre l'évaluation et le résultat d'essai. Pour contourner la difficulté de faire correspondre à chaque évaluation un résultat d'essai, nous avons choisi d'adopter une corrélation linéaire entre les évaluations extrêmes et la moyenne, définie par l'introduction de trois valeurs pour les appréciations « Très bon », « Moyen » et « Très Mauvais ». Pour le choix des valeurs limites l'utilisateur peut insérer ses propres valeurs ou alors utiliser les valeurs issues de l'expérience acquise au laboratoire du Lavoc lors d'essais sur couches de base (AC T). Les valeurs proposées sont les suivantes :

- Sensibilité à l'eau (paramètre : ratio ITSR)
 - Très mauvais (note=1) : La norme SN 640-431-1b-NA fixe le seuil d'acceptabilité à 70%. Au vu de l'expérience acquise depuis l'établissement de la norme, cette valeur semble trop conservatrice. Des matériaux au comportement mécanique dangereux peuvent être acceptés avec une valeur limite aussi basse. Pour cela, le ratio de 80% est fixé comme valeur limite du comportement très mauvais.
 - Moyen (note=3) : Un comportement moyen est assimilé à un ratio ITSR de 86%.

- Très bon (note=5) : Le ratio maximal théorique est de 100%, le critère étant à maximiser.
- Résistance aux déformations permanentes (paramètre : profondeur d'ornièrre à 30'000 cycles)
 - Très mauvais (note=1) : Un comportement très mauvais est assimilé à un enrobé présentant 10% d'ornièrre. Ceci signifie que le comportement est à la limite d'acceptabilité au sens de la normalisation SN 640-431-1b-NA.
 - Moyen (note=3) : La norme SN 640-431-1b-NA fixe l'exigence la plus sévère pour l'enrobé à module élevé EME C1 (résistant à l'ornièrage) pour lequel une valeur $\leq 5\%$ est demandée. Il n'y a donc pas d'exigence en-dessous 5%. Considérant l'expérience acquise en laboratoire, un ornièrage situé entre 0 et 5% peut être considéré comme bon. Un comportement moyen est assimilé à une profondeur d'ornièrre de 7%.
 - Très bon (note=5) : La profondeur d'ornièrre étant à minimiser, la valeur seuil est fixée à 0%.
- Résistance à la fatigue (paramètre ϵ_6 sur éprouvettes trapézoïdales)
 - Très mauvais (note=1) : La normalisation suisse ne contient pas d'exigences à la fatigue pour les enrobés de type AC T. Les valeurs seuils sont donc fixées sur la base de l'expérience acquise et des exigences normatives relatives aux enrobés à module élevé (EME) selon SN 640-431-1b-NA. La valeur limite de comportement très mauvais est fixée à 70 [10⁻⁶]. Cette valeur correspond au minimum exigé pour la grave bitume GB1 (équivalent à l'AC F suisse) selon la méthode française de dimensionnement (SETRA 1994).
 - Moyen (note=3) : Un comportement moyen pour couche de base est assimilé à une déformation de 90 [10⁻⁶].
 - Très bon (note=5) : Les performances minimales requises pour un enrobé EME C2 (résistant à la fatigue) sont de 130 [10⁻⁶]. La valeur limite pour un comportement très bon d'un enrobé AC T est donc fixée à 130 [10⁻⁶].

Une fois la correspondance entre l'évaluation et les valeurs limites établie, deux options d'interpolation sont proposées pour le calcul de l'indice normalisé. Selon le choix de la méthode de calcul, l'indice normalisé peut être différent. Il est donc recommandé de conserver le même type de relations lors de la comparaison de plusieurs produits :

- Interpolation linéaire : le calcul de l'indice normalisé est effectué par interpolation linéaire entre la valeur limite (note=1) et la valeur limite (note=5). On suppose alors une linéarité de la dégradation entre le comportement le meilleur et le moins bon i.e. la différence entre un ratio ITSr de 100% et 95% est la même que entre un ratio ITSr de 75% et 70%.
- Interpolation par paliers linéaire : L'interpolation linéaire peut sembler restrictive. La différence d'appréciation entre deux résultats d'essais n'est pas nécessairement la même ; elle peut dépendre du niveau dans la gamme de résultat considérés. Pour cela, un calcul avec deux interpolations linéaires est proposé. La première interpolation se fait entre la valeur limite (note=5) et la valeur limite (note=3). La seconde interpolation se fait entre la valeur limite (note=3) et la valeur limite (note=1).

Les différences entre les paliers relatifs à deux évaluations verbales successives étant faibles, des relations plus complexes ne semblent pas adaptées. De plus, le choix des facteurs pour les relations relève d'une certaine incertitude. Les résultats de l'interpolation linéaire et de l'interpolation par paliers sont présentés dans les Figure 7-18, Figure 7-19 et Figure 7-20. Les valeurs limites (note=5), (note=3) et (note=1) sont les valeurs par défaut proposées par le Lavoc.

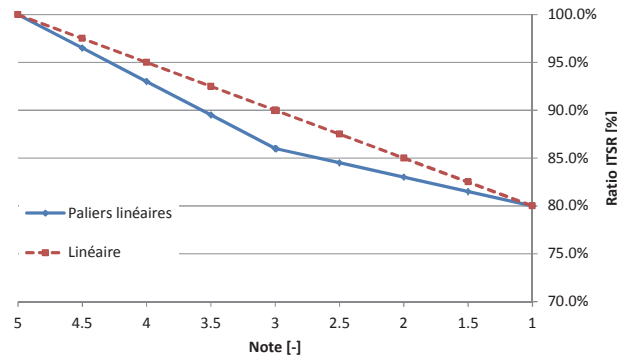


Figure 7-18 : Interpolations pour le calcul de l'indice normalisé : Sensibilité à l'eau

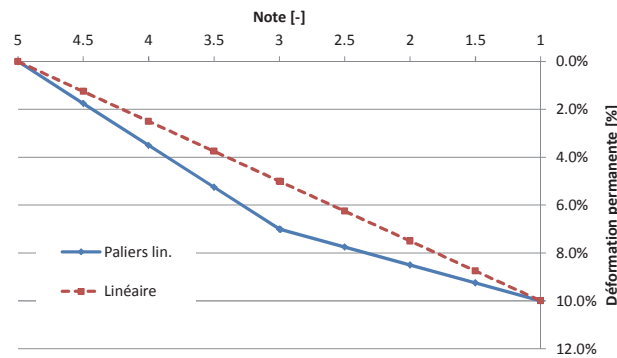


Figure 7-19 : Interpolations pour le calcul de l'indice normalisé : Résistance aux déformations permanentes

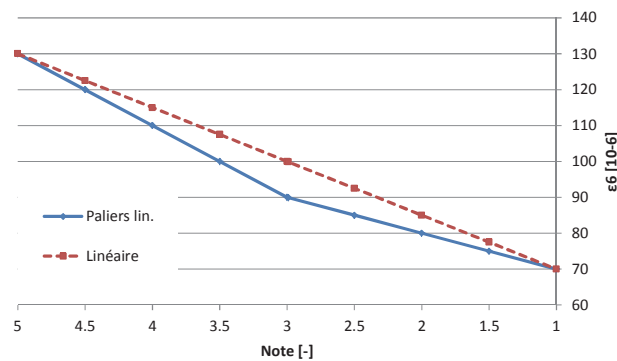


Figure 7-20 : Interpolations pour le calcul de l'indice normalisé : Résistance à la fatigue

Nous pouvons observer que le calcul de l'indice normalisé est effectué en supposant une continuité de l'indice entre différents paliers. Il serait également possible de proposer un indice sur la base de valeurs discrètes.

L'indice normalisé de performance est utilisé dans les niveaux 1 (analyse Pareto) et 2 (analyse graphique) de l'analyse multicritère.

7.9 Synthèse des indicateurs et résultats (Partie 1 du modèle)

La première partie du modèle multicritère développée ici permet d'établir les indicateurs de l'inventaire du cycle de vie (énergie, émissions, coûts) ainsi que les indicateurs performantiels (indice brut et indice normalisé). Ces résultats sont ensuite insérés dans la seconde partie traitant de l'analyse multicritère. Afin de faciliter le recueil des données nécessaires, une fiche de synthèse exportable est automatiquement créée.

Des copies du programme et des différentes étapes de calcul pour la première partie du modèle sont disponibles en Annexe C. Le détail des calculs peut être consulté dans le fichier modèle au format MS-Excel.

7.10 Enseignements

Ce chapitre décrit les bases de l'analyse et de l'inventaire du cycle de vie. Une étude détaillée des expériences dans le domaine des chaussées routières est également effectuée. Dans la deuxième partie, le modèle d'évaluation multicritère est expliqué de manière globale avant de détailler la procédure d'inventaire du cycle de vie et d'établissement des indicateurs de performance (partie 1 du modèle).

L'inventaire du cycle de vie est une démarche complexe dépendant de multiples paramètres. Afin de proposer une procédure transparente et faciliter l'analyse des résultats, les différents paramètres et hypothèses doivent être clairement stipulés. Parmi ces paramètres, la définition des limites du système (spatiales et temporelles) et les bases de données utilisées jouent un rôle primordial. Malgré les incertitudes inhérentes aux méthodes, l'ICV/ACV est largement utilisée. La méthode semble particulièrement adaptée en tant qu'outil comparatif entre des technologies et l'évaluation des impacts associés.

Dans le modèle développé, les bases de données ne sont pas un objectif prioritaire, mais elles doivent être analysées afin de pouvoir mettre en application la méthodologie mise en place. Pour les données, une méthode hybride est utilisée afin de proposer différentes options à l'utilisateur. Tout d'abord, une base de données spécifique est créée en combinant différentes sources issues de la littérature, d'autres bases de données ou de calculateurs. En plus de ces données, l'utilisateur peut pour certains processus unitaires recourir à des calculs théoriques ou alors à des données issues de mesures en centrale d'enrobage ou en carrière (suisses). Par ailleurs, une certaine flexibilité est laissée avec l'option d'insérer ses propres valeurs. Le modèle se distingue des approches classiques par le système étudié (les enrobés), mais également par l'établissement d'indices de performances. Ainsi, pour chaque variante (enrobé), les différents indicateurs peuvent être déterminés. Le modèle proposé (partie 1) pourrait être développé ultérieurement selon les axes suivants :

- Prise en compte d'autres couches d'enrobés et d'autres matériaux (bitumineux, béton).
- Création d'une base de données des performances sur la base d'essais en laboratoire, d'essais accélérés (accelerated loading testing - ALT) et d'expériences in-situ. A cet effet, le modèle développé pourrait être couplé avec la base de données matériaux du Lavoc contenant l'ensemble des résultats d'essais du laboratoire.

Les principaux défis pour la réalisation des analyses du cycle de vie dans le domaine des chaussées sont :

- Etablir des méthodes d'évaluation de la qualité et des incertitudes des données utilisées.
- Créations de lignes directrices unanimement reconnues pour l'évaluation des enrobés et harmonisation des procédures.
- Disposer de données de processus secondaires et procédés innovants. En particulier, une base de données spécifique pouvant être couplée à une base de données existante serait nécessaire. Pour cela, une coopération des acteurs industriels est indispensable.
- Définir une méthode de prise en compte des matériaux recyclés (définition de l'unité fonctionnelle et des bornes). L'ACV s'effectue du « berceau à la tombe », c'est-à-dire jusqu'à la fin de vie du produit. La fin de vie en matière de chaussées routières est difficile à déterminer et le recyclage potentiel doit être pris en considération. Ceci est discuté par (De Larrard 2009) qui

aborde également les questions relatives à l'analyse du cycle de vie des infrastructures routières.

- Inclure la maintenance et ses effets sur le trafic. L'ICV pourrait alors être couplée avec des outils de simulation de trafic. La prise en compte du trafic demande cependant d'évaluer préalablement l'effet des caractéristiques de la chaussée sur le pneumatique et la consommation des véhicules.

Le choix de la variante optimale est une autre particularité de la méthodologie et il sera discuté dans la seconde partie du modèle développée au chapitre 8.

8. EVALUATION MULTICRITERE DES ENROBES BITUMINEUX

Dans la première partie du modèle (chapitre 7), l'inventaire du cycle de vie et l'établissement des indices de performances ont été expliqués. Ce chapitre 8 concerne la seconde partie du modèle global d'évaluation des enrobés bitumineux, l'aide à la décision.

Le développement du modèle multicritère d'aide à la décision est l'une des contributions principales de la recherche. De nombreux calculateurs permettent de déterminer les émissions et la consommation énergétique d'un scénario sur la base de son inventaire (ou analyse) du cycle de vie. Cependant, peu de méthodes prennent en considérations d'autres critères, telles que les performances mécaniques, et proposent ensuite une aide à la décision pour le choix de la variante la plus adaptée. Ceci est lié d'une part à une hypothèse de performances équivalentes des enrobés lors de la réalisation de l'analyse du cycle de vie et d'autre part à une segmentation des compétences. Cette prise en compte des performances de l'enrobé ainsi que d'autres critères qualitatifs et quantitatifs dans le cadre d'une analyse multicritère offre une vue globale de la technologie et permet d'affiner le processus de décision pour finalement encourager l'innovation.

Après une description des familles de méthodes d'évaluation multicritère, une sélection adaptée à la problématique sera proposée. Les méthodes choisies seront ensuite étudiées et la méthodologie de développement du modèle multicritère détaillée.

8.1 Problématique

Les premières réflexions sur l'aide à la décision se situent peu avant la seconde guerre mondiale, dans le domaine militaire. A l'origine, les problèmes de décision se modélisaient souvent par des méthodes d'optimisation sous contrainte avec de la programmation mathématique rigoureuse et bien posée (programmation linéaire, programmation non linéaire, variables entières,...). Les recherches étaient principalement préoccupées par les modèles d'optimisation unicritère. Au début des années 1970, la nécessité d'une aide multicritère à la décision se fit sentir. La voie a alors été ouverte par le Prof. B. Roy pour l'école française et le Prof. A Geoffrion pour l'école américaine (Bouyssou, Dubois et al. 2006). La différence avec les méthodes d'algorithme unicritère appliquées jusqu'alors est importante. (Schärlig 1985) propose des considérations sur les différences entre optimisation linéaire (recherche opérationnelle) et méthodes multicritères. (Mena 2004) discute dans le détail de la raison d'être des méthodes multicritères et de son positionnement par rapport au domaine de la recherche opérationnelle. Nous pouvons résumer la situation ainsi :

- La recherche opérationnelle permet de trouver la solution optimale pour l'utilisateur dans le cas de problèmes qu'il est possible d'isoler dans le processus de gestion. Un optimum est cherché mais cette recherche n'est pas toujours justifiée ; parfois la recherche de l'optimum est vide de sens.
- Selon (Mena 2004), la recherche opérationnelle se base sur des hypothèses lourdes qui la rendent difficilement applicable au multicritère : globalité (suppose que parmi les actions potentielles on pourra désigner une action unique comme la meilleure), stabilité (ensemble des actions potentielles jamais remises en cause lors de l'étude) et comparabilité transitive qui sera discutée plus loin. L'hypothèse de globalité présume que toutes les actions potentielles comprennent tous les aspects de la question et sont mutuellement exclusives (i.e. une seule action sera choisie), ce qui est rarement le cas dans la réalité où les actions sont souvent complémentaires et partielles.
- Dans les méthodes multicritères, l'ensemble du processus de gestion est considéré. Il n'y a plus de solution optimale. Les résultats sont le produit d'interactions entre le chercheur et le décideur. On recherche alors une solution acceptable et réaliste, compte tenu de l'environnement et de ses contraintes.
- Les méthodes multicritères sont donc focalisées sur une représentation correcte du problème avec une critique des données et remise en cause permanente du modèle. On abandonne l'idée qu'un algorithme d'optimisation puisse imposer une solution au décideur, en admettant que le rôle de la méthode est d'aider le décideur à construire une solution satisfaisante. Ceci se fait parfois au détriment de la rigueur mathématique. Les calculs sont moins complexes dans le cas de l'aide multicritère à la décision (AMCD) que dans le cas de la recherche opérationnelle, le but étant plutôt de fournir une adéquation entre la méthode utilisée et la réalité. La solution finale dépendra donc de la méthode choisie, mais également de la personnalité du (des) décideur(s).

L'aide multicritère à la décision peut être perçue comme une méthode complémentaire à la recherche opérationnelle. Etant donné l'objectif du modèle développé dans ce travail, les méthodes multicritères semblent les plus adaptées.

Dans l'ensemble de la recherche l'aide à la décision est utilisée comme outil de réflexion, de choix, et de support à la communication pour le décideur. Les différents acteurs d'un processus d'aide à la décision ne font pas l'objet d'une analyse spécifique, l'accent étant porté sur les méthodes. Il faut également garder à l'esprit que par définition, l'aide à la décision est un processus subjectif (Schärlig 1985). On tente au-travers des différentes méthodes de diminuer cette subjectivité, mais il en subsiste toujours

une certaine partie. La subjectivité reflète le système de valeurs du décideur et des intervenants et elle conditionne la décision finale. Nous nous efforçons de dissocier les aspects objectifs des aspects subjectifs qui sont les hypothèses relatives à la méthode ainsi que parfois la matrice de performances des variantes.

Afin de faciliter la compréhension de la suite, nous définissons les éléments suivants pour le contexte de la présente recherche :

- Nous appelons variante ou action potentielle (ou encore scénario) les différents éléments faisant l'objet de l'analyse multicritère. Dans le cadre de cette recherche il s'agit donc des enrobés bitumineux.
- Les critères sont les différents éléments considérés pour évaluer et juger les variantes. Par extension de langage, les critères sont parfois appelés attributs. Les critères sont par exemple la consommation d'énergie ou les performances mécaniques. Ils peuvent être quantitatifs ou qualitatifs.
- Par analogie avec le monde économique, on comprendra que l'utilité caractérise une mesure de la satisfaction relative. (Schärli 1985) indique que les méthodes d'agrégation complète dont nous discuterons par la suite recherchent toutes une fonction d'utilité. Ceci sous-entend que les méthodes cherchent à calculer « *l'utilité totale que l'intéressé peut tirer de chacune des actions potentielles* ». La mesure de l'utilité totale est obtenue en combinant les utilités partielles ou élémentaires que présente l'action aux yeux des différents critères.

8.2 Méthodes multicritères d'aide à la décision

Un problème multicritère est difficile à traduire en équations mathématiques. (Maystre, Pictet et al. 1994) indique qu'il peut être traité selon deux états d'esprits, le second étant appliqué ici :

- Introduire des hypothèses restrictives telles que le problème puisse être résolu par une méthode classique, mais avec le risque d'un certain décalage par rapport à la réalité.
- Utiliser une méthode d'analyse multicritère qui se base sur des modèles bâtis en partie sur des hypothèses mathématiques et en partie sur des informations recueillies auprès des décideurs.

De manière globale, un processus d'aide multicritère à la décision se déroule en cinq étapes successives et indépendantes, le processus pouvant être itératif (Schärli 1985) :

1. Inventorier les variantes (actions potentielles)
Cette liste n'est pas nécessairement exhaustive et définitive. Elle peut évoluer au cours du processus.
2. Lister les critères
La famille de critères doit être exhaustive, utilisable pratiquement (opérationnelle), décomposable (dans l'optique de la fonction d'utilité), non-redondante et minimale.
3. Pondérer les critères
La subjectivité est introduite notamment lors de la pondération. Ne pas utiliser de pondération est une subjectivité implicite.
4. Juger les actions
Chaque variante est évaluée par rapport à chacun des critères. Lorsque les critères ne sont pas mesurables, un indicateur qualitatif leur est associé. L'ensemble des performances des actions (variantes) par rapport aux critères forme le tableau de performances ou matrice d'évaluation. Dans ce tableau, chaque ligne représente une variante et chaque colonne un critère. La pondération peut aussi y être répertoriée.
5. Agréger les jugements

Les jugements sont agrégés afin de définir quelle est globalement la meilleure solution.

Les quatre premières étapes sont communes à pratiquement toutes les méthodes multicritères. La cinquième étape est une étape technique pour laquelle différentes méthodes existent. Nous présentons ici une introduction non exhaustive aux familles de méthodes d'agrégation avant de détailler les méthodes choisies pour le modèle développé.

8.2.1 Agrégation complète

Les méthodes d'agrégation complète (ou agrégation complète transitive) sont développées par les tenants de « l'école nord-américaine » dès la fin des années 1960. De manière générale, ces méthodes consistent à attribuer une fonction d'utilité partielle à chaque critère, évacuant toute situation d'incomparabilité. Ensuite, pour chacune des variantes, une fonction mathématique agrège les différentes utilités partielles propres à chaque critère. Les méthodes d'agrégation complète procèdent donc variante par variante et n'effectuent pas de comparaisons entre les variantes comme le font les méthodes d'agrégation partielle. Partant d'un problème multicritère, les méthodes d'agrégation complète le ramènent à un problème monocritère.

Ces méthodes présentent l'avantage de proposer une solution synthétique et unique, parfois appelée utilité globale de la variante. Le classement est clair et l'interprétation aisée. On reproche parfois aux méthodes d'agrégation complète une complexité mathématique pouvant faire un effet de boîte noire. La construction effective de la fonction d'utilité peut également poser de nombreux problèmes en pratique dans le cas d'utilité multicritère. (Bouyssou, Dubois et al. 2006) détaille différentes méthodes de décomposition dans le certain (chaque acte conduit à une conséquence unique avec certitude) et l'incertain (chaque acte a plusieurs conséquences possibles).

De plus, ces méthodes autorisent la compensation des jugements et la transitivité entre les différents critères (on parle d'agrégation complète transitive). Pour rappel, la transitivité d'une relation R , quelle que soit la relation, est définie ainsi : aRb et $bRc \Rightarrow aRc$. Une relation transitive sera par exemple « est supérieur à ». Une relation ne jouit pas nécessairement de la transitivité comme par exemple la relation « vaut le double de ». La préférence n'est pas systématiquement une relation transitive et c'est pourquoi les modèles d'agrégation partielle admettent l'intransitivité contrairement aux modèles d'agrégation complète.

De multiples variantes de méthodes d'agrégation complète existent. Certaines de ces méthodes permettent la prise en compte de notions probabilistes sur les données et la gestion de l'incertitude ; ceci sera développé plus loin. Nous pouvons citer parmi les méthodes d'agrégation complète courantes :

- Addition de notes pondérées: Ces méthodes présentent le désavantage de masquer l'applicabilité effective d'une action potentielle en permettant la compensation d'une mauvaise note par une meilleure. L'existence de différentes échelles d'évaluation pour chaque critère est une seconde carence de cette méthode qui peut engendrer des changements de classement selon les unités de chaque critère et leur échelle associée.
- Produits de ratios pondérés.
- Moyenne arithmétique, moyenne géométrique, médiane, ...
- Théorie de l'utilité multi-attribut (MAUT – Multi attribute utility theory) : L'objectif de la méthode est d'estimer ou construire une fonction d'utilité agrégeant tous les critères en une fonction unique $U(x)$ représentant le mécanisme de préférence globale du décideur. Si la fonction $U(x)$ existe, alors le problème est ramené à un problème unicritère consistant à en chercher son maximum. La critique principale faite à cette théorie de l'utilité multi-attribut concerne l'existence de la fonction $U(x)$ ainsi que les difficultés théoriques et pratiques, par

exemple dans le mode de construction de la fonction d'utilité unique. En ramenant un problème multicritère à un problème unicritère, on s'éloigne également de la structure initiale du problème.

- Méthode UTA (utilités additives) : La méthode possède les mêmes fondements que la MAUT mais, au lieu de chercher à fixer les utilités partielles à chaque critère l'un après l'autre, la démarche part de la préférence globale du décideur pour déduire toutes les utilités partielles à la fois. La préférence du décideur est donc désagrégée. Cette méthode nécessite une certaine interaction entre le décideur et le chercheur.
- Méthode de Zionts et Wallenius : Méthode qui consiste à supposer que l'ensemble des critères et objectifs sont des fonctions concaves à maximiser, l'échantillon de contraintes étant convexe. La fonction d'utilité (linéaire) n'est pas connue initialement par le décideur, mais elle est définie sur la base d'une série de questions fermées posées au décideur (Zionts et Wallenius 1976; Schärli 1985).
- Intelligence artificielle (IA) : L'intelligence artificielle s'est intéressée aux problèmes d'aide à la décision à partir du début des années 1990. Elle n'est pas à proprement parler une méthode d'aide à la décision multicritère, mais on lui trouve des applications dans le domaine de l'agrégation complète. La méthode focalise son attention sur les problèmes de représentation et sur la mise en œuvre de procédures générales indépendantes des problèmes. (Bouyssou, Dubois et al. 2006) mentionne que ces approches sont pertinentes si l'on n'a pas le temps de construire des fonctions d'utilité ou si une représentation approximative des préférences et/ou de l'incertitude suffisent. L'utilisation de l'IA a pour but de proposer des nouveaux outils plus concis pour formuler des connaissances et des préférences dans le cas où la représentation des relations de préférence ou distribution de probabilité devient une tâche trop ardue.
- Les déclassements comparés : Dans cette méthode, on attribue tout d'abord à chaque action potentielle le rang maximal dans une échelle d'évaluation globale. Puis on décline cette action sur l'échelle, en fonction des évaluations qu'elle a reçues pour les différents critères. L'ampleur du déclassement est déterminée par l'écart par rapport au maximum de chaque critère. Dans cette méthode, la variante la « meilleure » est donc la moins déclassée. L'utilité correspond aux degrés que l'action n'a pas perdus (Schärli 1985).
- Analytic hierarchy process (AHP) : Méthode développée en 1971 par Thomas L. Saaty. La méthode consiste tout d'abord à décomposer le problème complexe en une structure hiérarchique de différents niveaux. Les éléments d'un même niveau de la hiérarchie sont ensuite comparés deux par deux par leur importance relative, par rapport à l'élément du niveau supérieur. Une échelle spécifique d'évaluation est utilisée pour les comparaisons (combinaisons binaires). Des priorités (importance relative) sont ensuite calculées par la résolution d'un système d'équations issu de l'étape précédente. Un score d'évaluation global attaché à chacune des alternatives est ensuite calculé et l'on obtient alors pour chaque critère un vecteur caractérisant son impact sur les alternatives. La cohérence des jugements est ensuite déterminée par l'intermédiaire d'un indice de cohérence.
- Analyse coût-bénéfice (ACB).
- Monétarisation.

On pourra consulter (Schärli 1985; Mena 2004; Bouyssou, Dubois et al. 2006; Bouyssou, Dubois et al. 2006) pour plus de détails et d'autres propositions de méthodes.

8.2.2 Agrégation partielle

Les méthodes d'agrégation partielle sont développées par les tenants de « l'école européenne ». (Schärlig 1985) parle de partielle car « *on décide d'emblée qu'on ne dégagera que les éléments sûrs ... même s'ils ne sont pas assez nombreux ou assez probants, pour permettre de trancher de manière nette et précise* ». Cette famille de méthodes multicritères exploite le caractère ordinal et mal déterminé des nombreuses informations afin de proposer une aide à la décision plus pragmatique. D'autre part, l'idée qu'un algorithme d'optimisation impose la solution à un décideur est abandonnée en admettant que la méthode a pour rôle d'aider le décideur dans son processus. La procédure par agrégation partielle est basée sur la comparaison de variantes deux à deux, critère par critère. Sur la base de ces comparaisons, des relations de surclassement entre les variantes sont établies. Le surclassement est traduit par une préférence faible, préférence forte, indifférence ou incomparabilité (ces relations seront détaillées plus loin). Une synthèse des différentes relations de surclassement est ensuite effectuée, généralement sous une forme graphique afin, selon la méthode appliquée, de fournir un tri des variantes (identification du sous-ensemble des meilleures variantes appelé noyau), procéder à un rangement (classement) ou faire ressortir la meilleure variante.

Contrairement aux méthodes d'agrégation complète, les méthodes d'agrégation partielle autorisent l'incomparabilité entre les variantes. L'intransitivité est également admise. Ceci confère aux méthodes d'agrégation partielle une plus grande richesse dans la comparaison des variantes. On leur reproche parfois un manque de clarté dans les résultats et une certaine complexité de leur interprétation. Toutes les actions ne sont pas nécessairement reliées par des relations de surclassement. Comme la méthode procède à une comparaison des variantes par paires, le nombre d'opérations à réaliser peut s'avérer considérable (pour n variantes, on aura $n \cdot (n-1)$ comparaisons à réaliser). Ceci n'est cependant pas un problème majeur étant donné les outils de calcul à disposition actuellement.

Les méthodes d'agrégation partielle sont fréquemment utilisées dans les projets de gestion environnementale. (Maystre, Pictet et al. 1994) en indique différents exemples d'application. Dans le domaine routier, ces méthodes sont utilisées pour l'aide à la décision dans le choix de variantes de tracé (Tille 2000), mais pas à notre connaissance dans des processus de choix de technologie d'enrobage.

Parmi les méthodes d'agrégation partielle, nous pouvons citer :

- Qualiflex : Cette méthode décrite à la fin des années 1970 relève de la problématique de classement des variantes. L'idée de base consiste à dire que les critères ont certainement un poids dans l'inconscient du décideur, mais que ce poids est difficile à déterminer. Les actions sont classées par leur rang (ordre décroissant) pour chaque critère et non pas par leur valeur ou performance. De même, l'importance d'un critère n'est plus exprimée par son poids, mais par son rang dans l'esprit des décideurs. Lors de l'établissement des rangs, les ex-aequo sont autorisés. Ensuite, le poids des différents critères est varié tout en respectant la compatibilité avec le classement initial donné et un total des poids identique. Suite à cela, pour chacun des jeux de poids compatibles, on passe en revue tous les classements finaux imaginables en les comparant avec le classement de la donnée, ce qui permet d'établir un premier indice de concordance par critère. Un second indice de concordance global est ensuite déterminé avant de procéder à une séparation des variantes pour établir le classement final. Avec cette méthode, le raisonnement est donc uniquement en terme de classement et non pas de comparaison entre deux variantes. Le nombre de possibilités à prendre en compte peut rapidement exploser (Schärlig 1985).
- Oreste : Autre méthode ordinale partant de rangs, contrairement aux méthodes cardinales comme Electre qui considèrent les valeurs. Tout comme pour Qualiflex, le point de départ est

constitué d'autant d'actions de classements qu'il y a de critères, ainsi que d'un classement des critères eux-mêmes. Oreste n'utilise pas de pondération, la méthode procédant ensuite par une analyse graphique (treillis).

- Electre (élimination et choix traduisant la réalité) : Ces méthodes sont les plus connues dans le domaine de l'agrégation partielle. Elles seront largement discutées dans la suite du chapitre.
- Prométhée (preference ranking organisation method for enrichment evaluations) : Tout comme Electre, Prométhée représente chaque solution potentielle comme un vecteur : \mathbb{R}^n , $x=(x_1, \dots, x_n)$ où la valeur x_i représente la performance de x pour le critère i . Dans sa première étape, Prométhée consiste à choisir pour chaque critère i une fonction de préférence f_i . Cette fonction permet de calculer pour chaque paire d'alternatives (x, y) un nombre traduisant le degré de préférence de x sur y et noté $P_i(x,y)$. A la fin de la première étape, on dispose donc d'autant de relations de préférence floue P_i qu'il y a de critères. Dans les étapes suivantes, Prométhée effectue l'agrégation des différentes relations de préférence floues (Bouyssou, Dubois et al. 2006).
- Macbeth (Measuring attractiveness by a categorical based evaluation technique) : Pour toute paire d'objets (a, b) d'un ensemble fini, on demande au décideur dans un premier temps quel objet est préféré (information ordinaire exprimant le rang) avant de lui demander la différence d'attractivité entre les objets (information cardinale de mesurage de la différence). On effectue ensuite une représentation numérique des réponses dans le but de déterminer un classement. (Bouyssou, Dubois et al. 2006) détaille cette méthode.
- Gaia (geometric analysis for interactive assistance) : Cette méthode procède par représentation de l'information (variantes, critères) de manière graphique dans un plan commun. Cette approche descriptive permet de mettre en évidence les conflits entre les critères, identifier les compromis possibles et aide à fixer les priorités.
- N-Tomic : Méthode basée sur trois principaux modules, chaque module correspondant à une routine spécifique pouvant être appliquée à différentes données. Le premier module (M1) aide à la construction d'une série de critères avec l'échelle d'évaluation correspondante. Le second module (M2) consiste en une procédure pour l'établissement d'un cadre de référence et de classes de segmentation selon les exigences du décideur. L'évaluation de chaque candidat est conduite dans le troisième module (M3). On pourra consulter (Massaglia et Ostanello 1989) qui décrit les fondements de la méthode.

8.2.3 Agrégation locale itérative

Les méthodes d'agrégation partielle et d'agrégation complète peuvent être lourdes à appliquer dans le cas d'un grand nombre de variantes. Il est également possible que l'ensemble des variantes soit infini. Dans ce cas, il est recommandé de procéder par une exploration locale en fixant tout d'abord une variante initiale aussi bonne que possible. La suite de la démarche est itérative. On regarde d'abord parmi les variantes proches de la variante initiale, s'il existe une variante qui soit meilleure. Si c'est le cas, cette variante devient alors la variante de référence et le processus de recherche est poursuivi.

Les méthodes par agrégation locale itérative renoncent à une vision globale du projet en mettant en jeu un petit nombre de variantes. Le risque inhérent est de vouloir augmenter le nombre d'itérations, tout en passant à côté d'une variante intéressante. Le contenu théorique de ces méthodes est ardu (nombreuses opérations, complexité), ce qui peut rendre l'acceptation de la méthode difficile.

Les principales méthodes d'agrégation locale itérative sont :

- Programmation linéaire multicritère (PLM).

- Stem (step-method, publiée tout d'abord sous le nom de Procédure d'orientation progressive - Pop).
- Uta interactive.
- Prefcalc.

Ces méthodes ne seront pas traitées dans la suite de la recherche. Plus de détails pourront être trouvés dans (Schärli 1985; Bouyssou, Dubois et al. 2006).

8.2.4 Autres méthodes

La combinaison de méthodes d'agrégation complète et d'agrégation partielle est également possible. Par exemple, des fonctions d'utilités (MAUT) intégrant l'évaluation incertaine des critères peuvent être utilisées comme données d'entrée à la méthode Electre I afin de tirer parti de ses propriétés de non-compensation. (Almeida 2002) propose une application pour le cas de contrats de réparation.

D'autres méthodes peuvent être utilisées pour les procédures d'aide à la décision multicritère, méthodes ne nécessitant pas de traitement des données ni de procédure de pondération. Ces méthodes sont cependant limitées et elles ne permettent que rarement d'obtenir la solution optimale de manière univoque.

La méthode Delphi procède par interrogation d'experts avec différents questionnaires successifs. Elle a pour but de mettre en évidence les convergences d'opinion et essayer de dégager un certain consensus. Le choix des experts (niveau de compétence, indépendance) est une étape cruciale. Ensuite, pour un groupe d'experts sélectionnés et isolés les uns des autres, des questionnaires successifs sont envoyés. Les méthodes Delphi ne sont pas les plus adaptées à notre recherche car elles nécessitent l'interrogation d'un grand nombre d'experts, à plusieurs reprises. On leur préférera pour notre étude des méthodes d'aide à la décision basées sur une certaine rigueur mathématique.

La méthode de Pareto exprime la relation de dominance entre différentes variantes. (Bouyssou, Dubois et al. 2006) indique ainsi la condition minimale à satisfaire : « Pour qu'une solution $x \in D$ soit un possible compromis satisfaisant, il apparaît naturel d'imposer qu'il n'existe aucune autre solution admissible $y \in D$ qui fournisse des valeurs au moins aussi bonnes que celles de x sur chaque critère et même meilleures sur au moins un critère ». La relation de dominance entre deux solutions z et z' et pour K critères s'exprime :

$$\left\{ \begin{array}{l} z_k \leq z'_k \quad \forall k = 1, \dots, K \\ \text{l'une au moins de ces } K \text{ inégalités est stricte } (z \neq z') \end{array} \right.$$

La représentation de Pareto consiste donc à tracer graphiquement les différentes performances (un axe par critère) pour identifier les points non-dominés. L'ensemble des solutions efficaces (Pareto optimales) comprend les solutions intéressantes du point de vue multicritère i.e. les points non dominés dans l'espace des critères. Il est cependant souvent difficile à identifier et complexe à représenter dans le cas de nombreux critères. La Figure 8-1 représente un exemple de frontière Pareto dans le cas de deux critères A et B évalués sur 10 expériences.

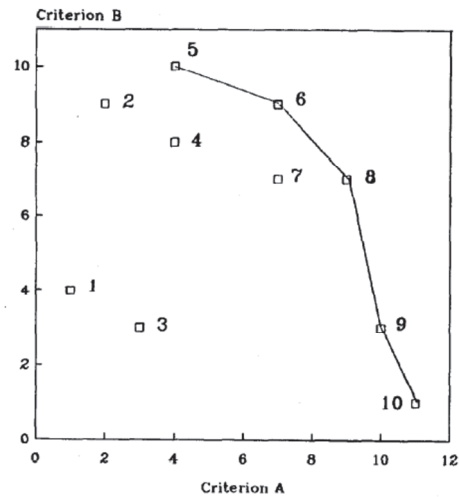


Figure 8-1 : Exemple de frontière Pareto pour deux critères à maximiser (Keller et Massart 1990)

Différents algorithmes pour l'optimisation multicritère ont été développés sur la base de la méthode Pareto comme par exemple : Strength Pareto Evolutionary Algorithm SPEA/SPEA2, Pareto Envelope-based Selection Algorithm PESA,....

La loi de Pareto est également utilisée afin d'identifier les causes principales à un phénomène. Cette loi empirique, appelée également loi des 80-20, est basée sur l'observation générale que dans de nombreux cas 80% des conséquences sont issues de 20% des causes. Cette loi ne peut être généralisée et elle est passablement critiquée. Elle revêt cependant un certain intérêt dans l'analyse d'un processus quelconque afin d'identifier les contributeurs principaux par le mode de représentation Pareto (Figure 8-2).

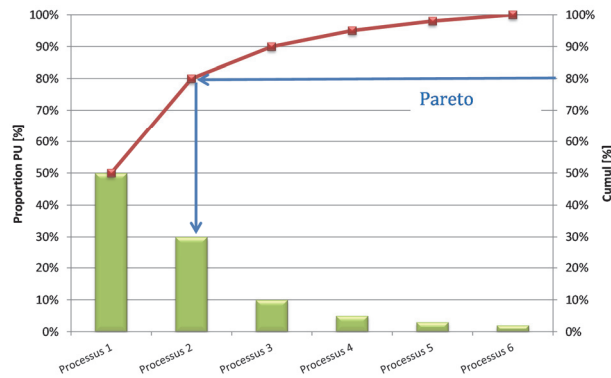


Figure 8-2 : Exemple de représentation de la loi de Pareto

8.3 Choix des méthodes

Après avoir décrit les familles de méthodes multicritères d'aide à la décision, nous proposons une sélection de méthodes pour le développement du modèle d'aide à la décision dans le choix de la technologie d'enrobage.

Le choix des méthodes n'est pas univoque. De manière générale, (Bouyssou, Dubois et al. 2006) rapporte qu' « il n'y a pas de méthode idéale, mais il existe peut-être des méthodes plus satisfaisantes (ou moins mauvaises) que d'autres ». (Mena 2004) indique quant à lui que le choix de la méthode va dépendre des moyens techniques à disposition, du type et de la quantité d'informations fournies ou recueillies, du type de résultats souhaité, des éventuelles connaissances du décideur en matière multicritère,...

A notre connaissance, il n'y a pas (ou peu) d'applications concernant l'utilisation de méthodes multicritères dans le choix de technologies d'enrobage. Il en existe par contre dans le domaine des chaussées routières. Lors d'un workshop consacré à l'analyse du cycle de vie de chaussées routières, (Harvey, Santero et al. 2010) recommande l'utilisation d'une méthode Pareto pour une optimisation multicritère des coûts et des émissions de gaz à effet de serre. Des approches par matrice ou par préférence (pondération) sont aussi mentionnées. Les méthodes multicritères sont également utilisées dans la procédure de choix entre différentes variantes de tracé routier. Dans sa thèse, (Tille 2000) affirme « ... il n'y a pas de méthode multicritère parfaite et idéale ... la méthode d'agrégation partielle est la plus adaptée au projet routier ». Dans son travail sur l'utilisation de matériaux alternatifs dans les chaussées, (Sayagh 2007) utilise une agrégation complète par pondération technique d'indicateurs partiels.

Pour le modèle multicritère développé, nous proposons une analyse en différents niveaux qui seront détaillés plus loin (chapitre 8.6). L'utilisation d'une telle procédure nous permet d'appliquer plusieurs méthodes avec les avantages suivants :

- Utilisation de méthodes complémentaires dans leurs hypothèses et applications.
- Complexité évolutive de l'analyse.
- Validation des résultats par confrontation des méthodes.
- Evaluation de la robustesse des méthodes et des solutions proposées.

L'utilisation de différentes méthodes peut cependant rendre la procédure de calcul plus longue et complexe. De plus, il est reconnu que les méthodes ne fournissent pas nécessairement les mêmes résultats malgré des hypothèses et tableaux de performances similaires.

Le choix des méthodes se porte tout d'abord sur une procédure par agrégation partielle. Parmi ces méthodes, Electre est la plus évoluée, reconnue et utilisée. On lui trouve de nombreuses applications dans le domaine de l'évaluation environnementale. Pour cette recherche, Electre III sera utilisée.

Electre ne permet pas de prendre en compte l'incertitude et la part d'inconnu sur les données. Afin de palier à ces lacunes, une méthode par agrégation complète est sélectionnée. Pour le traitement de l'incertitude des données, (Taroun et Yang 2010) propose l'utilisation de la théorie de l'Evidence qui semble la mieux adaptée comparativement à d'autres méthodes (théorie des probabilités, logique floue,...). La méthode développée récemment par le Prof. Jian-Bo Yang de l'Université de Manchester (Manchester Business School) et basée sur la théorie de l'Evidence a donc été choisie. Les applications de cette théories dans le domaine de l'ingénierie et de l'évaluation des risques telle que adaptée par le Prof. Yang sont multiples. A notre connaissance, des applications au domaine de la route ne sont pas publiées.

L'applicabilité de la théorie de l'Evidence à notre problématique a été discutée avec le Prof. Yang ainsi que le Dr. Larry Klein, spécialiste de la théorie de l'Evidence, auteur de (Klein et Lawrence 2004). Ces derniers ont confirmé sa pertinence pour notre cas.

Le Tableau 8-1 propose un bref comparatif entre les méthodes d'agrégation partielle et d'agrégation complète sélectionnées.

Tableau 8-1 : Comparatif entre les méthodes d'agrégation partielle et d'agrégation complète sélectionnées

Famille de méthode	Agrégation partielle	Agrégation complète
Méthode de base	ELECTRE III	Théorie de l'Evidence (ER)
Procédure de comparaison	Variantes 2 à 2	Variantes seules
Type de critères	Qualitatifs & quantitatifs	Qualitatifs & quantitatifs
Intransitivité	Oui	Non
Incomparabilité entre variantes	Oui	Non
Indifférence entre variantes (ex-aequo)	Oui	Oui
Compensation entre critères	Non (seuil veto)	Oui
Matrice de performance incomplète	Pas possible	Possible
Probabilité sur les performances	Pas possible	Possible
Complexité de la méthode (calcul)	Moyenne	Elevée
Transparence de la méthode	Moyenne	Moyenne
Interprétation des résultats	Variable (Graphique ou rangs)	Aisée (Rangs - utilité)

Dans la suite du chapitre, Electre et la théorie de l'Evidence seront détaillés d'un point de vue théorique avant d'en expliquer l'implémentation dans le modèle multicritère d'aide à la décision.

8.4 Agrégation partielle : Méthode multicritère Electre

Les bases de la méthode multicritère Electre sont détaillées dans l'ouvrage (Maystre, Pictet et al. 1994) qui reprend les développements de B. Roy. Pour davantage de détails, le lecteur pourra s'y référer ainsi qu'à (Tille 2000). Les origines de la méthode sont décrites dans (Roy 1968) et les détails sur les relations de surclassement sont donnés dans (Roy 1991).

La mise au point des méthodes Electre (Elimination et choix traduisant la réalité) est le fruit des travaux de B. Roy. Différentes versions existent, par ordre chronologique : Electre I, Electre II, Electre III, Electre IV, Electre IS et Electre TRI.

De manière générale, la méthode Electre consiste à appliquer une méthode d'agrégation des critères pour établir une relation de surclassement entre les différentes actions (ou variantes). Deux notions sont importantes :

- La relation de surclassement est une relation binaire qui porte sur des couples de deux actions.
- L'agrégation est la méthode permettant d'obtenir des informations sur une préférence globale entre deux actions, à partir des préférences pour chaque critère individuellement.

Les méthodes Electre se distinguent par la façon dont le problème est posé (problématique) et les résultats de la méthode. Le choix de la méthode va dépendre de la problématique étudiée (formulation du problème). Electre différencie les problématiques suivantes (Maystre, Pictet et al. 1994) :

- α : Cette problématique consiste à éclairer la décision en proposant un choix d'un sous-ensemble contenant les actions les meilleures (noyau), ou alors les plus satisfaisantes. Ce sous-ensemble sera le plus restreint possible (éventuellement une seule variante) et il contient des actions incomparables parmi lesquelles se trouve la meilleure variante. Dans cette problématique, la limite entre les bonnes et les mauvaises actions est définie de manière peu transparente.
- β : Cette problématique éclaire la décision par un tri résultant d'une affectation de chaque variante à des catégories prédéfinies. Chaque action est jugée sur sa valeur absolue, indépendamment des actions potentielles qui pourraient lui être opposées. Les variantes ne sont

pas comparées entre elles mais par rapport à des variantes de référence. Les variantes sont donc séparées entre les « bonnes » et les moins bonnes.

- γ : L'objectif de cette problématique est de ranger les actions les unes par rapport aux autres, par classes d'équivalence, en appliquant une procédure de classement. Les variantes sont alors classées de la moins bonne à la meilleure. Alors que dans la problématique β les classes sont définies a priori, les classes se définissent ici par les actions qu'elles contiennent.
- δ : L'objectif de cette problématique est d'effectuer une description des actions et de leurs conséquences dans un cadre commun. Cette problématique n'est pas traitée dans les différentes méthodes Electre.

La Figure 8-3 illustre les différentes problématiques de décision pour un ensemble de variantes $V=\{v_1, \dots, v_n\}$.

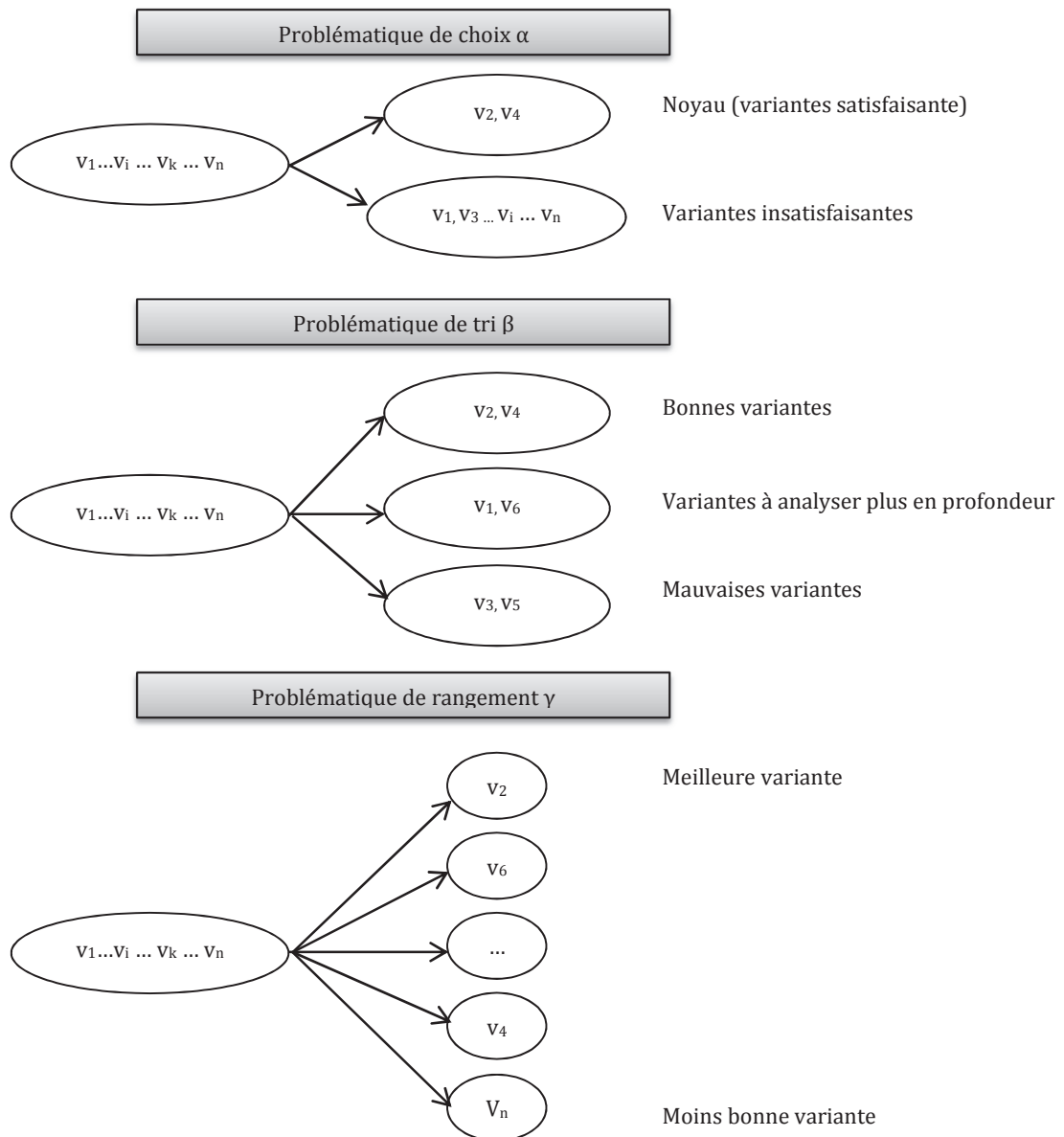


Figure 8-3 : Représentation des différentes problématiques de décision (repris de (Schärlig 1985))

Electre I relève de la problématique de choix α . Cette méthode est la plus ancienne des méthodes Electre (1968). Elle est facile à appliquer et ses principes généraux (concordance, discordance) sont repris dans les autres méthodes Electre de manière plus complète. Electre I applique des critères francs et n'utilise

pas la notion de seuil de veto que nous détaillerons par la suite. Les défauts de cette méthode sont sa rigidité (critères francs), ainsi que le fait qu'elle ne propose que rarement une seule meilleure variante. La méthode propose un noyau de variantes difficilement comparables et le résultat n'est pas net. La meilleure variante se trouve dans le noyau proposé, mais les autres variantes du noyau ne sont pas nécessairement les variantes placées en deuxième ou troisième position.

Electre II relève de la problématique de classement γ . Les résultats sont donc plus tranchés car en général une meilleure variante se dégage. Les critères selon cette méthode sont francs et il n'y a pas de seuil de veto. Par contre, la notion de surclassement est plus modérée avec l'introduction des notions de surclassement fort et de surclassement faible.

Electre III relève de la problématique de classement γ . Cette méthode suit les grands principes d'Electre II, mais avec quelques développements supplémentaires. Des critères flous sont utilisés pour l'élaboration de la relation de surclassement. La réflexion est donc située au niveau de la crédibilité à accorder à l'hypothèse de surclassement (degré de crédibilité). Electre III travaille avec des valeurs continues entre 0 et 1 et la notion de préférence faible est intégrée. Pour cela, le seuil d'indifférence, le seuil de préférence stricte et le seuil de veto sont introduits. On peut observer qu'avec Electre III, les relations entre variantes sont plus nuancées. Par contre, la complexité est croissante comparativement aux méthodes précédentes.

La méthode Electre IV relève également de la problématique de classement γ . Cette méthode est une simplification d'Electre III dans laquelle la pondération des critères est abandonnée. L'absence de pondération ne permet plus de calculer une concordance globale et une hypothèse de disparité limitée est introduite. Cette hypothèse a pour objectif d'éviter qu'un critère ne soit trop prépondérant ou négligeable par rapport aux autres. Electre IV utilise également les critères flous associés à des seuils de préférence stricte et d'indifférence.

Electre IS relève de la problématique de choix α . Cette méthode est une adaptation d'Electre I, avec la prise en compte de critères flous.

Electre TRI relève de la problématique de tri β . A chaque variante est attribuée une classe d'affectation prédéfinie. Par rapport aux autres méthodes, Electre TRI a la particularité de réduire sensiblement le nombre de variantes à comparer. Dans cette méthode, des variantes de référence sont utilisées pour segmenter l'espace des variantes en classes d'affectation. Electre TRI semble particulièrement adapté dans le cas d'un grand nombre de variantes, permettant ainsi de rapidement réduire le nombre de cas à étudier.

Le Tableau 8-2 présente un bref comparatif des différentes méthodes Electre. Les notions de critères flous, de discordance et de concordance seront détaillées dans la suite de ce chapitre.

Tableau 8-2 : Comparatif des différentes méthodes Electre

Méthode ELECTRE	I	IS	TRI	II	III	IV
Problématique	α	α	β	γ	γ	γ
Procédure	Sélection	Sélection	Affectation	Classement	Classement	Classement
Résultat	Choix	Choix	Tri	Rangement	Rangement	Rangement
Hyp. surclassement	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
Critères	Vrai	Pseudo	Pseudo	Vrai	Pseudo	Pseudo
Poids	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
Résultat final	1 noyau	1 noyau	1 affect. partielle	1 préordre partiel	1 préordre partiel	1 préordre partiel

Sur la base de ces considérations et après consultation de professionnels de l'aide à la décision, le choix est finalement porté sur la méthode Electre III pour cette recherche. Les raisons principales sont :

- Problématique de classement des différentes variantes.
- Prise en compte d'une procédure de pondération.
- Etablissement de surclassements entre les actions.
- Nombre de variantes limité.
- Utilisation de critères flous (appelés également pseudo-critères) pour les relations de surclassement. L'utilisation de critères flous semble plus adaptée à la problématique étudiée que les critères francs qui seront en général utilisés dans le cas de données « certaines », mesurées. Le critère flou permet de traduire le caractère incertain des données d'évaluation des critères et donc de la matrice de performance. Ceci rend par contre la procédure plus complexe et introduit parfois une certaine opacité pour les personnes externes.

Nous pouvons finalement relever qu'Electre est particulièrement adapté dans le cadre de processus consultatifs avec de multiples acteurs (individus ou groupes d'individus) et décideurs. La procédure de consultation des différents acteurs permet notamment d'ajuster la pondération allouée aux différents critères.

8.4.1 Terminologie et notions de base

Plusieurs termes sont récurrents dans le domaine de l'aide à la décision. Nous définissons ici les éléments nécessaires à la bonne compréhension d'Electre III et des méthodes multicritères.

Dans l'ensemble du chapitre relatif à Electre, nous considérons les définitions suivantes :

- $A=\{a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n\}$ ensemble des actions potentielles
- $C=\{c_1, c_2, \dots, c_j, \dots, c_m\}$ famille des critères
(note : Nous distinguons la famille des critères C avec les indices de concordance C_{ik} utilisés plus loin)
- $g_j(a_i)$ évaluation de l'action a_i par rapport au critère j
- P_j pondération (importance relative) du critère j

Variante et critère

La terminologie proposée suit les fondements de la méthode selon (Maystre, Pictet et al. 1994). Les actions a_i sont également appelées variantes, comme dans certaines méthodes d'agrégations complètes.

Un critère est défini comme une expression qualitative ou quantitative permettant de juger les conséquences (ou performances) d'une variante. L'ensemble des critères C comprend m critères (c_1 à c_m). Un critère est associé à une échelle ordinaire (bon, moyen, mauvais,...) ou cardinale (M_j , Francs,

kg CO₂) et il dispose d'un sens de préférence (minimisation ou maximisation). Pour la suite de l'étude, nous considérons que les critères sont tous à maximiser. Pour cela, les performances des critères à minimiser seront multipliées par (-1). Le choix des critères doit être cohérent. La cohérence est vérifiée par le respect des conditions suivantes (Schärlig 1985):

- Exhaustivité : Il ne faut pas qu'il y ait trop peu de critères (ne pas en oublier).
- Cohérence : Cohérence entre les préférences locales (par critère) et globales.
- Indépendance ou non-redondance : Les critères ne doivent pas être plus nombreux que nécessaire, ni se dupliquer.

La performance de la variante a_i pour le critère c_j donné est définie par $g_j(a_i)$.

Pondération

Le poids P_j qualifie l'importance relative d'un critère c_j par rapport aux autres critères.

Différentes méthodes existent pour la détermination de la pondération (Mousseau 1992; Figueira et Roy 2002; Shanian, Milani et al. 2008). Ces méthodes sont particulièrement adaptées dans le cas de processus impliquant de nombreux acteurs. (Maystre, Pictet et al. 1994) propose quatre méthodes :

- Pas de pondération : Partant du principe qu'aucun critère n'est prépondérant ou négligeable, on peut alors utiliser une méthode sans pondération (Electre IV par exemple).
- Pondération directe : Le décideur applique directement sa pondération en se basant sur sa perception intuitive. Nous appliquons par défaut cette méthode dans le modèle développé, avec la possibilité de choisir une autre méthode au besoin.
- Pondération indirecte : Ces méthodes ne demandent pas au décideur une information directe sur l'importance des critères, mais une information à partir de laquelle il est possible de déduire la pondération par l'utilisation de règles d'agrégation. La méthode de Simos (Simos 1989; Simos 1990) est largement utilisée (Shanian, Milani et al. 2008). Cette méthode est basée sur un classement de cartons contenant chacun exclusivement le nom d'un critère. Des cartons blancs sont également disponibles afin d'accentuer ou non la différence de rang entre deux critères. Il est ensuite demandé au décideur de classer les cartons du moins important au plus important, les ex-aequo étant autorisés. Cette opération fournit un préordre. Par le classement des cartons, une pondération est déduite selon une méthode de calcul précise. (Figueira et Roy 2002) propose une révision de la méthode initiale de Simos, révision basée sur une technique de normalisation des poids minimisant les erreurs d'arrondis. Pour cela, la méthode de collecte des informations est également adaptée.
- Méthode par comparaison d'actions fictives : Cette méthode consiste à classer les critères du moins important au plus important, puis à demander au décideur d'indiquer sa préférence entre deux actions fictives mais réalistes. A partir des réponses et par approximations successives, une pondération est finalement déduite.

Relation de surclassement

Le principe de base d'Electre est le suivant (Schärlig 1985) : Une variante a_i surclasse une variante a_k , si elle est au moins aussi bonne que a_k relativement à une majorité de critères, sans être trop nettement plus mauvaise que a_k relativement aux autres critères. On note alors $a_i Sa_k$. Les méthodes de la famille Electre effectuent donc une comparaison critère par critère entre les variantes. Selon le jeu de variantes, les résultats seront différents. Afin de vérifier la relation de surclassement, les méthodes d'agrégation partielle utilisent une notion de concordance et une notion de discordance.

Pour arriver à la relation de surclassement, les méthodes Electre (sauf Electre IV) se servent des notions suivantes :

- Hypothèse de surclassement : Il s'agit de l'hypothèse de base posée pour tout couple d'actions, à savoir « l'action a_i surclasse l'action a_k ».
- Notion de concordance : Si l'hypothèse de base « l'action a_i surclasse l'action a_k » est posée, on dit que le critère j concorde avec l'hypothèse si l'action a_i est au moins aussi bonne que l'action a_k pour le critère choisi. On a alors $g_j(a_i) \geq g_j(a_k)$.
- Notion de discordance : L'indice de discordance donne la mesure de l'opposition manifestée par le(s) critère(s) discordant(s) à l'acceptation de l'hypothèse de surclassement de l'action a_i par l'action a_k . Le seuil de discordance exprime le maximum de discordance tolérée pour que l'hypothèse « l'action a_i surclasse l'action a_k » ne soit pas rejetée. Donc, s'il existe une opposition trop forte, sur au moins un critère, alors l'hypothèse de surclassement peut être rejetée.

8.4.2 Bases théoriques Electre III

Nous décrivons ici les éléments de base nécessaires aux calculs selon la méthode Electre III. Pour plus de détails, on pourra consulter (Maystre, Pictet et al. 1994) ou (Roy 1991). Cette méthode est largement inspirée d'Electre I, les principes de concordance et de discordance élaborés dans Electre I sont repris mais avec un niveau de complexité accru.

La méthode Electre III relève de la problématique γ (procédure de classement). Son but est de classer les actions potentielles (variantes) depuis la meilleure jusqu'à la moins bonne. Le principe général de la méthode est le même que pour les autres méthodes Electre à savoir la construction de la relation de surclassement entre les actions pour ensuite élaborer un classement. Pour la construction des relations de surclassement, des indices de concordance et de discordance sont établis.

Il existe deux types de critères, chacun possédant des caractéristiques de seuils différentes : les critères francs et les critères flous (ou pseudo-critères). Dans le cas de critères francs, la comparaison de deux variantes par rapport à un critère c_j peut présenter trois situations relatives : « indifférence », « a_i préférée à a_k », « a_k préférée à a_i ». Il s'agit alors d'une préférence ou d'une indifférence stricte. La moindre différence entre les variantes est donc significative. Les méthodes Electre I et II appliquent des critères francs pour les notions de surclassement.

La méthode Electre III introduit la notion de flou pour remplacer celle des critères francs. Les critères flous ne proposent pas une transition stricte, mais une transition progressive entre l'indifférence et la préférence. Avec l'utilisation de critères flous, toutes les positions entre les extrêmes sont possibles. La réflexion est donc orientée différemment car elle ne porte plus sur l'acceptation ou le rejet en bloc de l'hypothèse de surclassement, mais sur la crédibilité à accorder à cette hypothèse. Pour chacun des critères, Electre III introduit deux seuils supplémentaires: le seuil d'indifférence et le seuil de préférence stricte. Avec l'utilisation de ces seuils, la notion de préférence faible fait son apparition. Ainsi, le nombre de situations possibles lors de la comparaison de deux variantes a_i et a_k n'est plus de 3 (critères francs) mais de 5. Ceci est traduit par le degré de crédibilité du surclassement qui varie entre 0 et 1.

Dans la concrétisation de la notion de discordance, un troisième seuil appelé seuil de veto est utilisé. Ce seuil de veto est une donnée volontariste qui marque la limite au-delà de laquelle le non-respect de l'hypothèse du surclassement est trop important. Il constitue une limite à la compensation des critères. Dans l'application de la méthode Electre III, l'utilisateur a le choix d'appliquer ou non des seuils de veto.

Les résultats obtenus sont finalement classés selon un algorithme spécifique. Comme nous le verrons, d'autres méthodes pour l'établissement du classement sont également possibles.

La méthodologie générale d'Electre III est représentée dans la Figure 8-4. Les différentes phases de calcul seront ensuite détaillées.

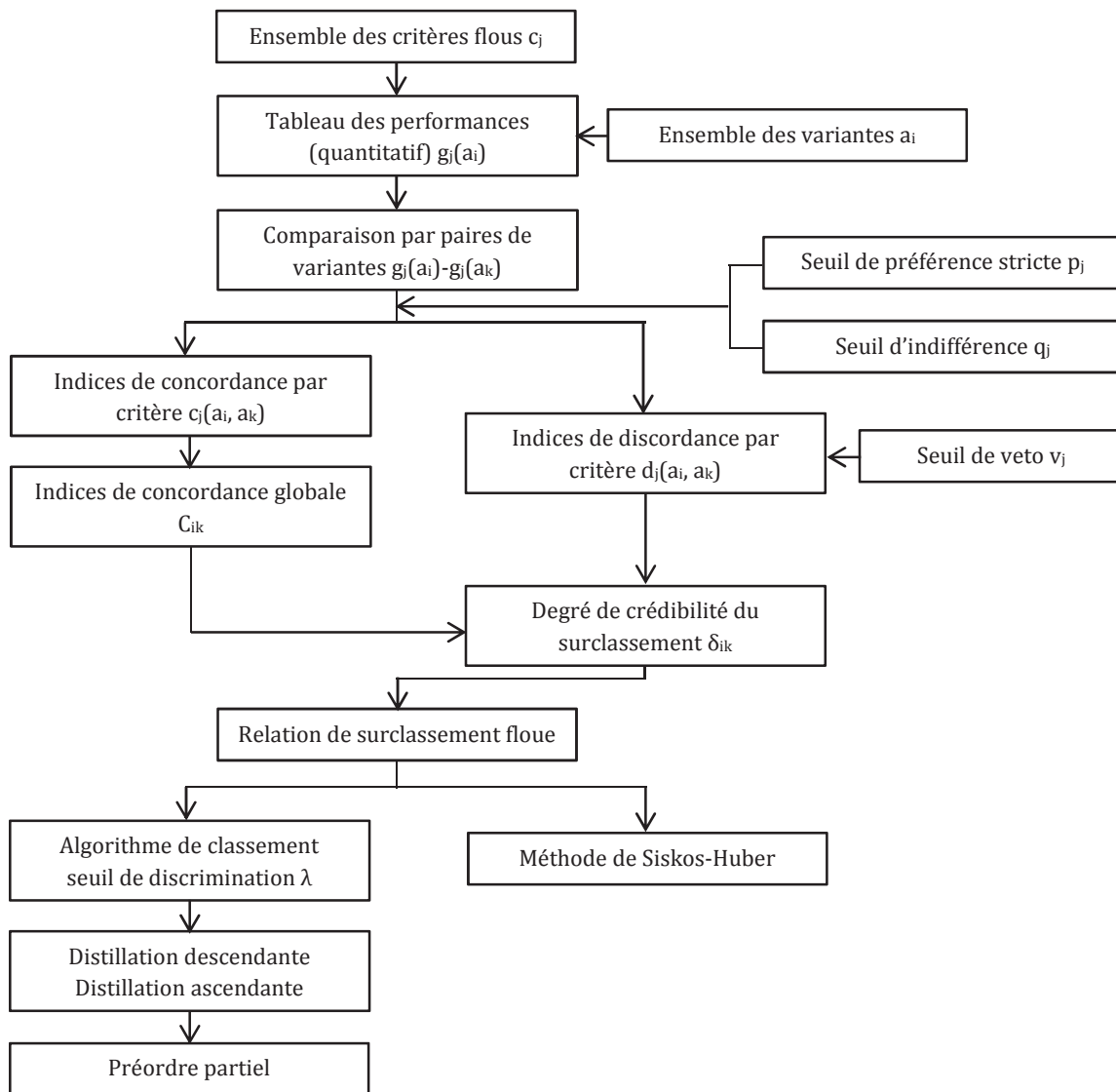


Figure 8-4 : Démarche d'application de la méthode Electre III

Comme on peut le voir dans la Figure 8-4, l'introduction du flou dans Electre III se fait directement dans la définition des critères. L'utilisation de pseudo-critère étend l'indifférence à une zone dans laquelle la différence entre les variantes a_i et a_k est petite. Il définit la zone de préférence faible entre la zone d'indifférence et la zone de préférence stricte. On peut définir :

- Seuil d'indifférence q_j : Ce seuil peut être interprété comme la marge d'incertitude minimale liée aux calculs effectués.
- Seuil de préférence stricte p_j : Ce seuil peut être interprété comme la marge maximale d'erreur liée aux calculs effectués.

Le choix des seuils d'indifférence q_j et de préférence stricte p_j permet concrètement de définir les relations d'indifférence I, de préférence faible Q et de préférence forte P. Le pouvoir discriminant d'un pseudo-critère est donc caractérisé par les deux seuils q_j et p_j de la façon suivante, quelles que soient les variantes a_i et $a_k \in A$:

$$a_i I a_k \quad \leftrightarrow \quad -q_j \leq g(a_i) - g(a_k) \leq q_j$$

$$a_i Q a_k \quad \leftrightarrow \quad q_j < g(a_i) - g(a_k) \leq p_j$$

$$a_i P a_k \quad \leftrightarrow \quad p_j < g(a_i) - g(a_k)$$

Il vient également les deux autres situations :

$$a_k Q a_i \quad \leftrightarrow \quad -q_j > g(a_i) - g(a_k) \geq -p_j$$

$$a_k P a_i \quad \leftrightarrow \quad -p_j > g(a_i) - g(a_k)$$

Nous avons évidemment $q_j \leq p_j$

Les cinq situations relatives lors de la comparaison de variantes (a_i, a_k) dans le cas de critères flous sont représentées dans la Figure 8-5.

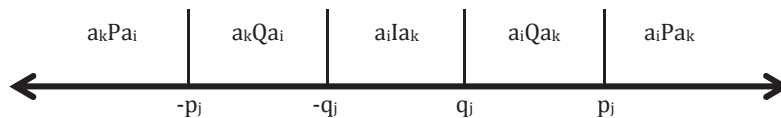


Figure 8-5 : Situation relative entre deux variantes a_i et a_k dans le cas de critères flous (tiré de (Schärli 1985))

La définition des seuils p et q peut être faite soit avec une constante ou alors avec une fonction relative à l'action a_i considérée. La fonction sera de la forme $p(g(a_i)) = \alpha_j \cdot g(a_i) + \beta_j$. Dans le cas d'une valeur constante, nous avons simplement $\alpha_j = 0$. Si une relation est utilisée pour la définition des seuils, il faudra alors déterminer s'il s'agit d'un seuil direct ($g(a_i) < g(a_k)$) ou inverse ($g(a_i) > g(a_k)$) selon que le seuil est fonction de l'action la moins ou la plus préférée du couple d'actions. Dans le cadre de notre étude, les seuils seront définis par des constantes propres à chaque critère c_j .

Phase 1 : Réaliser le tableau de performances

Dans un premier temps, le tableau de performances ou matrice des évaluations doit être établi. Ce tableau indique les scores des différentes actions pour les critères choisis. Chaque action est donc jugée pour chaque critère. Le tableau de performances contient également la pondération P_j allouée à chaque critère.

Les unités des différents critères peuvent être variées. Des critères quantitatifs et qualitatifs peuvent également être pris en compte. Pour l'établissement du tableau de performances, les critères qualitatifs devront cependant être convertis en valeurs numériques selon une méthode choisie.

Il est important de différencier le sens de préférence des critères i.e. quels sont les critères à maximiser et quels sont les critères à minimiser. Afin de travailler dans un système où l'ensemble des critères sont à maximiser, les performances des critères à minimiser sont multipliées par (-1) . Ceci permet de simplifier la procédure d'analyse tout en conservant les unités et l'évaluation initiale (au signe près).

Phase 2 : Indices de concordance

Electre III utilise deux indices pour la concordance :

- L'indice de concordance par critère $c_j(a_i, a_k)$
- L'indice de concordance globale C_{ik}

L'indice de concordance par critère $c_j(a_i, a_k)$ doit être déterminé dans un premier temps. Cet indice affirme dans quelle mesure l'action a_i est au moins aussi bonne que l'action a_k pour le critère j . L'indice de concordance par critère est défini de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
c_j(a_i, a_k) = 0 & \quad \leftrightarrow \quad p_j < g_j(a_k) - g_j(a_i) \\
0 < c_j(a_i, a_k) < 1 & \quad \leftrightarrow \quad q_j < g_j(a_k) - g_j(a_i) \leq p_j \\
c_j(a_i, a_k) = 1 & \quad \leftrightarrow \quad g_j(a_k) - g_j(a_i) \leq q_j
\end{aligned}$$

Lorsque $0 < c_j(a_i, a_k) < 1$, nous pouvons alors calculer l'indice de concordance par critère par interpolation linéaire. Il vient :

$$c_j(a_i, a_k) = \frac{g_j(a_i) + p_j - g_j(a_k)}{p_j - q_j}$$

Ainsi, pour chaque couple d'actions (a_i, a_k) , un indice de concordance par critère sera établi. Une matrice de concordance par critère sera calculée, pour chacun des critères.

Sur la base des indices de concordance par critère $c_j(a_i, a_k)$, un indice de concordance globale C_{ik} est ensuite calculé. L'indice de concordance globale C_{ik} exprime si l'hypothèse de départ « a_i surclasse a_k » concorde avec la réalité représentée par les évaluations des actions. Cet indice varie entre 0 et 1. L'indice de concordance globale est défini ainsi :

$$C_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^m P_j \cdot c_j(a_i, a_k)}{\sum_{j=1}^m P_j}$$

Un indice de concordance globale est donc calculé pour chaque couple (a_i, a_k) , indice regroupant l'évaluation selon les différents critères. Finalement, le regroupement des indices de concordance globale pour chaque couple de variantes permet d'établir la matrice de concordance globale.

Phase 3 : Indice de discordance

Dans les différentes méthodes Electre, la relation de concordance doit être affaiblie par une notion de discordance. L'indice de discordance indique si le non-respect de l'hypothèse de surclassement n'est pas trop important. Dans Electre III, la discordance est exprimée par le seuil de veto. Le seuil de veto v_j , pour le critère j , est « la valeur de la différence $g_j(a_k) - g_j(a_i)$ à partir de laquelle il apparaît prudent de refuser toute crédibilité au surclassement de l'action a_k par l'action a_i , même si tous les autres critères sont en concordance avec ce surclassement » (Maystre, Pictet et al. 1994). Le seuil de veto est une donnée volontariste et l'utilisateur a le choix d'en appliquer un. Ce seuil marque une limite au-delà de laquelle l'opposition du critère j est suffisamment forte pour refuser le rejet de l'hypothèse de surclassement et son utilisation permet d'éviter les risques de compensation. Nous avons donc par définition :

$$q_j \leq p_j < v_j$$

L'indice de discordance $d_j(a_i, a_k)$ permet d'évaluer l'intensité de la discordance par rapport à l'hypothèse de surclassement. Il est défini ainsi :

$$\begin{aligned}
d_j(a_i, a_k) = 1 & \quad \leftrightarrow \quad v_j < g_j(a_k) - g_j(a_i) \\
0 < d_j(a_i, a_k) < 1 & \quad \leftrightarrow \quad p_j < g_j(a_k) - g_j(a_i) \leq v_j \\
d_j(a_i, a_k) = 0 & \quad \leftrightarrow \quad g_j(a_k) - g_j(a_i) \leq p_j
\end{aligned}$$

De même que pour l'indice de concordance par critère, la valeur de l'indice de discordance lorsque $0 < d_j(a_i, a_k) < 1$ peut être calculée par interpolation linéaire :

$$d_j(a_i, a_k) = \frac{g_j(a_k) - p_j - g_j(a_i)}{v_j - p_j}$$

Ainsi, pour chaque couple d'actions (a_i, a_k) , un indice de discordance par critère sera établi. Une matrice de discordance par critère sera calculée, pour chacun des critères.

Phase 4 : Relation de surclassement floue

Une fois les indices de concordance globale et indices de discordance déterminés, les relations de surclassement sont évaluées. Dans Electre III, les relations de surclassement sont établies entre deux actions potentielles. Le surclassement est dit « flou » car il y a des couples où elle est indiscutable, et d'autres où le surclassement est peu convaincant. La plausibilité du surclassement est exprimée par le degré de crédibilité du surclassement δ_{ik} .

$$\delta_{ik} = C_{ik} \cdot \prod_{j \in \bar{F}} \frac{1 - d_j(a_i, a_k)}{1 - C_{ik}}$$

Dans cette relation, \bar{F} représente le sous-ensemble de C (famille de critères) qui contient comme éléments les critères pour lesquels l'indice de discordance est supérieur à l'indice de concordance globale :

$$\bar{F} = \{j | j \in C, d_j(a_i, a_k) > C_{ik}\} \text{ et } C \supset \bar{F}$$

Le degré de crédibilité δ_{ik} représente l'indice de concordance C_{ik} affaibli par les indices de discordance $d_j(a_i, a_k)$ qui sont supérieurs à C_{ik} . En effet, l'indice de concordance est un bon reflet de la crédibilité du surclassement et, aussi longtemps que les indices de discordance sont faibles par rapport à l'indice de concordance, ce dernier continue de représenter correctement cette discordance (Maystre, Pictet et al. 1994).

On peut relever les deux cas particuliers suivants :

- Si, pour au moins un critère j , nous avons $d_j(a_i, a_k)=1$ (i.e. seuil de veto dépassé), alors le degré de crédibilité du surclassement est nul ($\delta_{ik}=0$), ceci quelle que soit l'importance relative du critère.
- Lorsque $C_{ik}=1$, alors tous les indices de discordance sont nuls et le degré de crédibilité est aussi égal à 1 ($\delta_{ik}=1$).

Phase 5 : Exploitation de la relation de surclassement floue

La relation de surclassement floue est traduite par le degré de crédibilité du surclassement δ_{ik} . Différentes méthodes existent afin d'exploiter cette relation de surclassement floue et proposer un classement des variantes. Nous présentons l'algorithme Electre III ainsi que la méthode de Siskos & Huber qui seront appliqués dans le modèle.

L'algorithme mis en place dans Electre III a pour but de proposer un classement des actions. Cet algorithme fait appel à la notion de seuil de discrimination $s(\lambda)$ qui permet de sélectionner les relations. Le degré de crédibilité δ_{ik} traduit la crédibilité d'un surclassement. Compte tenu de la part d'arbitraire dans le calcul de δ_{ik} , la signification des degrés de crédibilité ne peut pas être absolue. Afin de distinguer si un surclassement est plus crédible qu'un autre, le seuil de discrimination est introduit. Le seuil de discrimination $s(\lambda)$ est une fonction, définie pour toute valeur de λ entre 0 et 1. La fonction vérifie que : Si $\delta_{ik}=\lambda$ et $\delta_{em}=\lambda - \eta$, avec $\eta > s(\lambda)$, alors le surclassement de a_k par a_i est strictement plus crédible que le surclassement de a_m par a_e . Le seuil de discrimination $s(\lambda)$ peut être une constante, mais on lui préférera souvent une fonction décroissante.

Le principe de l'algorithme consiste à construire deux préordres différents (distillation descendante et distillation ascendante) dans lesquels les actions seront classées. L'algorithme de classement requiert la définition des notions suivantes :

- Puissance d'une action a_i , notée $p(a_i)$: Représente le nombre d'actions auxquelles a_i est strictement préférée.
- Faiblesse d'une action a_i , notée $f(a_i)$: Représente le nombre d'actions strictement préférées à a_i .
- Qualification d'une action a_i , notée $q(a_i)$: Est définie par $q(a_i) = p(a_i) - f(a_i)$. La qualification d'une action traduit la position de a_i dans le préordre.

L'algorithme de classement est basé sur la généralisation de la notion de qualification. Pour déterminer le nombre d'actions strictement préférées à a_i on fait alors intervenir le seuil λ tel que seuls les surclassements dont la crédibilité est supérieure à ce seuil interviennent dans le dénombrement. Le processus est itératif avec un sous-ensemble d'actions toujours plus réduit, ayant une qualification maximale pour des paliers de plus en plus bas. On parle alors de distillation descendante car on abaisse par paliers successifs le seuil λ depuis λ_0 jusqu'à la valeur 0. Lorsque la progression se fait dans l'autre sens, on parle alors de distillation ascendante.

L'algorithme détaillé pour la réalisation de la distillation descendante est présenté dans la Figure 8-6.

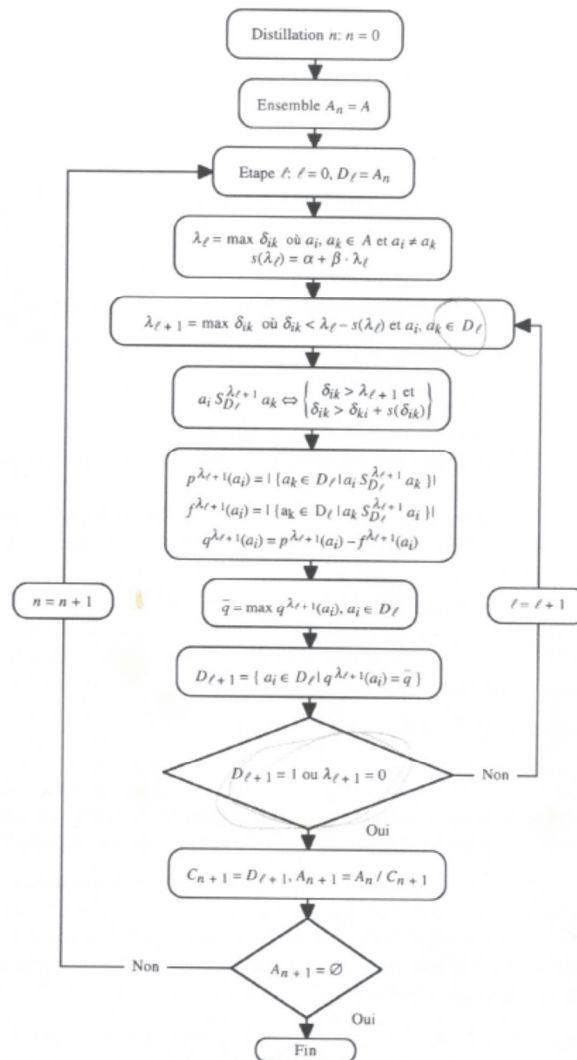


Figure 8-6 : Algorithme de classement par distillation descendante (Maystre, Pictet et al. 1994)

L'algorithme pour la réalisation de la distillation peut être long à exécuter selon le nombre de critères et de variantes étudiés. Pour la réalisation de l'algorithme, le logiciel Electre III/IV, version 3.1b développé par le LAMSADE (Laboratoire d'Analyse et de Modélisation de Systèmes pour l'Aide à la Décision) est

utilisé. Un exemple de résultats de distillations est présenté dans la Figure 8-7. Différentes présentations des résultats des distillations peuvent être utilisées. La méthode graphique de Simos et Maystre est fréquemment appliquée (Tille 2000). Dans cette représentation graphique, l'abscisse est constituée par les rangs en sens inverse de la distillation descendante et l'ordonnée est constituée par les rangs en sens inverse de la distillation ascendante.

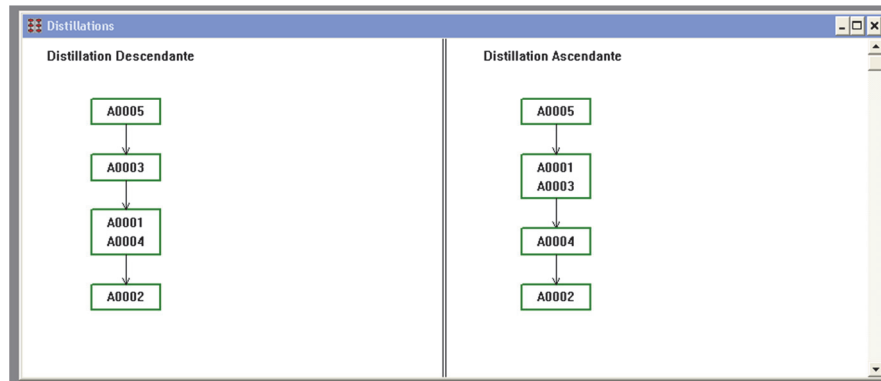


Figure 8-7 : Exemple de résultats de distillation avec Electre (version 3.1b)

Le préordre partiel final est ensuite construit par l'intersection (sens mathématique) des résultats des distillations descendante et ascendante. On parle de préordre partiel car les deux distillations ne fournissent pas nécessairement le même classement et l'incomparabilité entre deux variantes est possible dans le préordre partiel final. La construction du préordre partiel final se fait ainsi :

- Si a_i est préférée à a_k dans les deux préordres complets (distillations), alors il en sera de même dans le préordre partiel.
- Si a_i est préférée à a_k dans un préordre complet, mais équivalentes dans le second préordre, alors a_i sera préférée à a_k dans le classement final.
- Si a_i est préférée à a_k dans le premier préordre, et a_k préférée à a_i dans le second préordre, alors les deux actions sont incomparables dans le préordre final.

D'autres méthodes pour la réalisation des classements peuvent être utilisées. Siskos & Huber proposent un mode de classement également basé sur les degrés de crédibilité. Cette méthode demande, pour chaque action, le calcul du degré de non-dominance de l'action par les autres actions. Le degré de non-dominance $\mu^{ND}(a_i)$ est défini ainsi :

$$\mu^{ND}(a_i) = 1 - \max (\delta_{ki} - \delta_{ik}) \quad a_k \in A$$

Ensuite, plus le degré de non-dominance est élevé, et plus l'action a_i sera préférée par rapport aux autres actions.

Cette méthode de Siskos-Huber est directement implémentée dans le modèle multicritère (Partie 2). Les deux méthodes de classement peuvent, selon les cas, présenter une légère différence. Ceci sera étudié dans un exemple de calcul (chapitre 9).

Analyse de robustesse

Une fois le classement établi, il est courant de procéder à une analyse de robustesse de la solution. Cette analyse peut cependant s'avérer bien plus longue que les autres étapes de l'évaluation.

Si l'on considère la matrice de performance comme fixe (les évaluations ne sont pas variables), les paramètres suivants peuvent faire l'objet d'une analyse de robustesse :

- Poids des critères P_j

- Seuils d'indifférence q_j
- Seuils de préférence stricte p_j
- Seuils de veto v_j

Les analyses de sensibilité permettent d'examiner la stabilité des résultats (classements) par rapport à une variation des différents paramètres. Dans l'analyse de sensibilité, les calculs sont répétés en faisant varier les différents paramètres. On peut ainsi identifier les paramètres ayant le plus d'influence sur le classement et ceux ne présentant aucune influence.

Les résultats de l'analyse de sensibilité servent de base pour l'analyse de robustesse. Dans l'analyse de robustesse, le domaine de variation des différents paramètres pour lequel la solution proposée est stable est déterminé. Ces résultats permettent d'informer le décideur de la stabilité de la solution proposée.

8.5 Agrégation complète : Théorie de l'Evidence

Le 4^{ème} niveau d'analyse de notre modèle multicritère d'aide à la décision fait appel à l'agrégation complète. Pour mettre en œuvre cette dernière, nous avons opté pour l'approche de la théorie de l'Evidence (Evidential Reasoning : ER) utilisée dans un contexte d'aide à la décision multicritère (multiple-attribute decision making MADM). Cette méthode, que nous appellerons par la suite et par extension « théorie de l'Evidence » est en réalité un développement de la théorie de l'Evidence initialement formulée par Dempster-Shafer, développement qui permet de prendre en considération l'incertitude sur les données (i.e. performances) ainsi que l'inconnue éventuelle de données dans un problème d'aide à la décision. La méthodologie appliquée a été développée par le Professeur Jian-Bo Yang, directeur du DCS (Decision and Cognitive Sciences Research Center) de l'Université de Manchester.

Nous proposons dans un premier temps une description de la théorie de l'Evidence et de ses fondements, avant de décrire l'algorithme appliqué dans notre recherche. Pour plus de détails, le lecteur peut se référer à la littérature spécialisée.

La procédure d'aide à la décision mise en place par le Prof. Yang est donc une combinaison de la théorie de l'Evidence et d'une méthode d'aide à la décision multicritère. La méthode développée est dite hybride, car elle prend en considération à la fois des critères qualitatifs et quantitatifs. L'évaluation d'un critère qualitatif est par définition relativement abstraite. Une option est de faire correspondre à chaque évaluation une note sous forme numérique. Ceci peut parfois être difficile à appliquer. Attribuer une note est déterministe et suppose la certitude de l'affectation de la note. Le décideur n'est pas toujours convaincu à 100% de la note affectée. En réalité, plusieurs notes pourraient être affectées, avec des degrés de probabilités égaux ou inférieurs à 100%. Le jugement incertain de l'évaluation d'indicateurs qualitatifs est utilisé dans cette méthode au travers du concept de degré de préférence.

8.5.1 Généralités sur la théorie de l'Evidence (théorie de Dempster-Shafer)

La théorie des probabilités est la plus ancienne méthode pour le traitement de l'information décisionnelle. Elle souffre cependant de certains désavantages lorsque la connaissance est incomplète, incertaine ou imprécise. Différentes méthodes sont alors apparues pour le traitement de processus de décisions incertains, dont la théorie des possibilités et la théorie de l'Evidence qui est la plus répandue (Janez et Appriou 1996; Klein et Lawrence 2004; Bouyssou, Dubois et al. 2006).

La Théorie de l'Evidence est introduite par Dempster (1967), puis reformulée par Shafer (1976). Cette théorie est également connue sous le nom de « théorie des croyances », « théorie des plausibilités » ou bien encore « théorie de Dempster-Shafer (DS) ». Nous exposons ici les principes de base.

Cette théorie, est une généralisation de l'inférence bayésienne (démarche logique permettant de calculer ou réviser la probabilité d'une hypothèse ; la probabilité est interprétée comme la traduction numérique d'un état de connaissance) au traitement de l'incertain. Elle permet de manipuler des éléments non nécessairement exclusifs, ce qui lui confère l'avantage de pouvoir représenter explicitement l'incertitude sur un événement. La théorie utilisée :

- Prend en compte ce qui reste inconnu.
- Représente parfaitement ce qui est déjà connu.

Pour l'application de la théorie de Dempster-Shafer, une fonction de masse (ou masse d'évidence/de probabilité), une fonction de crédibilité et une fonction de plausibilité sont utilisées. Le principe consiste à travailler sur un référentiel de base, composé de l'ensemble des hypothèses, sur lequel différents traitements seront effectués.

La nature du problème traité est l'identification de la solution parmi un ensemble d'hypothèses H_i dont l'une des hypothèses est susceptible d'être la solution. Il s'agit donc d'évaluer la véracité de différentes propositions. Ces propositions peuvent être une hypothèse simple ou alors la composition d'hypothèses. L'incertitude sur les différentes propositions (hypothèses) est représentée par l'utilisation de degrés de croyance (belief degree).

La fonction de masse (probability mass) est définie sur un ensemble appelé cadre de discernement (ou cadre d'intérêt) D . Le cadre de discernement contient les N hypothèses H_i qui décrivent la situation. Il constitue le référentiel de base. D est exhaustif et exclusif, ce qui signifie que la solution est nécessairement un de ses éléments et que la solution est unique. Cet aspect peut être considéré comme un désavantage de la méthode :

$$D = \{H_1, H_2, \dots, H_N\}$$

Notons que par des extensions de la méthode originale, il est également possible que le cadre de discernement ne soit pas exhaustif. Dans ce cas, la connaissance du référentiel de base est incomplète et nous sommes dans une situation appelée « open-world », par opposition avec l'hypothèse « close-world » préconisée par Shafer. Ceci est une extension de la théorie de base et elle est discutée par (Janez et Appriou 1996) qui traite des cadres de discernement non exhaustifs (voir aussi (Bouyssou, Dubois et al. 2006)).

A partir du cadre de discernement D , on en déduit l'ensemble E (également appelé 2^D), des parties A de D telles que :

$$E = 2^D = \{A \mid A \subseteq D\} = \{\emptyset, \{H_1\}, \{H_2\}, \dots, \{H_N\}, \dots, \{H_1 \cup H_2\}, \dots, D\}$$

E contient l'ensemble des $2^N - 1$ sous-ensembles A de D (si l'ensemble vide est exclu). Il sert de référentiel de définition pour l'ensemble des grandeurs utilisées par la théorie de l'Evidence afin d'évaluer la véracité d'une proposition.

Pour exprimer le degré de confiance d'un élément A de l'ensemble E , on lui associe alors une masse d'évidence élémentaire $m(A)$ appelée également masse de probabilité élémentaire. Cette masse présente une grande analogie avec la notion de distribution de probabilité, à la différence que l'on répartit une masse unité parmi les éléments de 2^D ; donc pas uniquement parmi les singletons de D . La masse élémentaire indique la confiance que l'on peut avoir dans cette proposition, sans pour autant privilégier une hypothèse qui la compose. La fonction m_D est définie sur E $[0,1]$ et elle vérifie les propriétés :

$$\sum_{A \subseteq D} m_D(A) = 1 \quad m_D(\emptyset) = 0$$

La masse $m_D(A)$ représente la part de croyance placée exactement sur la proposition A (elle n'a pas pu être affectée à un sous-ensemble plus spécifique). La modélisation issue de la fonction de masse élémentaire est appelée jeu de masse. Les éléments de E dont la masse est non nulle sont appelés éléments focaux. Ils sont regroupés dans un ensemble appelé noyau. Lorsque les éléments focaux se réduisent aux seuls singletons H_i , la notion de masse élémentaire est alors assimilable à celle de probabilité. L'apport de la théorie de l'Evidence est de permettre l'évaluation conjointe d'ensembles quelconques de ces singletons H_i . On peut par exemple évaluer des hypothèses composites du type $\{H_1 \cup H_2\}$. L'ignorance (méconnaissance) totale consiste alors à affecter toute la masse à D.

En partant des masses d'évidence, on peut alors obtenir la définition de la crédibilité (belief function) $Cr(A)$ et de la plausibilité $Pl(A)$:

$$Cr_D(A) = \sum_{B \subseteq A} m_D(B)$$

$$Pl_D(A) = \sum_{A \cap B \neq \emptyset} m_D(B)$$

La crédibilité permet de prendre en compte la croyance placée sur une proposition A. Elle correspond à la quantité d'information contenue entièrement dans le sous-ensemble considéré (véracité de ce sous-ensemble). Pour prendre en compte toute la croyance placée sur la proposition A, il convient alors de rassembler la croyance placée exactement sur la proposition A ainsi que les masses de toutes les propositions B qui impliquent A (elles contribuent également à la croyance de A). La croyance acquise sur une proposition contribue à la croyance des propositions qu'elle implique (par exemple propositions « x est un avion » et « x est un avion et une fusée »). La fonction de crédibilité est définie sur $[0, 1]$ et elle permet de prendre en compte toute la croyance sur A.

La plausibilité d'un ensemble A est également définie sur $[0,1]$ et elle correspond à la quantité d'informations ne contredisant pas A, c'est-à-dire l'information contenue dans les sous-ensembles ayant une intersection avec A (intensité avec laquelle on trouve A plausible). Il s'agit donc de la masse totale que l'on pourrait potentiellement transférer sur la proposition A. Nous avons donc :

$$Pl_D(A) = 1 - Cr_D(\bar{A})$$

Intuitivement, la crédibilité et la plausibilité d'un événement A sont interprétées respectivement comme une mesure de sa vraisemblance minimale et maximale : $Cr_D(A) \leq P_D(A) \leq Pl_D(A)$

La longueur de l'intervalle de croyance $[Cr_D(A), Pl_D(A)]$ mesure l'imprécision sur l'incertitude (ou ignorance relative) pour une proposition A. Si l'imprécision est nulle, nous avons alors : $m(A) = Cr(A) = Pl(A) = P(A)$

En présence d'informations imparfaites (incertaines, imprécises, incomplètes), la fusion multi-source présente une solution intéressante pour accéder globalement à une solution plus fiable. L'algorithme de fusion de données de Dempster est alors appliqué. L'intérêt de la théorie de l'Evidence en fusion des données repose sur la possibilité de construire une fonction de masse élémentaire unique, par sommation (somme orthogonale) de fonctions de masses élémentaires $m_D^{S_j}$ issues de M sources d'information distinctes S_j ($j=1 \dots M$) et définies sur le référentiel commun E.

$$m_D(A) = m_D^{S_1}(A) \oplus m_D^{S_2}(A) \oplus \dots \oplus m_D^{S_M}(A)$$

L'outil d'agrégation utilisé est la loi de combinaison de Dempster. Cette loi renforce la croyance sur les événements pour lesquels les sources sont concordantes et atténue la croyance en cas de conflit. Elle

effectue une redistribution des masses potentielles et le jeu de masse résultant est exprimé ainsi (un indice représente le référentiel et un exposant la source de donnée) :

$$m_D(A) = K_D \cdot \sum_{A^1 \cap A^2 \cap \dots \cap A^M = A} \left\{ \prod_{j=1}^M m_D^{S_j}(A^j) \right\}$$

Avec A^j : Sous-ensemble quelconque du cadre de discernement commun D

S_j : Source

K_D : Facteur de normalisation

Le facteur de normalisation K_D est l'inconsistance de la fusion, significative du degré de conflit entre les différentes sources combinées (évaluation de la cohérence entre les sources). Il est défini par :

$$K_D = \frac{1}{1 - k_D}$$

$$k_D = \sum_{A^1 \cap A^2 \cap \dots \cap A^M = \emptyset} \left\{ \prod_{j=1}^M m_D^{S_j}(A^j) \right\}$$

La loi de combinaison de Dempster est commutative ($m_1 \oplus m_2 = m_2 \oplus m_1$) et associative ($(m_1 \oplus m_2) \oplus m_3 = m_1 \oplus (m_2 \oplus m_3)$). La proposition obtenant la plus grande masse est sélectionnée comme le résultat du processus de fusion i.e. la meilleure variante. La règle de fusion de Dempster suppose des sources d'informations indépendantes.

La théorie de l'Evidence est donc une méthode probabiliste de fusion de données. Elle est particulièrement utile lorsque les sources d'information ne peuvent associer une probabilité de 100% aux données fournies. La connaissance issue de différentes sources d'information est combinée afin de déterminer la conjonction des propositions et leur probabilité associée. Une vue globale de la méthode est présenté dans la Figure 8-8 (Klein et Lawrence 2004).

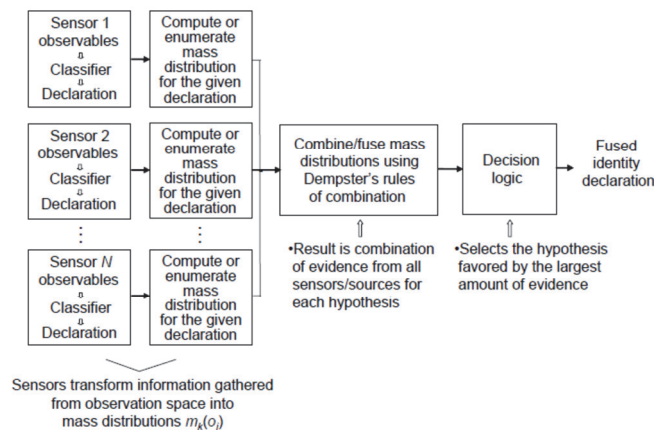


Figure 8-8 : Processus de fusion des données selon Dempster-Shafer

La théorie de l'Evidence se distingue de la théorie de l'inférence bayésienne sur différents points dont nous pouvons citer les suivants (Klein et Lawrence 2004) :

- Acceptation d'un modèle probabiliste incomplet dans le cas de la théorie de l'Evidence. La théorie peut donc être appliquée lorsque les données sont manquantes ou incomplètes.
- Une autre différence se situe au niveau de l'assignation des probabilités qui ne peut être faite qu'à l'hypothèse originale selon la théorie bayésienne.

- La difficulté dans l'application de l'inférence bayésienne se situe au niveau de la représentation de ce que l'on ne connaît pas et des hypothèses associées. Dans le cas où l'intervalle d'incertitude est nul pour toutes les propositions et les masses d'évidence associées à l'union de propositions sont également nulles, alors l'approche selon la théorie de l'Evidence et l'approche selon l'inférence bayésienne sont équivalentes.

8.5.2 Bases théoriques de l'algorithme ER modifié

Description générale de la méthode

L'algorithme utilisé dans la procédure d'agrégation complète du modèle multicritère d'aide à la décision (partie 2 du modèle) est développé sur les bases de la théorie de l'Evidence (théorie de Dempster-Shafer). Nous présentons ici les éléments nécessaires à la réalisation des calculs pour une aide à la décision multicritère. Ils sont issus de (Yang et Singh 1994; Yang 2001; Yang et Xu 2002; Wang, Yang et al. 2006) que l'on pourra consulter pour davantage d'informations ou pour des exemples d'application.

La théorie de Dempster-Shafer est choisie dans cette approche car (Yang et Singh 1994) :

- Elle applique des règles de combinaisons efficaces.
- Lors de l'attribution de probabilités à un événement (la confiance que l'on a en l'événement), la théorie de DS n'attribue pas le reste de la probabilité au complément de l'hypothèse, mais à l'ensemble de l'espace. Cette théorie est donc adaptée pour le traitement d'incertitudes incomplètes, i.e. lorsque la probabilité pour une performance n'est pas de 100%. Dans cette méthode, la probabilité non assignée à une hypothèse est considérée comme une incertitude.

La Figure 8-9 offre une vue générale de la procédure suivie pour la réalisation d'une évaluation multicritère selon la méthode d'agrégation complète. La première phase aboutissant au tableau des performances brutes est similaire à la méthode par agrégation partielle. Les autres éléments sont décrits de manière théorique dans la suite de ce chapitre. Les notions théoriques sont divisées en trois parties :

- Etablissement de la matrice générale de décision sur la base des matrices de transformation.
- Application de l'algorithme (théorie de l'Evidence) et évaluation des variantes (calcul des degrés de croyance combinés).
- Calcul de l'utilité et classement des variantes.

Le calcul d'agrégation selon la théorie de l'Evidence (ER algorithme) est le cœur de la méthode. Il s'agit également de la partie la plus complexe et un exemple de calcul détaillé est proposé afin de faciliter sa compréhension.

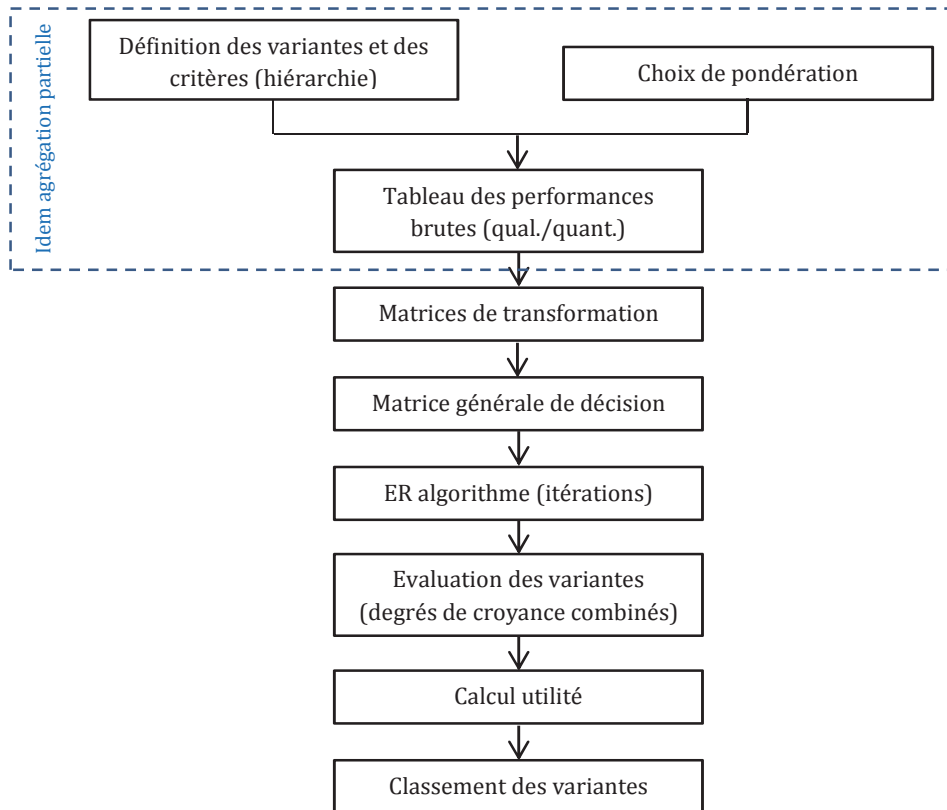


Figure 8-9 : Vue générale de la procédure d'évaluation multicritère par agrégation complète

Création de la matrice de décision

Avant de pouvoir effectuer la procédure d'agrégation, il est nécessaire d'établir la matrice générale de décision (decision matrix). Cette matrice contient l'évaluation des différentes variantes, pour chacun des critères, sous la forme de probabilité (degré de croyance) attribuée aux différents degrés d'évaluation H_N . Un exemple de matrice de décision est indiqué dans la Figure 8-10. Cette matrice contient les variantes (types de motos) ainsi que, pour chaque critère, l'évaluation accordée aux variantes. Les degrés d'évaluation H_n suivants sont considérés dans cet exemple: P=Poor, I=Indifferent, A=Average, G=Good, E=Excellent. Les degrés de croyance sont indiqués à côté de chaque degré d'évaluation associé à une variante.

General attribute		Basic attribute	Type of motorcycle				
			Kawasaki	Yamaha	Honda	BMW	
overall performance	engine ω_1	responsiveness ω_{11}	E(0.8)	G(0.3), E(0.6)	G(1.0)	I(1.0)	
		fuel economy ω_{12}	A(1.0)	I(1.0)	I(0.5), A(0.5)	E(1.0)	
		quietness ω_{13}	I(0.5), A(0.5)	A(1.0)	G(0.5), E(0.3)	E(1.0)	
		vibration ω_{14}	G(1.0)	I(1.0)	G(0.5), E(0.5)	P(1.0)	
		starting ω_{15}	G(1.0)	A(0.6), G(0.3)	G(1.0)	A(1.0)	
	operation ω_2	handling ω_{21}	steering ω_{211}	E(0.9)	G(1.0)	A(1.0)	A(0.6)
			bumpy bends ω_{212}	A(0.5), G(0.5)	G(1.0)	G(0.8), E(0.1)	P(0.5), I(0.5)
			Manoeuvrability ω_{213}	A(1.0)	E(0.9)	I(1.0)	P(1.0)
			top speed stability ω_{214}	E(1.0)	G(1.0)	G(1.0)	G(0.6), E(0.4)
		transmission ω_{22}	clutch operation ω_{221}	A(0.8)	G(1.0)	E(0.85)	I(0.2), A(0.8)
			gearbox operation ω_{222}	A(0.5), G(0.5)	I(0.5), A(0.5)	E(1.0)	P(1.0)
		brakes ω_{23}	stopping power ω_{231}	G(1.0)	A(0.3), G(0.6)	G(0.6)	E(1.0)
			braking stability ω_{232}	G(0.5), E(0.5)	G(1.0)	A(0.5), G(0.5)	E(1.0)
			feel at control ω_{233}	P(1.0)	G(0.5), E(0.5)	G(1.0)	G(0.5), E(0.5)
		general ω_3	quality of finish ω_{31}	P(0.5), I(0.5)	G(1.0)	E(1.0)	G(0.5), E(0.5)
	seat comfort ω_{32}		G(1.0)	G(0.5), E(0.5)	G(0.6)	E(1.0)	
	headlight ω_{33}		G(1.0)	A(1.0)	E(1.0)	G(0.5), E(0.5)	
	mirrors ω_{34}		A(0.5), G(0.5)	G(0.5), E(0.5)	E(1.0)	G(1.0)	
	horn ω_{35}		A(1.0)	G(1.0)	G(0.5), E(0.5)	E(1.0)	

Figure 8-10 : Exemple de matrice de décision (Yang et Xu 2002)

La détermination de la matrice de décision s’effectue en appliquant des matrices de transformation au tableau de performances brutes. Ce tableau, qui contient les résultats bruts des évaluations, est également utilisé au début de la méthode d’agrégation partielle.

Pour la conversion entre les performances brutes et la matrice de décision, une distinction est faite entre les critères qualitatifs et les critères quantitatifs. Cette conversion est nécessaire afin de procéder à l’évaluation de manière consistante et compatible, pour cela différentes techniques existent. (Yang 2001) propose une méthode basée sur l’utilité ainsi qu’une méthode basée sur des « règles » (rule based). La première méthode est destinée aux cas où l’utilité est préalablement déterminée. C’est pour cette raison que nous optons pour l’application de la seconde méthode.

Un critère quantitatif est évalué par une valeur numérique. Cette valeur numérique doit être transformée en degré d’évaluation (mauvais, moyen, ...) avec une masse de probabilité associée. Pour effectuer la conversion, une règle d’équivalence est utilisée, chaque degré d’évaluation correspondant à une valeur particulière. Ces règles d’équivalences sont également appelées matrices de transformation.

Supposons par exemple les règles d’équivalence suivantes pour le critère d’économie d’énergie, avec la définition des N degrés d’évaluation H_n : 50 MJ/t \Rightarrow excellent, 40 MJ/t \Rightarrow moyen, ... Si l’on considère une valeur (performance) de $h_{n,i}$ pour le critère e_i (économie d’énergie), cela signifie alors :

$$h_{n,i} \Leftrightarrow H_n \quad (n=1, \dots, N)$$

La valeur $h_{n+1,i}$ est préférée à la valeur plus faible $h_{n,i}$. Soit $h_{N,i}$ la plus grande valeur et $h_{1,i}$ la valeur la plus faible. Une évaluation quelconque h_j du critère e_i , notée $S^i(h_j)$, peut être représentée ainsi, la valeur β représentant le degré de croyance :

$$S^i(h_j) = \{(h_{n,i}, \beta_{n,i}), n=1, \dots, N\}$$

$$\text{Avec } \beta_{n,j} = \frac{h_{n+1,i} - h_j}{h_{n+1,i} - h_{n,1}} \quad \beta_{n+1,j} = 1 - \beta_{n,j} \quad \text{si } h_{n,i} \leq h_j \leq h_{n+1,i}$$

$$\beta_{k,j} = 0 \text{ pour } k=1, \dots, N, k \neq n, n+1$$

Et il vient: $S(h_j) = \{(H_n, \beta_{n,j}), n=1, \dots, N\}$

On effectue donc une interpolation linéaire entre les degrés d'évaluation voisins à l'évaluation quantitative. A l'aide de cette méthode de calcul, une valeur numérique peut alors être convertie en degrés d'évaluation avec sa masse de probabilité associée.

Dans le cas de critères qualitatifs, une matrice de transformation (fournie par le décideur) est utilisée. Cette matrice permet de convertir les évaluations qualitatives (par exemple : silencieux, bruyant, très bruyant, ...) en degrés d'évaluation H_n (par exemple : mauvais, faible, moyen, bon, excellent).

Algorithme de la théorie de l'Evidence

Comme mentionné précédemment, l'algorithme adapté par le Prof. Yang sur la base de la théorie de l'Evidence et dans le but de son application à une procédure d'analyse multicritère est utilisé. Les considérations théoriques sont issues de (Yang et Xu 2002).

Le problème à traiter est le suivant : La matrice de décision fournit différentes évaluations, avec une probabilité associée à chacune des évaluations. Par exemple, dans le cas de l'évaluation des freins d'un véhicule, nous pouvons obtenir :

- 1) La force de freinage est bonne (30% sûr) ou moyenne (60% sûr)
- 2) La stabilité au freinage est bonne (100% sûr)

Les probabilités indiquées sont associées à des degrés de croyance (belief degree). La première évaluation est incomplète, le degré de croyance total est de 90%. La partie manquante (10%) représente le degré d'ignorance ou d'incertitude. La seconde évaluation est complète. La problématique consiste donc à générer une évaluation globale pour les freins, en combinant ces différents résultats de manière rationnelle.

Données de base et conventions

Soit un système contenant L critères e_i ($i=1, \dots, L$). L'ensemble des critères est défini par E :

$$E = \{e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_L\}$$

Le poids relatif attribué aux différents critères est défini par $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_i, \dots, \omega_L\}$, avec $0 \leq \omega_i \leq 1$.

Supposons un ensemble de N degrés d'évaluation distincts, qui décrivent ensemble le standard pour la qualification d'un critère donné :

$$H = \{H_1, H_2, \dots, H_n, \dots, H_N\}$$

Dans le cas d'un critère qualitatif cela peut être par exemple H_1 =mauvais, H_2 =faible, ... On suppose également que H_{n+1} est préféré à H_n .

Les M variantes sont définies telles que a_l [$l=1, \dots, M$].

Acquisition des informations et représentation

L'évaluation d'une variante, notée $S(e_i)$, peut être représentée mathématiquement sous la forme suivante :

$$S(e_i) = \{(H_n, \beta_{n,i}), n=1, \dots, N\} \text{ et } i=1, \dots, L$$

$\beta_{n,i}$ représente le degré de croyance (degree of belief). Nous avons $\beta_{n,i} \geq 0$ et $\sum_{n=1}^N \beta_{n,i} \leq 1$. Nous pouvons lire l'expression $S(e_i)$ telle que « le critère e_i est évalué selon le degré d'évaluation H_n , avec un degré de croyance de $\beta_{n,i}$ ». L'évaluation $S(e_i)$ est complète si $\sum_{n=1}^N \beta_{n,i} = 1$. Dans le cas d'un manque total d'informations, il vient : $\sum_{n=1}^N \beta_{n,i} = 0$.

La problématique revient alors à calculer le degré de croyance général β_n ($n=1, \dots, N$) en agrégeant les évaluations de chacun des critères e_i ($i=1, \dots, L$) tel que effectué pour $S(e_i)$.

Pondération et probabilités de base

Soit la masse de probabilité $m_{n,i}$ représentant le degré auquel le $i^{\text{ème}}$ critère e_i supporte l'hypothèse que le critère est qualifié par le $n^{\text{ème}}$ niveau H_n .

$$m_{n,i} = \omega_i \cdot \beta_{n,i} \quad n=1, \dots, N$$

Dans l'expression ci-dessus, le poids ω_i doit être normalisé. Ceci sera discuté plus loin.

Soit $m_{H,i}$ la masse de probabilité non-assignée à aucun des N degrés d'évaluation pour le critère e_i .

$$m_{H,i} = 1 - \sum_{n=1}^N m_{n,i} = 1 - \omega_i \sum_{n=1}^N \beta_{n,i}$$

Afin de pouvoir être appliqué, l'algorithme original de la théorie de l'Evidence a été adapté par (Yang et Xu 2002). La révision effectuée concerne principalement :

- La normalisation des poids et l'attribution des masses de probabilités ainsi que la décomposition du degré de croyance restant (procédure détaillée plus loin).
- La génération des degrés de croyance combinés sur la base de la normalisation et des masses de probabilités combinées.
- Le développement d'un nouvel algorithme ER.

C'est cet algorithme modifié qui est présenté car il est utilisé pour la présente recherche.

Pour la normalisation des poids, nous considérons :

$$1 = \sum_{i=1}^L \omega_i$$

Avec cette méthode de normalisation, chaque critère joue un rôle proportionnel à sa pondération. Ceci diffère de l'algorithme de base qui recourait à des relations (non-linéaires) reliant les différents degrés de croyance. Dans l'algorithme proposé, la masse de probabilité initialement non assignée à aucun degré d'évaluation est traitée séparément en termes de poids relatif des critères et d'inconnue dans l'évaluation. Avec cette méthode, les bornes inférieures et supérieures des degrés de croyance peuvent être générées en utilisant les concepts de crédibilité et plausibilité de la théorie de l'Evidence. Ceci distingue la méthode des méthodes traditionnelles d'aide à la décision multicritère (MADA).

Dans ce nouvel algorithme, la masse de probabilité non assignée $m_{H,i}$ est décomposée en deux parties :

$$\begin{aligned} m_{H,i} &= \bar{m}_{H,i} + \tilde{m}_{H,i} \\ \bar{m}_{H,i} &= 1 - \omega_i \\ \tilde{m}_{H,i} &= \omega_i \left(1 - \sum_{n=1}^N \beta_{n,i} \right) \end{aligned}$$

$\bar{m}_{H,i}$ est la première partie de la masse de probabilité non encore assignée à des degrés d'évaluation individuelle. $\bar{m}_{H,i}$ est une fonction linéaire décroissante de ω_i . Sa valeur sera de 1 pour $\omega_i=0$. La seconde partie $\tilde{m}_{H,i}$ sera nulle si l'évaluation $S(e_i)$ est complète.

Agrégation des attributs

Soient $m_{n,I(i)}$ ($n=1, 2, \dots, N$), $\tilde{m}_{H,I(i)}$ et $\bar{m}_{H,I(i)}$ les masses de probabilité combinées générées par les i premières évaluations. L'algorithme ER permet de combiner les i premières évaluations avec la $(i+1)^{\text{ème}}$ évaluation de manière réursive :

{H_n} :

$$m_{n,I(i+1)} = K_{I(i+1)} \cdot [m_{n,I(i)}m_{n,i+1} + m_{H,I(i)}m_{n,i+1} + m_{n,I(i)}m_{H,i+1}]$$

$$m_{H,I(i)} = \tilde{m}_{H,I(i)} + \bar{m}_{H,I(i)}$$

$$n=\{1, 2, \dots, N\}$$

{H} :

$$\tilde{m}_{H,I(i+1)} = K_{I(i+1)} [\tilde{m}_{H,I(i)}\tilde{m}_{H,i+1} + \bar{m}_{H,I(i)}\tilde{m}_{H,i+1} + \tilde{m}_{H,I(i)}\bar{m}_{H,i+1}]$$

$$\bar{m}_{H,I(i+1)} = K_{I(i+1)} \cdot [\bar{m}_{H,I(i)}\bar{m}_{H,i+1}]$$

$$K_{I(i+1)} = \left[1 - \sum_{t=1}^N \sum_{j=1, j \neq t}^N m_{t,I(i)}m_{j,i+1} \right]^{-1}$$

$$i=\{1, 2, \dots, L-1\}$$

Calcul des degrés de croyance combinés

Une fois les $L-1$ évaluations (itérations) effectuées, les degrés de croyance combinée sont calculés en répartissant $\bar{m}_{H,I(L)}$ proportionnellement aux différents degrés d'évaluation. Le calcul est fait selon les formules suivantes :

$$\{H_n\}: \quad \beta_n = \frac{m_{n,I(L)}}{1 - \bar{m}_{H,I(L)}} \quad n=\{1, 2, \dots, N\}$$

$$\{H\}: \quad \beta_H = \frac{\tilde{m}_{H,I(L)}}{1 - \bar{m}_{H,I(L)}}$$

β_n est la probabilité à laquelle le degré d'évaluation H_n est évalué. β_H représente la partie non assignée du degré de croyance.

Calcul de l'utilité

L'établissement de la masse de probabilité (degré de croyance β) assignée à chaque degré d'évaluation n'est pas nécessairement suffisante afin d'effectuer le choix de la meilleure variante. La Figure 8-11 illustre les différentes masses de probabilités d'une évaluation fictive d'enrobés.

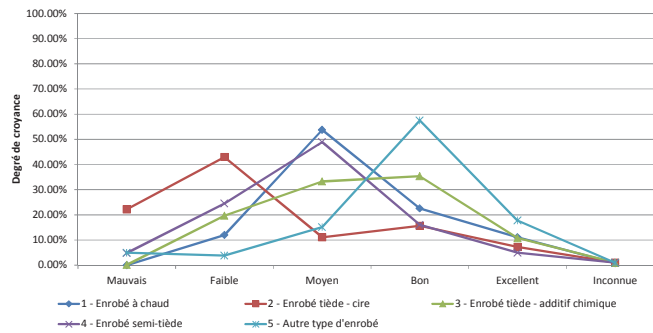


Figure 8-11 : Exemple de représentation des degrés de croyance

Dans les cas où l'évaluation entre les variantes est complexe, il est utile de disposer d'une valeur numérique équivalente représentant l'ensemble de l'évaluation pour une variante donnée. Nous utilisons pour cela le concept d'utilité attendue (expected utility).

Supposons deux degrés d'évaluations tels que H_{n+1} est préféré à H_n . Il vient alors $u(H_{n+1}) > u(H_n)$. Différentes méthodes existent afin de calculer les utilités. La méthode développée ici propose un calcul d'utilité prenant en considération la partie inconnue β_H . L'intervalle de croyance pour un degré d'évaluation donné est de $[\beta_n, (\beta_n + \beta_H)]$ où $(\beta_n + \beta_H)$ représente la mesure de plausibilité. Si toutes les évaluations sont complètes, alors β_H devient nul. En considérant ceci, trois différentes valeurs d'utilité attendue sont calculées pour le critère y d'une variante, la valeur minimale, maximale et moyenne :

$$u_{max}(y) = \sum_{n=1}^{N-1} \beta_n u(H_n) + (\beta_N + \beta_H) u(H_N)$$

$$u_{min}(y) = (\beta_1 + \beta_H) u(H_1) + \sum_{n=2}^N \beta_n u(H_n)$$

$$u_{moy}(y) = \frac{u_{max}(y) + u_{min}(y)}{2}$$

On peut observer que si toutes les évaluations sont complètes ($\beta_H=0$), nous obtenons $u_{max}(y) = u_{min}(y) = u_{moy}(y)$. Afin d'avoir un classement plus clair, la part d'inconnue doit donc être réduite au minimum.

Le classement entre les variantes est ensuite effectué par comparaison des différentes utilités :

- La variante a_i sera préférée à la variante a_k sur y si et seulement si $u_{min}(y(a_i)) \geq u_{max}(y(a_k))$.
- Les variantes a_i et a_k seront indifférentes si et seulement si $u_{min}(y(a_i)) = u_{min}(y(a_k))$ et $u_{max}(y(a_i)) = u_{max}(y(a_k))$.
- Dans les autres cas, le degré de préférence $P(a_i > a_k)$ de a_i par rapport à a_k peut-être calculé par (Wang, Yang et al. 2006) :

$$P(a_i > a_k) = \frac{\max[0, u_{max}(a_i) - u_{min}(a_k)] - \max[0, u_{min}(a_i) - u_{max}(a_k)]}{[u_{max}(a_i) - u_{min}(a_i)] + [u_{max}(a_k) - u_{min}(a_k)]}$$

Si $P(a_i > a_k) > 0.5$, alors a_i est préférée à a_k à un degré $P(a_i > a_k)$.

Dans les expressions ci-dessus, $u(H_n)$ représente l'utilité attribuée aux différents degrés d'évaluation H_n (mauvais, faible, moyen,...). Une hypothèse doit donc être faite pour la correspondance entre les degrés d'évaluation et l'utilité assignée. Sur le principe, seules les valeurs maximales (utilité $u(H_N) = 1$) et minimales (utilité $u(H_1) = 0$) sont définies. On distinguera ensuite les fonctions d'utilité linéaires et non-linéaires selon les applications. Une échelle linéaire signifie qu'une amélioration de la performance a la même valeur, quelle que soit la performance initiale. Dans certains cas, on peut juger intuitivement

qu'une amélioration de la performance est plus important dans le cas de performances initiales faibles, mais l'établissement de la fonction non linéaire est alors plus complexe. (Ramani, Quadrifoglio et al. 2009) illustre par exemple la détermination de fonctions d'utilité non linéaires dans le cas de systèmes de transport.

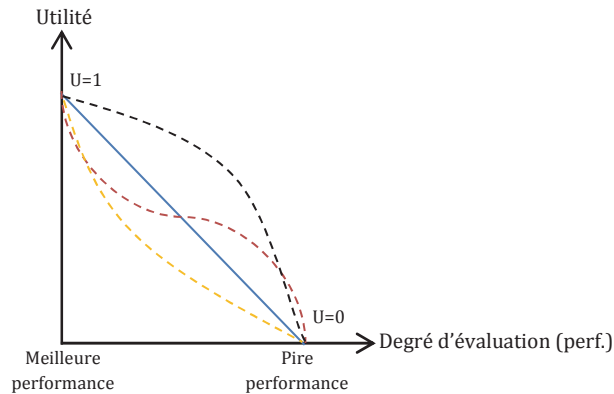


Figure 8-12 : Exemples de fonctions d'utilité linéaire et non linéaires

8.5.3 Exemple de calcul

L'algorithme pour le calcul selon la théorie de l'Evidence est la partie la plus complexe de la procédure à mettre en place. Des outils informatiques sont nécessaires pour réaliser de nombreuses itérations. Son implémentation dans l'outil multicritère sera expliquée plus loin.

Afin d'illustrer le déroulement de l'algorithme, nous effectuons un exemple fictif de calcul. La Figure 8-13 représente la procédure suivie afin de déterminer les degrés de croyance combinés.

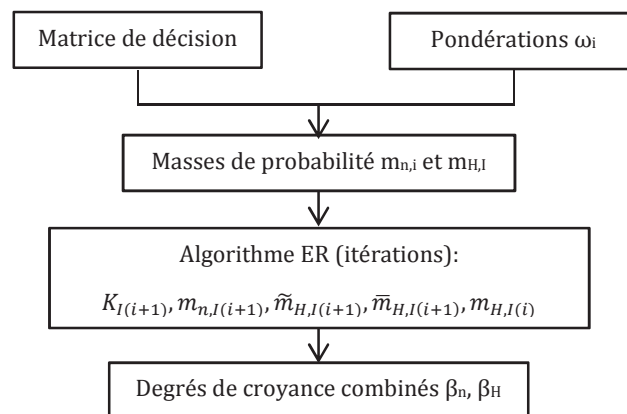


Figure 8-13 : Procédure de calcul selon algorithme ER

Matrice de décision

Soient les degrés d'évaluation H_n : Mauvais, Faible, Moyen, Bon, Excellent.

Nous supposons la matrice de décision suivante pour un enrobé, matrice issue de l'évaluation selon différents critères. L'évaluation selon le critère e_2 est incomplète ($\Sigma=0.8$).

Tableau 8-3 : Matrice de décision (exemple de calcul)

Critères		Evaluations de l'enrobé				
		Mauvais	Faible	Moyen	Bon	Excellent
e ₁	Energie			0.5	0.5	
e ₂	Emissions				0.8	
e ₃	Coûts		0.3	0.7		

Critères e_i i=1, 2, 3 (L=3)

Degrés d'évaluation H_n n=1, 2, 3, 4, 5 (N=5)

Pondération et probabilités de base

Pour la pondération, nous choisissons :

$$\omega_1=0.5 \quad \omega_2= \omega_3=0.25 \quad \sum_{i=1}^L \omega_i = 1$$

Nous pouvons maintenant définir les masses de probabilités m_{n,i} :

$$\begin{matrix} m_{1,1}=0 & m_{2,1}=0 & m_{3,1}=0.25 & m_{4,1}=0.25 & m_{5,1}=0 \\ m_{1,2}=0 & m_{2,2}=0 & m_{3,2}=0 & m_{4,2}=0.20 & m_{5,2}=0 \\ m_{1,3}=0 & m_{2,3}=0.075 & m_{3,3}=0.175 & m_{4,3}=0 & m_{5,3}=0 \end{matrix}$$

Les masses de probabilités non assignées sont également calculées :

$$\begin{matrix} m_{H,1}=0.50 & \tilde{m}_{H,1}=0 & \bar{m}_{H,1}=0.50 \\ m_{H,2}=0.80 & \tilde{m}_{H,2}=0.05 & \bar{m}_{H,2}=0.75 \\ m_{H,3}=0.75 & \tilde{m}_{H,3}=0 & \bar{m}_{H,3}=0.75 \end{matrix}$$

Algorithme d'agrégation

i=1

$$\begin{aligned} K_{I(2)} &= [1 - m_{1,I(1)}m_{2,2} + m_{1,I(1)}m_{3,2} + m_{1,I(1)}m_{4,2} + m_{1,I(1)}m_{5,2} + \\ & m_{2,I(1)}m_{1,2} + m_{2,I(1)}m_{3,2} + m_{2,I(1)}m_{4,2} + m_{2,I(1)}m_{5,2} + \\ & m_{3,I(1)}m_{1,2} + m_{3,I(1)}m_{2,2} + m_{3,I(1)}m_{4,2} + m_{3,I(1)}m_{5,2} + \\ & m_{4,I(1)}m_{1,2} + m_{4,I(1)}m_{2,2} + m_{4,I(1)}m_{3,2} + m_{4,I(1)}m_{5,2} + \\ & m_{5,I(1)}m_{1,2} + m_{5,I(1)}m_{2,2} + m_{5,I(1)}m_{3,2} + m_{5,I(1)}m_{4,2}]^{-1} \\ &= [1 - 0.20 \cdot 0.25]^{-1} = 1.053 \\ m_{1,I(2)} &= K_{I(2)} [m_{1,1}m_{1,2} + m_{H,1}m_{1,2} + m_{1,1}m_{H,2}] = 0 \\ m_{2,I(2)} &= K_{I(2)} [m_{2,1}m_{2,2} + m_{H,1}m_{2,2} + m_{2,1}m_{H,2}] = 0 \\ m_{3,I(2)} &= K_{I(2)} [m_{3,1}m_{3,2} + m_{H,1}m_{3,2} + m_{3,1}m_{H,2}] = 0.210 \\ m_{4,I(2)} &= K_{I(2)} [m_{4,1}m_{4,2} + m_{H,1}m_{4,2} + m_{4,1}m_{H,2}] = 0.368 \\ m_{5,I(2)} &= K_{I(2)} [m_{5,1}m_{5,2} + m_{H,1}m_{5,2} + m_{5,1}m_{H,2}] = 0 \\ \tilde{m}_{H,I(2)} &= K_{I(2)} [\tilde{m}_{H,1}\tilde{m}_{H,2} + \bar{m}_{H,1}\tilde{m}_{H,2} + \tilde{m}_{H,1}\bar{m}_{H,2}] = 0.026 \end{aligned}$$

$$\bar{m}_{H,I(2)} = K_{I(2)}[\bar{m}_{H,I(1)}\bar{m}_{H,I(2)}] = 0.395$$

$$m_{H,I(1)} = 0.026 + 0.395 = 0.421$$

i=2

$$\begin{aligned} K_{I(3)} &= [1 - m_{1,I(2)}m_{2,3} + m_{1,I(2)}m_{3,3} + m_{1,I(2)}m_{4,3} + m_{1,I(2)}m_{5,3} + \\ & m_{2,I(2)}m_{1,3} + m_{2,I(2)}m_{3,3} + m_{2,I(2)}m_{4,3} + m_{2,I(2)}m_{5,3} + \\ & m_{3,I(2)}m_{1,3} + m_{3,I(2)}m_{2,3} + m_{3,I(2)}m_{4,3} + m_{3,I(2)}m_{5,3} + \\ & m_{4,I(2)}m_{1,3} + m_{4,I(2)}m_{2,3} + m_{4,I(2)}m_{3,3} + m_{4,I(2)}m_{5,3} + \\ & m_{5,I(2)}m_{1,3} + m_{5,I(2)}m_{2,3} + m_{5,I(2)}m_{3,3} + m_{5,I(2)}m_{4,3}]^{-1} \\ &= [1 - 0.210 \cdot 0.075 + 0.368 \cdot (0.075 + 0.175)]^{-1} = 1.121 \end{aligned}$$

$$m_{1,I(3)} = K_{I(3)}[m_{1,2}m_{1,3} + m_{H,2}m_{1,3} + m_{1,2}m_{H,3}] = 0$$

$$m_{2,I(3)} = \dots = 0.035$$

$$m_{3,I(3)} = \dots = 0.301$$

$$m_{4,I(3)} = \dots = 0.309$$

$$m_{5,I(3)} = \dots = 0$$

$$\tilde{m}_{H,I(3)} = \dots = 0.022$$

$$\bar{m}_{H,I(3)} = \dots = 0.332$$

$$m_{H,I(3)} = \dots = 0.354$$

Calcul des degrés de croyance combinés

Sur la base des résultats des L-1 itérations, nous pouvons finalement calculer les degrés de croyance combinés pour la variante :

$$\beta_1 = \frac{m_{1,I(3)}}{1 - \bar{m}_{H,I(3)}} = 0 \quad H_1 = \text{mauvais}$$

$$\beta_2 = \dots = 0.053 \quad H_2 = \text{faible}$$

$$\beta_3 = \dots = 0.450 \quad H_3 = \text{moyen}$$

$$\beta_4 = \dots = 0.464 \quad H_4 = \text{bon}$$

$$\beta_5 = \dots = 0 \quad H_5 = \text{excellent}$$

$$\beta_H = \dots = 0.033 \quad \text{Part d'inconnue}$$

Pour l'exemple calculé ici, le comportement de l'enrobé se trouve donc entre moyen et bon, avec une faible part d'inconnue. Sur la base des croyances combinées, les utilités peuvent ensuite être déterminées si nécessaire.

8.6 Méthodologie d'évaluation multicritère (Partie 2 du modèle)

La première partie du modèle concerne l'inventaire du cycle de vie et le calcul des indicateurs de performances (chapitre 7). Pour un enrobé donné, les paramètres suivants sont obtenus en fin de première partie :

- Consommation énergétique sur le cycle de vie [M]/t].

- Emissions dans l'air sur le cycle de vie (kg CO_{2,eq}/t).
- Coûts énergétiques sur le cycle de vie (CHF/t).
- Indice de performance brute et indice de performance normalisé pour la sensibilité à l'eau, la résistance aux déformations permanentes, la résistance à la fatigue.

En accord avec la nomenclature des méthodes multicritères, les enrobés seront assimilés aux variantes et les paramètres assimilés aux critères. Le tableau de performances brutes contient les résultats des variantes étudiées, pour chacun des critères.

Le modèle global d'évaluation est présenté de manière synthétique dans la Figure 8-14.

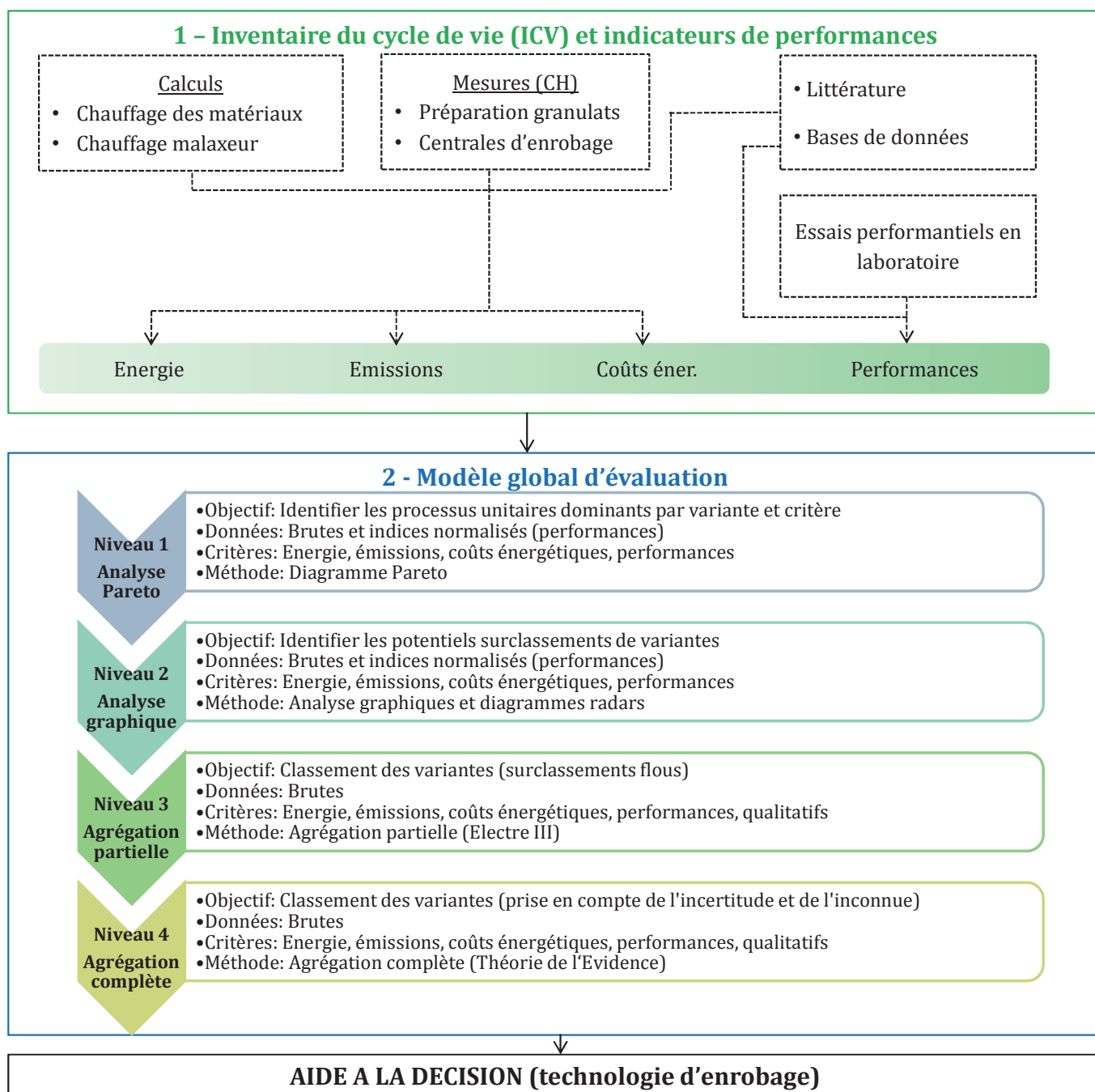


Figure 8-14 : Vue générale de la méthodologie du modèle multicritère d'aide à la décision

Le principe du modèle consiste à effectuer différents niveaux d'analyse. La complexité des méthodes est croissante au fur et à mesure des niveaux d'analyse. Cette complexité peut parfois donner une impression de « boîte-noire » au décideur. C'est pourquoi, les deux premiers niveaux d'analyse sont importants afin de proposer une représentation simple et synthétique des résultats. Ces deux premiers niveaux d'analyse (analyse Pareto et analyse graphique) ne font intervenir aucune notion de préférence et consistent majoritairement en une analyse graphique. A moins qu'une variante ne surclasse toutes les autres pour l'ensemble des critères, ce genre d'analyse est bien souvent insuffisant afin de choisir de manière indiscutable la meilleure variante.

Dans les niveaux 3 et 4, des méthodes d'aide à la décision sont utilisées. Ces méthodes ne sont pas initialement destinées au domaine des enrobés bitumineux, mais elles sont malgré tout applicables. Dans les cas (fréquents) où l'analyse graphique ne permet pas de décider, l'utilisation de méthodes d'aide à la décision est nécessaire. Le choix et les particularités des méthodes ont été détaillés précédemment dans ce chapitre. De manière générale, le recours aux méthodes d'agrégation permet de prendre en compte la préférence du décideur, établir un classement clair des variantes et proposer différentes analyses de sensibilité et de robustesse. Ces méthodes permettent également d'ajouter des critères qualitatifs ou quantitatifs si le décideur le souhaite.

Le Tableau 8-4 propose un survol comparatif des particularités relatives aux différents niveaux d'évaluation.

Tableau 8-4 : Comparatif des différents niveaux d'évaluation

Niveau d'évaluation	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
Méthode	Analyse Pareto	Analyse graphique/Pareto	Agrégation partielle	Agrégation complète
Tableau de perf.	Quantitatif (brutes/normalisées)	Quantitatif (brutes/normalisées)	Quantitatif (brutes)	Quantitatif/Qualitatif (brutes)
Traitement des données	Non	Non	Oui	Oui
Préférences	Non	Non	Oui	Oui
Critères				
Energie	Oui	Oui	Oui	Oui
Emissions	Oui	Oui	Oui	Oui
Coûts éner.	Oui	Oui	Oui	Oui
Performances	Oui	Oui	Oui	Oui
Qualitatifs	Non	Non	Oui	Oui
Hypothèses	Diagramme radar	Diagramme radar	Pondération, seuils	Pondération, matrices de transformation, utilité
Résultat	Processus unitaires dominants	Eventuel surclassement complet	Classement	Classement
Analyse robustesse	Non	Non	Oui	Oui

Dans la suite de ce chapitre, nous décrivons pour chaque niveau d'analyse les hypothèses, critères utilisés, résultats fournis et si nécessaire les détails d'implémentation.

Le modèle a été mis en place dans MS-Excel, avec programmation Visual Basic (VBA) pour certains aspects ; il permet de comparer 5 différents enrobés. Ce choix a été effectué afin de garantir la souplesse ainsi qu'une transparence totale de l'outil. Des copies d'écrans du modèle sont disponibles en Annexe E. Après introduction des données de performances et des données de base nécessaires, la procédure de calcul est automatisée. Cet outil informatique a pour but d'illustrer la mise en place de la méthodologie développée dans la recherche, et la réalisation de premiers calculs (chapitre 9). Des adaptations et développements sont possibles.

Nous décrivons, dans ce qui suit, uniquement les éléments principaux disponibles dans les onglets suivants :

- Instructions et navigations

- Saisie des résultats de l'analyse du cycle de vie
- Analyse niveau 1 : Analyse Pareto
- Analyse niveau 2 : Analyse graphique
- Analyse niveau 3 : Agrégation partielle
- Analyse niveau 4 : Agrégation complète

8.6.1 Choix des critères

Les résultats de l'inventaire du cycle de vie (énergie, émission, coûts énergétiques) ainsi que les performances sont les critères principaux, considérés à tous les niveaux d'analyse. La prise en compte des émissions (dans l'air) et de la consommation énergétique sur le cycle de vie ne sont pas des critères redondants. Les émissions ne sont pas directement proportionnelles à la consommation énergétique. Pour le processus unitaire de la centrale qui est un des principaux processus du cycle de vie, les émissions vont dépendre du type de combustible, du rendement de combustion du brûleur, de la température extérieure, du développement technologique de la centrale, etc. Il est donc possible, pour une centrale d'enrobage, d'émettre plus de gaz à effet de serre malgré une consommation énergétique plus faible. Ceci est également discuté au chapitre 6.

En plus de ces critères de base, deux critères additionnels ont été ajoutés pour les analyses par agrégation (niveaux 3 et 4) :

- Complexité du processus de fabrication : La fabrication d'un enrobé tiède ne se fait pas de manière identique à celle d'un enrobé à chaud. La complexité du processus de fabrication peut être reliée aux modifications nécessaires à la centrale. Ce critère permet de différencier les enrobés à chaud des enrobés tièdes, mais aussi de distinguer les différentes sortes d'enrobés tièdes entre-elles.
- Potentiel de recyclabilité : Les limites de l'analyse du cycle de vie sont fixées à la fin du processus de pose. Le recyclage éventuel des enrobés n'est donc pas pris en compte dans le présent inventaire du cycle de vie. Le chapitre 7 illustre toute la difficulté de la prise en compte de l'enrobé recyclé dans l'ICV. Cet indicateur de potentiel de recyclabilité représente, pour l'enrobé évalué, s'il sera ou non un « bon » matériau de recyclage. Ceci dépend des additifs utilisés, du vieillissement du liant, des recyclages antérieurs, etc.

Pour chacun de ces critères, une méthode de notation a été mise en place selon le niveau d'analyse étudié. Les détails sont disponibles ci-après.

Concernant la pondération des différents critères, il faut de manière générale éviter que la pondération d'un critère soit supérieure ou égale à la somme des pondérations des autres critères.

8.6.2 Niveau 1 : Analyse Pareto

L'objectif de ce premier niveau est d'identifier les phases de l'analyse du cycle de vie contribuant le plus au bilan global. Pour cela, les données désagrégées par processus unitaire sont utilisées. Selon (Jolliet, Saadé et al. 2005), on ne retiendra en général dans le système que les processus contribuant à plus de 1% ou 3% du bilan global. Les variantes ne sont donc pas comparées entre-elles, il s'agit d'une analyse interne des processus unitaires de chaque variante.

Critères

Les critères considérés sont : énergie, émissions, coûts énergétiques et performances (indices normalisés).

Il n'y a pas de pondération des critères.

Hypothèses

Pour l'énergie, les émissions et les coûts énergétiques, les hypothèses sont celles relatives à l'inventaire du cycle de vie. La méthode étant graphique, il n'y a pas d'hypothèses supplémentaires.

Pour les performances, une comparaison est faite selon un diagramme radar. Ce type de représentation graphique nécessite des unités identiques pour les différents axes. Les indices de performance normalisés sont utilisés.

Résultats

Pour un enrobé (variante) donné, l'analyse des critères évalués sur le cycle de vie est faite comme illustré dans la Figure 8-15.

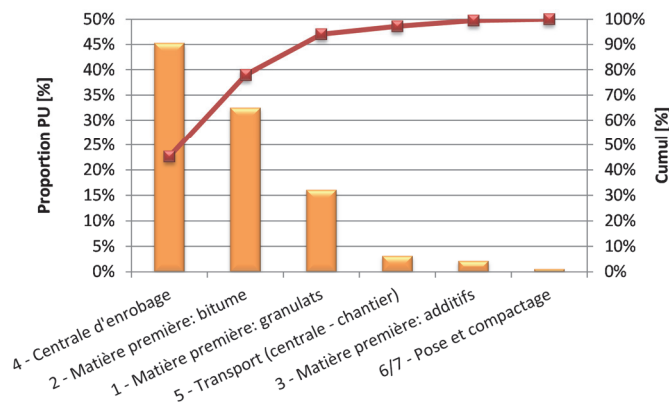


Figure 8-15 : Exemple de résultat niveau 1 (analyse Pareto) - Energie

Pour les critères performantiels, la représentation des performances est illustrée dans la Figure 8-16.

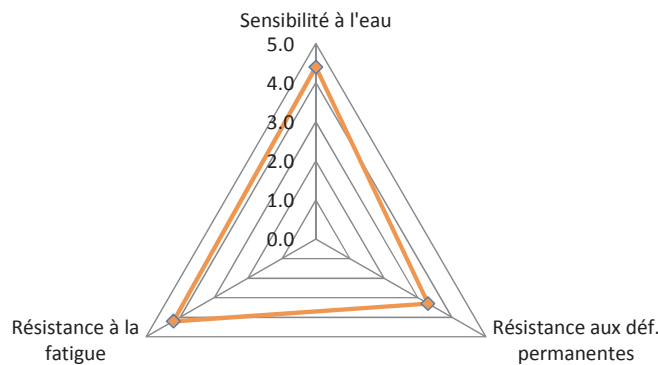


Figure 8-16 : Exemple de résultat niveau 1 - Performance (indice normalisé)

8.6.3 Niveau 2 : Analyse graphique

Dans le second niveau d'analyse, les différentes variantes sont comparées entre-elles par des représentations graphiques. Si une variante surclasse toutes les autres pour l'ensemble des critères, alors elle est aisément identifiée.

La comparaison se fait tout d'abord par critère, avant de proposer un comparatif global prenant en considération l'ensemble des critères.

Critères

Les critères pris en compte sont : énergie, émissions, coûts énergétiques et performances (indices bruts et normalisés).

Il n'y a pas de pondération des critères.

Hypothèses

Il n'y a pas d'hypothèses spécifiques, la méthode étant graphique.

Le diagramme radar pour la comparaison de variantes est utilisé. Il propose une comparaison facile à interpréter et permet d'identifier si une variante est la meilleure pour l'ensemble des critères. Ce type de représentation a quelques faiblesses :

- Difficulté à identifier la meilleure variante si pas de surclassement net.
- Échelles identiques ou normalisations nécessaires pour tous les axes (perte de précision).
- Pas d'informations sur l'ampleur du surclassement.

Pour l'élaboration des diagrammes radar, les données sont normalisées [0,1], la meilleure note étant de 1. Deux options sont offertes à l'utilisateur pour la normalisation :

- Utilisation des valeurs du projet en cours : Pour un critère donné, la valeur maximale obtenue sur les différentes variantes du projet est considérée comme valeur de normalisation.
- Utilisation de valeurs par défaut : Ceci permet de faire des comparaisons inter-projets. Le choix des valeurs par défaut pour l'énergie, les émissions et les coûts énergétiques est basé sur les valeurs maximales théoriques calculées. Pour les performances, il s'agit des performances maximales.

Le choix de l'option de normalisation pour le diagramme radar n'influence pas le résultat et les relations de surclassement. Seule la représentation visuelle est différente. Pour le calcul des notes, une différence est faite entre les critères à maximiser (performance sensibilité à l'eau et résistance à la fatigue) et les critères à minimiser (émissions, énergie, coûts énergétiques, performance déformation permanente).

Résultats

Les premières analyses proposées sont des analyses par critères sous la forme d'histogrammes ou de diagramme radar (performances). Pour le comparatif global des différents enrobés (variantes), le diagramme radar est utilisé. Un axe est destiné à chacun des paramètres mesurés sur le cycle de vie. Le dernier axe est celui des performances (indices bruts) pour lesquelles l'utilisateur a le choix entre l'utilisation d'une seule performance ou la combinaison de toutes les performances (sans pondération).

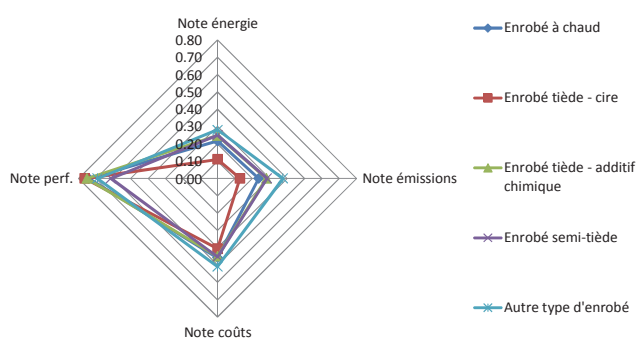


Figure 8-17 : Exemple de résultat niveau 2 (analyse graphique) – Comparaison des variantes

8.6.4 Niveau 3 : Agrégation partielle

Dans le troisième niveau, la méthode par agrégation partielle Electre III est appliquée. Le but est de proposer un classement des variantes, permettant également à l'utilisateur de faire une analyse de la robustesse de la solution obtenue. Les aspects théoriques de la méthode sont expliqués au chapitre 8.4.

Critères et pondération

Différents niveaux de critères sont définis. Ces niveaux permettent de calculer les pondérations associées à chaque critère.

Dans un premier niveau (C.X), les critères issus de l'inventaire du cycle de vie sont considérés i.e. énergie (C1), émissions (C2), coûts énergétiques(C3) ainsi que les performances brutes (C4). Un critère additionnel concerne l'évaluation qualitative des variantes (C5).

Le critère de performance est réparti en trois sous-critères (C.4.X) pour chaque performance spécifique. Le critère qualitatif (C5) est divisé en deux sous-critères qui sont la complexité du processus de fabrication (C5.1) et le potentiel de recyclabilité (C5.2). L'établissement de la note de ces sous-critères est discuté plus loin.

Le nombre de critères étant limité, une méthode de pondération directe est adaptée. Pour la pondération des différents critères, l'utilisateur a le choix entre :

- Insérer sa propre pondération.
- Utilisation d'une pondération équilibrée.
- Appliquer une pondération par défaut.

Pour chaque critère, des limites maximales et minimales sont données pour la pondération. Ceci permet d'éviter un poids relatifs trop important d'un critère par rapport aux autres. La Figure 8-18 indique pour chaque critère les limites de pondération, ainsi que la pondération proposée par défaut.

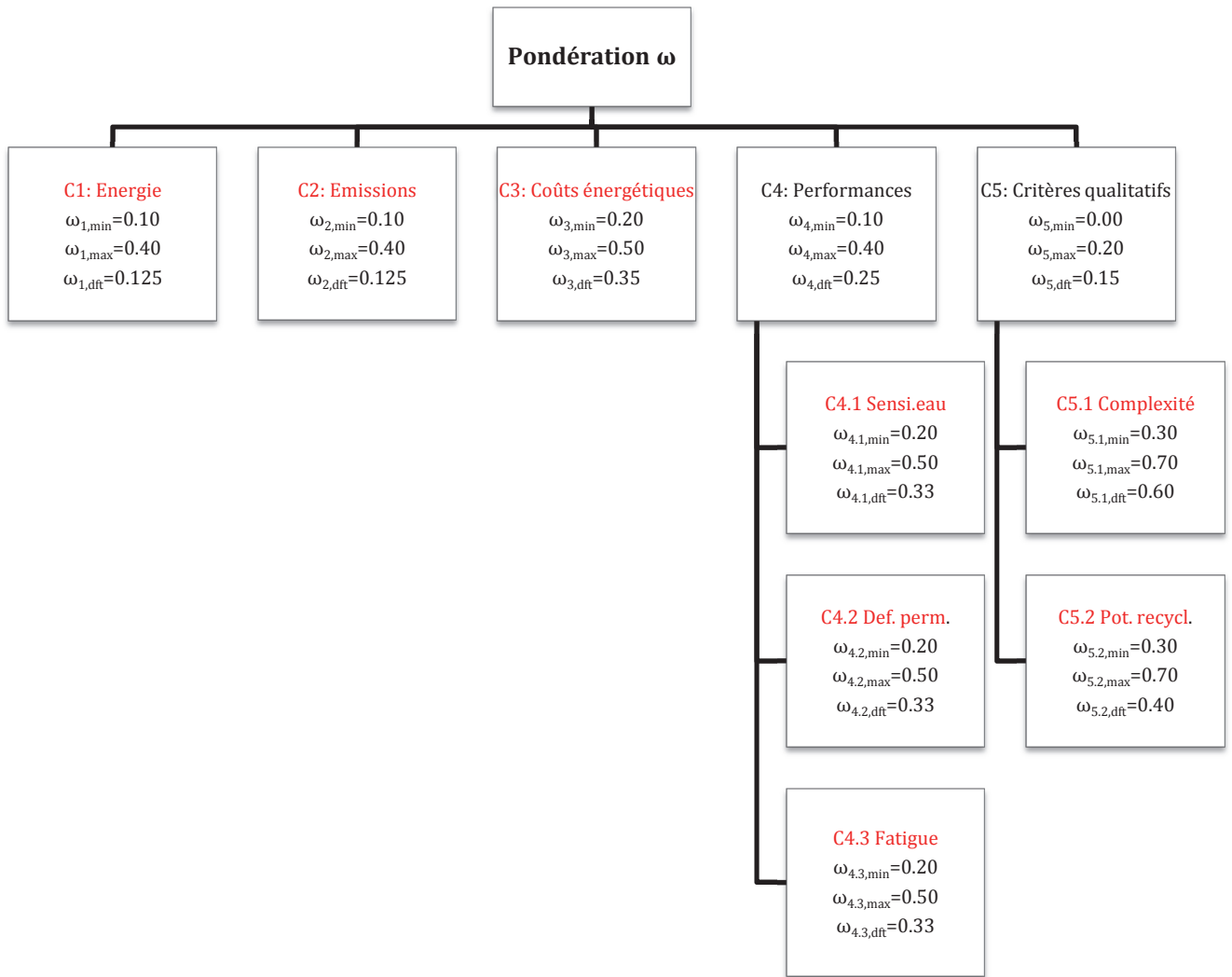


Figure 8-18 : Arbre de pondération avec valeurs limites (min, max) et par défaut (dft)

Pour les critères qualitatifs de « Complexité du processus de fabrication » et du « Potentiel de recyclabilité », une note doit être établie car la méthode Electre nécessite l'utilisation de critères quantitatifs. Pour l'établissement de la note relative à ces deux critères, les évaluations qualitatives sont donc converties en évaluations chiffrées. Le Tableau 8-5 et le Tableau 8-6 indiquent les paramètres pour le calcul de la note de chacun des critères.

Pour le calcul de la note d'un des critères qualitatifs (C5.1 ou C5.2) la moyenne géométrique pondérée (moyenne quasi linéaire (Bouyssou, Dubois et al. 2006)) des sous-critères de niveau 3 est utilisée au lieu de la moyenne arithmétique. Ce calcul évite le risque de compensation inhérent à la moyenne arithmétique utilisée traditionnellement. La moyenne géométrique pondérée est calculée ainsi (note x , pondération ω) :

$$\bar{x} = \prod_{i=1}^n x_i^{\omega_i}$$

Pour la pondération ω , l'utilisateur dispose également du choix entre une pondération personnelle, pondération équilibrée et une pondération par défaut pour le calcul de la moyenne arithmétique. Les valeurs par défaut ainsi que les limites sont indiquées dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 8-5 : Echelle d'évaluation pour la note du critère C5.1 « Complexité du processus de fabrication » - Agrégation partielle

Critères niv. 3 & pondération	Echelle qualitative	Note	Commentaires
Processus de fabrication en centrale $\omega_{\min}=0.20 / \omega_{\max}=0.50 / \omega_{\text{df}}=0.30$	Traditionnel	6	Modifications faibles=1 additif ajouté, modifications fortes=modification de la séquence, un ou plusieurs composants en plus (ex. sable humide),...
	Modifications faibles	4	
	Modifications fortes	0	
Mode d'insertion des additifs $\omega_{\min}=0.20 / \omega_{\max}=0.50 / \omega_{\text{df}}=0.30$	Aucun	6	L'ajout d'additif à la main est une source d'erreur, imprécisions et accidents.
	En ligne (automatique)	4	
	Insertion à la main	0	
Ajout/maîtrise de la teneur en eau $\omega_{\min}=0.20 / \omega_{\max}=0.50 / \omega_{\text{df}}=0.40$	Non	6	La maîtrise de la teneur en eau requiert un système de contrôle et d'analyse ce qui demande plus de soins.
	Injection d'eau	1.5	
	Maîtrise de la teneur eau	0	

Tableau 8-6 : Echelle d'évaluation pour la note du critère C5.2 « Potentiel de recyclabilité » - Agrégation partielle

Critères niv. 3 & pondération	Echelle qualitative	Note	Commentaires
Additifs utilisés $\omega_{\min}=0.20 / \omega_{\max}=0.50 / \omega_{\text{df}}=0.33$	Aucun additif	6	Le niveau de « dommage » n'est pas régulier, utilisation d'une échelle non-linéaire.
	1 additif « vert »	3	
	1 additif chimique	1	
	Plus de 1 additif chimique	0	
Vieillessement du liant à la fabrication $\omega_{\min}=0.20 / \omega_{\max}=0.50 / \omega_{\text{df}}=0.33$	Faible	6	Un liant très (trop) vieilli est difficile à remobiliser pour un recyclage futur. Le vieillissement faible est assimilé à un enrobé semi-tiède.
	Modéré	4	
	Traditionnel	2	
	Fort	0	
Cycles de retraitement subis $\omega_{\min}=0.20 / \omega_{\max}=0.50 / \omega_{\text{df}}=0.33$	Aucun	6	Echelle non-linéaire.
	1 cycle	2	
	Plus de 1 cycle	0	

Cette méthode d'élaboration des notes peut également être modifiée par l'utilisateur s'il le souhaite.

Hypothèses

En plus de la prise en compte des préférences du décideur (pondération), la méthode par agrégation partielle nécessite la définition des seuils pour chacun des critères :

- Seuil d'indifférence q_j
- Seuil de préférence stricte p_j
- Seuil de veto v_j

Pour la définition des seuils, l'utilisateur a le choix entre l'utilisation de ses propres valeurs et des valeurs par défaut. Les valeurs par défaut proposées sont des constantes i.e. le seuil n'est pas défini par une fonction. Nous décrivons ici le mécanisme de choix des différents seuils par défaut.

Les performances mécaniques sont des valeurs physiques issues d'un résultat d'essai. La définition des seuils est faite sur la base des données relatives à la répétabilité et à la reproductibilité de l'essai. Pour cela, les informations fournies par les normes relatives aux essais, ainsi que (Corté, Gourdon et al. 2001) sont utilisées. Nous définissons le seuil d'indifférence à un écart-type de la moyenne entre la valeur de répétabilité et de reproductibilité. Le seuil de préférence stricte est défini à 1.5 écart-type. Le seuil de

veto représente la valeur à-partir de laquelle un surclassement est refusé, même si tous les autres indicateurs aboutissent à un surclassement. Il permet d'éviter le risque de compensation. Dans la pratique, les experts recommandent de rehausser sa valeur ou éventuellement de ne pas en utiliser. Le seuil de veto par défaut est défini sur la base de l'expérience relative aux essais et des exemples d'application (différence entre les seuils) et recommandations proposés par (Maystre, Pictet et al. 1994). Les seuils de veto ne doivent pas être trop contraignants pour les performances afin de ne pas annihiler les autres gains potentiels. Nous proposons donc par défaut des seuils de veto relativement élevés.

La définition des seuils pour les critères d'énergie, émissions et coûts énergétiques est plus complexe car les indicateurs résultent d'un calcul sur le cycle de vie. Sur la base de différents calculs ICV et de résultats de la littérature, nous pouvons estimer que la consommation énergétique se situe globalement, pour la majorité des enrobés, entre 575 et 710 MJ/t, les émissions entre 37 et 54 kg CO_{2,eq}/t et les coûts énergétiques entre 14.7 et 17.8 CHF/t. Sur cette base, le seuil d'indifférence est fixé à 2% de la valeur minimale sur le cycle de vie et le seuil de préférence stricte à 5%. Des seuils de veto cinq fois plus élevés aux seuils de préférence stricte sont retenus.

La définition des seuils pour les critères qualitatifs est faite en se basant sur l'étendue de notation [0 ; 6]. Une fois de plus, un seuil de veto assez élevé est proposé dans un premier temps afin de ne pas être trop discriminant.

Un récapitulatif des différents seuils d'indifférence, de préférence stricte et de veto proposés par défaut pour le calcul par agrégation partielle est indiqué dans le Tableau 8-7. Ces valeurs sont réalistes, mais elles peuvent en tout temps être modifiées par l'utilisateur. L'analyse de sensibilité permet également de les faire varier et analyser l'incidence sur le classement final.

Tableau 8-7 : Seuils par défaut pour calcul par agrégation partielle (Electre III)

Critère	Energie	Emissions	Coûts_E	Performances			Qualitatifs	
	C1 MJ	C2 Kg CO _{2,eq}	C3 CHF	C4.1 %	C4.2 %	C4.3 10 ⁻⁶	C5.1 -	C5.2 -
Seuil indifférence q _j	10	0.70	0.30	8	0.40	2.1	0.5	0.5
Seuil préférence stricte p _j	25	1.70	0.75	12	0.60	3.1	1.0	1.0
Seuil veto v _j	125	8.50	3.75	25	3.00	16.0	5.0	5.0

Pour les différents seuils, le programme vérifie également que $q_j \leq p_j < v_j$.

Résultats

Le résultat du calcul est le degré de non dominance $\mu^{ND}(a_i)$ qui permet de déterminer le rang des différentes variantes (méthode de Siskos-Huber). Un exemple est illustré dans le Tableau 8-8 pour différentes variantes a_i.

Tableau 8-8 : Exemple de résultat d'agrégation partielle selon Siskos-Huber (variantes a_i)

$\delta_{ki} - \delta_{ik}$	a1	a2	a3	a4	a5
a1		0.78	-0.10	0.74	0.01
a2	-0.78		-0.83	0.00	0.00
a3	0.10	0.83		0.94	0.18
a4	-0.74	0.00	-0.94		-0.81
a5	-0.01	0.00	-0.18	0.81	
Max $\delta_{ki} - \delta_{ik}$	0.10	0.83	-0.10	0.94	0.18
$\mu^{ND}(a_i)$	0.90	0.17	1.10	0.06	0.82
RANG	2	4	1	5	3

La distillation peut également être effectuée à l'aide du logiciel Electre III/IV. Dans la méthodologie proposée, nous recommandons de combiner le calcul systématique selon Syskos-Huber avec les résultats de la distillation pour certains cas critiques. L'utilisation d'une seconde méthode de classement (distillations) permet de vérifier les résultats et évaluer les éventuelles divergences de classement.

En plus du calcul du cas de base, il est commun de procéder à une analyse de sensibilité afin d'évaluer la robustesse de la solution. L'analyse de sensibilité est faite sur les différents seuils ainsi que sur la pondération. Elle peut parfois porter sur la matrice des performances. Selon les critères, le choix des seuils relève autant d'une appréciation subjective que d'une appréciation au sens de la physique. Il est parfois possible de déterminer ces seuils par calcul, par exemple en utilisant la distribution de résultats d'essais (écart-type). Malgré tout, le choix des seuils relève toujours d'une certaine part d'arbitraire ce qui nous incite à réaliser une analyse de sensibilité. Lors de l'analyse de robustesse, on part du principe que la solution trouvée est *la* bonne solution ; l'analyse de sensibilité ne sert qu'à en vérifier la robustesse. Une solution peu robuste n'est pas erronée, mais elle indique la sensibilité de la solution. Un exemple de calcul complet est fourni au chapitre 9.

Implémentation

Electre III est une méthode relativement fastidieuse et complexe et un calcul « à la main » n'est pas aisé. Le logiciel ELECTRE III/IV a été développé par le LAMSADE (Laboratoire d'analyse et de modélisation de systèmes pour l'aide à la décision) en 1994. Ce logiciel permet d'établir rapidement les différentes matrices ainsi que le classement des variantes selon les algorithmes de distillation. Il n'effectue pas de classement selon la méthode de Siskos-Huber.

Afin de proposer une méthode complète dans l'outil d'analyse multicritère, la méthode Electre III a été implémentée dans MS-Excel et validée au travers de différents exemples de la littérature (Maystre, Pictet et al. 1994) ainsi que par le calcul de cas à l'aide du logiciel du LAMSADE. Les différents calculs peuvent y être effectués de manière transparente ainsi que le classement des variantes selon la méthode de Siskos-Huber. La programmation Excel intègre les seuils de veto. Un calcul sans seuils de veto nécessite une modification du calcul de la matrice de discordance. On peut également « simuler » l'absence de seuil de veto en posant $v_j \rightarrow \infty$.

L'utilisation du logiciel Electre III/IV n'est donc pas nécessaire, sauf si l'on souhaite effectuer l'algorithme de distillation au lieu du classement selon Siskos-Huber.

8.6.5 Niveau 4 : Agrégation complète

La méthode d'agrégation complète choisie permet de classer les variantes en prenant en considération l'inconnue ainsi que l'incertitude sur les données. Ce quatrième niveau d'analyse est le plus complexe à mettre en place. Les détails théoriques de la méthode sont indiqués au chapitre 8.5.

Critères et pondération

Afin de pouvoir comparer les résultats fournis par les différents niveaux d'analyse, les critères utilisés sont les mêmes que pour l'agrégation partielle. La méthode de pondération est également identique à celle de l'agrégation partielle pour ce qui est des valeurs minimales, maximales et des valeurs par défaut (Figure 8-18). Le choix pour une pondération équilibrée ou personnalisée est également toujours possible. Si aucune pondération n'est insérée, le calcul s'effectue par défaut avec une pondération équilibrée.

Contrairement à l'agrégation partielle, l'agrégation complète peut être utilisée avec des critères qualitatifs ou quantitatifs ; la différence se situe au niveau des matrices de transformation utilisées pour la création de la matrice de décision. Pour les critères qualitatifs de « Complexité du processus de

fabrication » (C5.1) et du « Potentiel de recyclabilité » (C5.2), nous choisissons donc de conserver une échelle qualitative d'évaluation. Le Tableau 8-5 et le Tableau 8-6 sont donc conservés, mais avec une notation qualitative allant de A à G qui correspond à une échelle numérique (ou quantitative) variant de 6 à 0.

Notons que les notes quantitatives telles qu'appliquées pour l'agrégation partielle auraient pu être conservées. L'utilisation des échelles qualitatives permet d'illustrer la procédure de calcul, mais également d'intégrer une part d'inconnue sur les évaluations, ce qui n'est pas fait dans le cas d'évaluations quantitatives pour lesquelles la part d'inconnue est nulle.

Le Tableau 8-9 illustre un exemple de tableau de performances brutes utilisé dans un calcul par agrégation complète.

Tableau 8-9 : Agrégation complète - Exemple de tableau de performances brutes

					1	2	3	4	5		
Critère Niveau 1		Critère Niveau 2		Critère Niveau 3	Unités	Chaud	Tiède (cire)	Tiède (additif chimique)	Enrobé semi-tiède	Autre type d'enrobé	
C. quantitatifs	C1	Energie			MJ	627.16	711.91	602.13	599.58	575.28	
	C2	Emissions			kg CO ₂ ,eq	45.81	52.27	43.13	42.91	37.44	
	C3	Coûts			CHF	16.264	17.835	16.504	16.434	14.728	
	C4	Performance	C4.1	Sensibilité eau		%	90.0%	87.0%	96.0%	78.0%	83.0%
			C4.2	Déform. perm.		%	5.6%	5.0%	5.8%	6.7%	4.7%
			C4.3	Résist. fatigue		[10-6]	115	120	114	95	93
	C5	Qualitatifs	C5.1	Complexité	C5.1.1	Séquence	-	A	C	C	G
C5.1.2					Additif	-	A	C	C	C	C
C5.1.3					Eau	-	A	A	A	G	G
C5.2			Recyclabilité	C5.2.1	Additif	-	A	F	F	D	F
				C5.2.2	Vieillessement	-	E	C	C	A	A
				C5.2.3	Retraitement	-	A	A	A	A	A

Hypothèses

Les calculs d'agrégation complète sont effectués à-partir de la matrice générale de décision. Une fois la pondération établie, les hypothèses concernent les matrices de transformation nécessaires au calcul de la matrice de décision.

La méthode appliquée considère 5 degrés d'évaluation :

$$H_n = \{\text{Mauvais, Faible, Moyen, Bon, Excellent}\} \quad n=1, \dots, 5$$

Pour les critères qualitatifs, la matrice de transformation est fournie par le décideur. Nous proposons une matrice par défaut (Tableau 8-10), l'utilisateur pouvant également insérer ses propres préférences. Dans cette matrice, chaque note est rapportée à une probabilité sur les degrés d'évaluation. Par exemple, une note qualitative « A » signifie que la performance a 80% de chance d'être excellente et 10% de chance d'être bonne. Nous pouvons remarquer que la matrice de transformation est incomplète pour les différentes notes qualitatives ($\Sigma=0.9$). Ceci signifie que pour chaque note qualitative, nous supposons une inconnue de 10% sur l'évaluation. Les critères quantitatifs ne possèdent pas de part d'inconnue et c'est pourquoi l'évaluation qualitative est intéressante.

Tableau 8-10 : Matrice de transformation par défaut pour critère qualitatif

	A	B	C	D	E	F	G
Mauvais						0.10	0.80
Faible					0.70	0.80	0.10
Moyen			0.20	0.90	0.20		
Bon	0.10	0.80	0.70				
Excellent	0.80	0.10					

Dans le cas de critères quantitatifs, une matrice de transformation doit également être utilisée afin de calculer la matrice de décision. La matrice de transformation par défaut est présentée dans le Tableau 8-11. Pour chaque critère, les différents niveaux correspondant aux degrés d'évaluation H_n sont définis sur la base des valeurs maximales et minimales rencontrées habituellement lors de l'évaluation d'enrobés. Pour les performances, les degrés d'évaluation « moyen », « mauvais » et « excellent » sont issus des valeurs limites (expérience Lavoc) et des seuils d'acceptabilité utilisés pour le calcul des indices bruts (Partie 1 modèle).

Tableau 8-11 : Matrice de transformation par défaut pour critère quantitatif

	C1 Energie MJ	C2 Emissions kg CO _{2,eq}	C3 Coûts_E CHF	C4.1 Sensi. eau %	C4.2 Déf. perm. %	C4.3 Fatigue 10 ⁻⁶
Mauvais	750	60	19	70	10.0	70
Faible	695	50	17	78	8.5	80
Moyen	655	45	16	86	7.0	90
Bon	615	40	15	93	3.5	110
Excellent	560	30	13	100	0.0	130

Pour l'utilisation de la matrice de transformation des critères quantitatifs, il est nécessaire de vérifier que la performance brute se situe entre les valeurs minimale (degré d'évaluation « Mauvais ») et maximales (degré d'évaluation « Excellent »). Si tel n'est pas le cas, il faut alors adapter la matrice de transformation.

Comme expliqué, les matrices de transformation permettent de construire la matrice de décision. Si l'utilisateur le souhaite, il peut également compléter directement la matrice de décision sans recourir aux matrices de transformation. Ceci permet d'introduire une incertitude également sur les critères quantitatifs.

Le calcul de l'utilité requiert des hypothèses afin de corréliser une utilité à chaque degré d'évaluation. Le choix proposé par défaut est issu de (Yang et Xu 2002). Ces valeurs par défaut peuvent être modifiées par l'utilisateur (Tableau 8-12).

Tableau 8-12 : Utilité par défaut en fonction du degré d'évaluation

Degré d'évaluation	Mauvais	Faible	Moyen	Bon	Excellent
Utilité	0.00	0.35	0.55	0.85	1

Résultats

Les résultats de l'analyse par agrégation complète sont dans un premier temps la représentation des différents degrés de croyance (degré de crédibilité) associés à chaque degré d'évaluation, ceci pour chacune des variantes (Figure 8-11).

Le calcul de l'utilité permet ensuite de classer les variantes par rang. Un exemple est indiqué dans la Figure 8-19.

	Mauvais	Faible	Moyen	Bon	Excellent
Degré d'utilité	0.00	0.35	0.55	0.85	1.00

Utilité	Enrobé 1	Enrobé 2	Enrobé 3	Enrobé 4	Enrobé 5
u_{min}	0.6396	0.4164	0.6592	0.5392	0.7618
u_{max}	0.6467	0.4259	0.6686	0.5488	0.7713
u_{moy}	0.6432	0.4212	0.6639	0.5440	0.7666

intervalle u (\pm)	0.0035	0.0047	0.0047	0.0048	0.0047
RANG	3	5	2	4	1

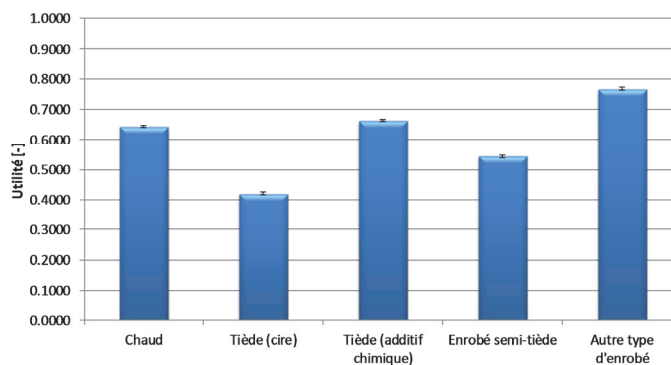


Figure 8-19 : Exemple de résultat d'agrégation complète – Calcul d'utilité

La robustesse de la solution trouvée peut ensuite être évaluée par analyse de sensibilité sur les paramètres suivants :

- Pondération.
- Matrices de transformation.
- Matrice de décision (éventuellement).
- Degrés d'utilité.

Implémentation

La méthodologie utilisée est complexe et l'utilisation d'outils informatiques est nécessaire. Cette complexité des calculs est d'ailleurs fréquemment citée comme désavantage de la méthode. Le logiciel IDS (Intelligent Decision System), développé par le Prof Yang, met en application cette approche selon la théorie de l'Evidence. Ce logiciel permet de considérer plus de 50 critères et il est largement utilisé dans les processus d'aide à la décision.

Afin de proposer les différents niveaux d'analyse dans un même outil et favoriser une procédure de calcul transparente, la méthodologie a été implémentée dans Excel. Pour cela, des fonctions VBA ont été écrites. Le détail du code est disponible dans l'Annexe E. L'algorithme mis en place a été validé en effectuant des calculs comparatifs avec quelques cas de la littérature (Yang 2001; Yang et Xu 2002).

8.7 Enseignements

La majorité des modèles permettant l'évaluation des enrobés bitumineux ne prennent en compte que les critères environnementaux, énergétiques et parfois économiques. Une hypothèse de performances équivalentes est sous-jacente à ces méthodes. De plus, l'outil d'aide à la décision entre les différentes variantes manque en raison notamment de la segmentation des compétences.

Après un survol des méthodes d'aides à la décision, ce chapitre détaille les méthodes d'analyse multicritère sélectionnées pour le développement du modèle. Une méthodologie complète répartie en quatre niveaux d'analyse et permettant d'effectuer un choix d'enrobé répondant aux différents critères

et à la sensibilité du décideur est décrite en détail. Sa mise en place est également effectuée à des fins de démonstration et pour disposer de premiers calculs.

Les représentations graphiques et analyses de bases effectuées au niveau 1 et au niveau 2 fournissent des premiers éléments de décision. Les phases critiques du cycle de vie peuvent y être identifiées, ainsi que les éventuels surclassements complets. L'utilisation d'une méthodologie en différents niveaux permet de faire évoluer la complexité de manière croissante et prendre en considération les préférences du décideur dès le troisième niveau ainsi que l'inconnue et l'incertitude sur les données dans le quatrième niveau. L'intérêt de la méthodologie proposée consiste à utiliser des méthodes issues du domaine de l'aide à la décision, méthodes pour lesquelles les applications dans le domaine du choix des enrobés bitumineux sont à notre connaissance inexistantes. En particulier, l'utilisation d'un algorithme récent basé sur la théorie de l'Evidence est intéressante car elle prend en compte de manière innovante l'incertitude et l'inconnue dans les données. Contrairement à la majorité des problèmes d'aide à la décision, différentes méthodes sont appliquées, ce qui peut rendre le problème plus long et complexe à traiter, mais permet de mieux tester la robustesse des solutions. Notons que les résultats peuvent parfois varier selon les données de base et hypothèses considérées au niveau 3 et au niveau 4.

La mise en place est effectuée afin d'illustrer la méthodologie. L'outil développé est transparent et souple, ce qui laisse à tout moment le choix à l'utilisateur d'utiliser ses propres données ou hypothèses. De futurs développements du modèle sont envisagés :

- Flexibilité dans le nombre de critères et de variantes (5 variantes dans la version actuelle du modèle).
- Programmation de l'algorithme de distillation ascendante et descendante et des variantes de calcul sans seuil de veto.
- Mise en place d'une procédure d'analyse de sensibilité par niveau afin de fournir un indice global de robustesse de la solution en fonction des différents résultats obtenus à chacun des niveaux.
- Prise en compte du coût commercial du produit, couplé avec le coût énergétique considéré dans la version actuelle.
- Création d'une base de données de calculs (cases studies).

9. APPLICATION DE LA METHODOLOGIE

Ce chapitre propose un exemple d'application de la méthodologie mise en place pour l'aide à la décision dans le choix de la technologie d'enrobé. La démarche suit les développements détaillés précédemment dans les chapitres 6, 7 et 8 que l'on pourra consulter pour davantage de détails sur la méthode.

Après avoir introduit le choix des procédés faisant l'objet du présent exemple d'application et les hypothèses de base, nous effectuons tout d'abord le calcul des indicateurs d'énergie, d'émission, de coût énergétique ainsi que la détermination des indices de performances. Ceci correspond à la première partie du modèle (chapitre 7). Dans la seconde partie du modèle (chapitre 8), nous réalisons les quatre différents niveaux d'analyse multicritère en détaillant les résultats obtenus pour chaque niveau. Une analyse de sensibilité permettant d'évaluer la robustesse de la solution est également proposée.

9.1 Choix des procédés et hypothèses de base

L'objectif de cet exemple de calcul est de choisir la technologie la plus performante au sens des différents critères, parmi les enrobés bitumineux évalués en laboratoire (chapitre 4 de la recherche) : REF, ET-C, ET-P et EST. A ces enrobés, nous choisissons d'ajouter le procédé semi-tiède étudié lors de la recherche (Raess et Pittet 2008) menée précédemment au Lavoc. Cet enrobé, que nous appellerons EBT, est intéressant pour la réalisation de l'exemple de calcul car il présente des gains énergétiques considérables, mais par contre des performances mécaniques qui peuvent être moins élevées que pour les autres mélanges analysés. Nous pouvons finalement résumer les quatre variantes ou actions a_i prises en considération :

- Enrobé de référence à chaud : REF

- Enrobé tiède avec cire : ET-C
- Enrobé tiède avec additif chimique : ET-P
- Enrobé tiède avec maîtrise de la teneur en eau : EST
- Enrobé semi-tiède avec maîtrise de la teneur en eau : EBT

Les différents enrobés analysés sont des mélanges pour couche de base AC T 22S. La granulométrie des mélanges REF, ET-C et ET-P est la même. Le mode de fabrication des enrobés est détaillé au chapitre 4.7.1 que l'on pourra consulter pour davantage de détails.

L'enrobé EBT est également du type AC T 22S, mais sa granulométrie est légèrement différente des autres enrobés évalués. Pour les calculs relatifs à la consommation d'énergie de l'enrobé EBT, nous considérons la méthode de fabrication détaillée dans (Raess et Pittet 2008). La séquence de fabrication de l'enrobé EBT est similaire à celle de l'enrobé EST, seul le conditionnement des composants est différent. Pour l'enrobé EBT, le bitume ainsi que les granulats de diamètre supérieur à 4 mm sont chauffés à 150 °C, respectivement 155 °C. Le filler est introduit sec et à température ambiante. La fraction de sable (D_{\max} de 0.063 mm à 4 mm) est introduite humide et à température ambiante ; la teneur en eau étant de 1.25% de masse d'eau par rapport à la masse totale des granulats. Ceci correspond à une humidité du sable de 3.71%. Lors de la fabrication de l'EBT, un additif appelé « O » est également ajouté à un dosage de 3% de la masse du liant. Il est utile de préciser que l'enrobé EBT évalué lors de cette recherche a fait l'objet de différents développements et améliorations depuis la réalisation de l'étude. Le cas proposé ici doit donc être perçu comme un exemple de calcul, les conclusions ne pouvant être généralisées.

Nous pouvons encore relever les hypothèses de base et postulats suivants relatifs aux calculs réalisés par la suite :

- L'unité fonctionnelle est la fabrication d'une tonne d'enrobé bitumineux.
- Comme expliqué précédemment dans la recherche, les coûts considérés sont les coûts énergétiques. Par conséquent, le prix d'achat des additifs à la centrale n'est pas considéré, le coût énergétique pour la fabrication des additifs étant pris en compte.
- Pour le calcul de l'énergie de pose et compactage, nous supposons une couche d'enrobé dont l'épaisseur est de 6 cm.
- L'inventaire du cycle de vie est réalisé dans le but de correspondre à une étude dans le contexte suisse. Pour cela, des données locales ou représentatives du développement technologique suisse seront utilisées dans la mesure du possible.
- L'arbre des processus unitaires est issu des développements effectués au chapitre 7.7. Il est repris de manière synthétique dans la Figure 9-1. Nous pouvons y distinguer 7 différentes phases, chacune étant mise en évidence par un cadre rouge (les phases 6 et 7 sont regroupées).

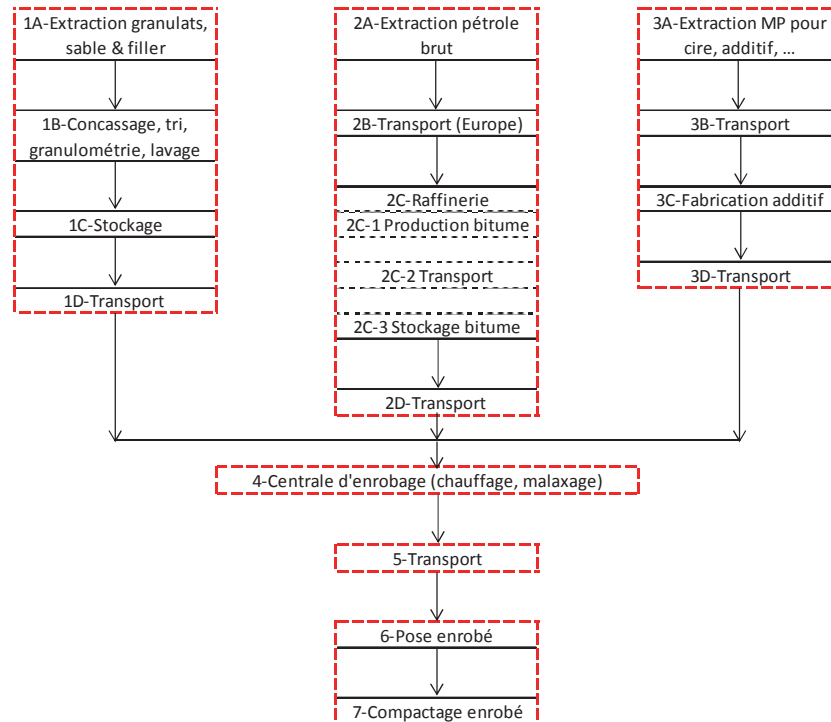


Figure 9-1 : Arbre des processus unitaires pour l'inventaire du cycle de vie

- Les hypothèses relatives aux distances et moyens de transport sont indiquées dans le Tableau 9-1. Par rapport à l'arbre des processus unitaires, nous pouvons relever que le transport du pétrole entre la zone d'extraction et la raffinerie (processus unitaire 2B) n'est pas indiqué, ceci car nous utilisons des données agrégées allant de l'extraction du pétrole au bitume prêt à être livré en centrale d'enrobage. De même, nous utilisons des données agrégées pour la fabrication de l'additif. Le transport entre la zone d'extraction des matières premières et l'usine à additif n'est donc pas renseigné (3B).

Tableau 9-1 : Hypothèses de base pour les distances et moyens de transport

N° PU	Processus unitaire	Moyen de transport	Distance
1D	Transport des granulats : carrière → centrale d'enrobage	Camion 20-28 t	100 km
2D	Transport du pétrole : raffinerie → centrale d'enrobage	Camion longue distance	300 km
3D	Transport de l'additif : usine → centrale d'enrobage	Camion longue distance	300 km
5	Transport de l'enrobé : centrale d'enrobage → chantier	Camion 20-28 t	40 km

Des récapitulatifs des différents résultats sont disponibles en Annexe F. Pour l'établissement des indicateurs (partie 1 du modèle), les détails de l'enrobé de référence sont indiqués. Pour l'analyse multicritère (partie 2 du modèle), les principaux résultats aux différents niveaux d'analyse sont reportés ainsi que certaines données concernant l'analyse de robustesse des solutions.

9.2 Partie 1 : Etablissement des indicateurs

Les éléments nécessaires à la bonne compréhension ainsi que les hypothèses et postulats pour l'établissement des indicateurs d'énergie, d'émission, de coût énergétique et de performances mécaniques sont donnés. Pour davantage de détails, on pourra consulter le chapitre 7 relatif à l'inventaire du cycle de vie et à la première partie du modèle.

9.2.1 Inventaire du cycle de vie

L'inventaire du cycle de vie est réalisé afin de déterminer les indicateurs d'énergie, d'émission et de coût énergétique. Des informations complémentaires pour chaque processus unitaire de la Figure 9-1 sont fournies.

Matière première : Granulats (1A à 1D)

Pour les granulats, nous choisissons d'utiliser les données mesurées dans une carrière située à l'entrée du Valais (Choëx-Massongex) et pour laquelle la valeur moyenne des années 2009 et 2010 est considérée. Notons que ces informations sont disponibles dans le modèle. Les données sont proches de celles utilisées par (Abdo, Agnesina et al. 2005). L'ordre de grandeur est également comparable aux données proposées par (Stripple 2000; Stripple 2001) qui est une source largement reconnue pour les études relatives aux chaussées routières.

Dans les calculs, nous postulons que le stockage des matériaux à la carrière (ou gravière) ne consomme pas d'énergie.

Le transport des granulats jusqu'à la centrale d'enrobage est effectué avec un camion 20-28 t pour lequel la base de données du modèle possède des informations pour le contexte suisse.

Matière première : Bitume (2A à 2D)

Des données relatives à chacun des sous-processus allant de l'extraction du pétrole brut au transport du bitume à la centrale d'enrobage sont difficiles à obtenir. Pour cela, nous utilisons une valeur européenne agrégée pour un bitume 50/70 qui est le même bitume que celui utilisé dans notre recherche. Les informations sont disponibles dans la base de données du modèle. Ces informations provenant de (Blomberg, Boussad et al. 1999) sont largement reconnues et fréquemment utilisées pour les ICV réalisées dans un contexte européen.

Notons que l'utilisation de données désagrégées (également disponibles dans la base de données) abouti au même ordre de grandeur pour ce qui est de la consommation énergétique, des émissions et des coûts énergétiques relatifs au bitume.

Matière première : Additifs (3A à 3D)

Des additifs sont nécessaires pour les enrobés ET-C (cire synthétique Fischer-Tropsch), ET-P (agent tensio-actif), EST (fluxant) et EBT (additif « O »). Ne disposant pas de données spécifiques concernant l'énergie, les émissions et le coût énergétique des additifs utilisés pour les enrobés EST et EBT, nous faisons l'hypothèse de valeurs identiques à celles d'un agent tensio-actif. La base de données du modèle d'inventaire du cycle de vie est utilisée, car elle intègre les informations requises.

Centrale d'enrobage (4)

Comme discuté précédemment, la centrale d'enrobage est un processus unitaire déterminant du cycle de vie d'un enrobé. Pour les enrobés considérés ici, nous ne disposons pas de données d'énergie et d'émissions mesurées, et encore moins sur une même centrale ce qui serait idéal pour comparer les enrobés. Afin d'utiliser des données représentatives de la différence entre les procédés, nous choisissons d'effectuer un calcul théorique. Les bases de la méthode de calcul ainsi que les hypothèses relatives ont été détaillées au chapitre 6 de cette recherche que l'on pourra consulter pour davantage d'informations. Pour rappel, nous supposons un rendement théorique de 65%, établi sur la base d'une comparaison entre le calcul théorique et une enquête réalisée sur différentes centrales suisses ainsi que la prise en compte de données issues de la littérature.

Le type d'énergie utilisée en centrale d'enrobage a une incidence prépondérante sur les émissions. Nous supposons pour le calcul théorique une centrale utilisant comme énergie de l'électricité (10%) et du fioul (90%) ; le processus de combustion étant optimisé. Le Tableau 9-2 récapitule les résultats de calcul théorique en centrale d'enrobage. Dans ce tableau, les données de base de chauffage des composants et du malaxeur sont indiquées (rendement supposé de 100%) avant de calculer le total pondéré par le rendement de 65%. Ces valeurs seront utilisées dans la suite de l'inventaire du cycle de vie.

Tableau 9-2 : Calculs théoriques en centrale d'enrobage pour ICV

	REF	ET-C	ET-P	EST	EBT
Energie chauffage des composants [MJ]/t _{enr}	182.17	161.31	160.96	163.30	103.73
Energie chauffage du malaxeur [MJ]/t _{enr}	20.18	16.47	16.47	12.48	11.88
Total énergie (rdt=65%) [MJ]/t _{enr}	311.30	273.52	272.98	270.43	177.87
Emissions chauffage des composants [kgCO _{2,eq}]/t _{enr}	15.14	13.41	13.38	13.57	8.62
Emissions chauffage du malaxeur [kgCO _{2,eq}]/t _{enr}	1.68	1.37	1.37	1.04	0.99
Total émissions (rdt=65%) [kgCO _{2,eq}]/t _{enr}	25.87	22.73	22.69	22.47	14.78
Coûts éner. chauffage composants [CHF/t]	4.39	3.89	3.88	3.93	2.50
Coûts éner. chauffage malaxeur [CHF/t]	0.49	0.40	0.40	0.30	0.29
Total coûts énergétiques (rdt=65%) [CHF/t]	7.51	6.60	6.58	6.51	4.29

Nous pouvons rappeler que selon le type d'énergie utilisée à la centrale d'enrobage, deux variantes peuvent présenter une même consommation énergétique, mais des émissions et coûts énergétiques différents.

Transport de l'enrobé entre la centrale d'enrobage et le chantier (5)

Le transport de l'enrobé entre la centrale d'enrobage et le chantier est effectué avec un camion 20-28 t pour lequel la base de données contient les informations requises.

Pose et compactage de l'enrobé (6 et 7)

Nous postulons que la pose et le compactage sont effectués avec des machines de chantier Dynapac pour lesquelles la base de données contient les informations nécessaires. Pour les différents enrobés réalisés, nous supposons une énergie de compactage semblable, ce qui est réaliste dans la mesure où les enrobés sont fabriqués et compactés dans le domaine de température optimal et que le travail in-situ est réalisé dans les règles de l'art.

Résultats de l'inventaire du cycle de vie

Nous obtenons finalement les résultats ci-dessous pour l'inventaire du cycle de vie (Partie 1 du modèle) des différents enrobés, davantage de détails pouvant être trouvés dans l'Annexe F qui détaille le calcul pour l'enrobé de référence.

Processus unitaire (PU)	Energie [MJ]	Emissions [kg CO _{2,eq}]	Coûts éner. [CHF]	Processus unitaire (PU)	Energie [MJ]	Emissions [kg CO _{2,eq}]	Coûts éner. [CHF]
1 - Matière première: Granulats	97.20	7.10	3.150	1 - Matière première: Granulats	97.08	7.10	3.146
2 - Matière première: Bitume	196.01	11.21	5.128	2 - Matière première: Bitume	195.76	11.19	5.121
3 - Matière première: Additifs	0.00	0.00	0.000	3 - Matière première: Additifs	92.17	7.21	1.873
4 - Centrale d'enrobage	311.30	25.87	7.510	4 - Centrale d'enrobage	273.52	22.73	6.600
5 - Transport centrale - chantier	19.18	1.36	0.390	5 - Transport centrale - chantier	19.18	1.36	0.390
6 & 7 - Pose et compactage	3.47	0.27	0.086	6 & 7 - Pose et compactage	3.47	0.27	0.086
Total	627.16	45.81	16.263	Total	681.18	49.86	17.216

Figure 9-2 : Résultats de l'inventaire du cycle de vie (gauche : REF, droite : ET-C)

Processus unitaire (PU)	Energie [MJ]	Emissions [kg CO ₂ ,eq]	Coûts éner. [CHF]	Processus unitaire (PU)	Energie [MJ]	Emissions [kg CO ₂ ,eq]	Coûts éner. [CHF]
1 - Matière première: Granulats	97.18	7.10	3.149	1 - Matière première: Granulats	97.18	7.10	3.149
2 - Matière première: Bitume	195.98	11.20	5.127	2 - Matière première: Bitume	195.98	11.20	5.127
3 - Matière première: Additifs	13.34	0.51	0.271	3 - Matière première: Additifs	13.34	0.51	0.271
4 - Centrale d'enrobage	272.98	22.69	6.580	4 - Centrale d'enrobage	270.43	22.47	6.510
5 - Transport centrale - chantier	19.18	1.36	0.390	5 - Transport centrale - chantier	19.18	1.36	0.390
6 & 7 - Pose et compactage	3.47	0.27	0.086	6 & 7 - Pose et compactage	3.47	0.27	0.086
Total	602.13	43.13	15.603	Total	599.58	42.91	15.533

Figure 9-3 : Résultats de l'inventaire du cycle de vie (gauche : ET-P, droite : EST)

Processus unitaire (PU)	Energie [MJ]	Emissions [kg CO ₂ ,eq]	Coûts éner. [CHF]
1 - Matière première: Granulats	99.20	7.08	3.308
2 - Matière première: Bitume	182.96	10.46	4.786
3 - Matière première: Additifs	93.40	3.55	1.898
4 - Centrale d'enrobage	177.87	14.78	4.290
5 - Transport centrale - chantier	19.18	1.36	0.390
6 & 7 - Pose et compactage	3.47	0.27	0.086
Total	576.07	37.50	14.758

Figure 9-4 : Résultats de l'inventaire du cycle de vie (EBT)

L'ordre de grandeur des résultats de l'inventaire du cycle de vie est vérifié par une comparaison avec d'autres études également décrites au chapitre 7.3. Nous pouvons relever :

- (Cholava 2009) évalue la consommation énergétique pour la construction d'une autoroute entre 660 MJ/t et 700 MJ/t. Cette consommation d'énergie se situe entre 645 MJ/t et 690 MJ/t dans le cas de la construction d'une route secondaire. L'ordre de grandeur des calculs réalisés ici (entre 580 MJ/t et 680 MJ/t) est comparable compte tenu des différences au niveau de la méthode de calcul, des bases de données (centrales d'enrobage en particulier) et des hypothèses.
- La recherche (Stripple 2000) permet de calculer une consommation énergétique d'environ 635 MJ/t pour l'ICV de la phase de construction de la chaussée. Ce résultat est très proche de la valeur proposée pour l'enrobé de référence dans le cadre de notre recherche (627 MJ/t).
- La recherche menée par (Bilal et Chappat 2003) indique une consommation énergétique de 680 MJ/t pour le béton bitumineux, les émissions étant de 54 kg_{GES}/t. Pour un enrobé tiède, le même auteur calcule une consommation énergétique de 654 MJ/t et des émissions de 53 kg_{GES}/t. Là aussi, compte tenu des hypothèses de base parfois différentes (distances de transport), des bases de données propres à chaque étude ainsi que des méthodes de calculs, nous pouvons déduire que l'ordre de grandeur des deux analyses est comparable.

Les calculs réalisés semblent donc réalistes. La comparaison avec des résultats obtenus avec des calculateurs de gaz à effet de serre est plus difficile, ces outils proposant souvent des résultats agrégés sans nécessairement fournir de détails. Un bref calcul avec CHANGER® fournit cependant une gamme de résultats comparables permettant de valider notre méthode.

9.2.2 Indices de performance

La méthode d'établissement des indices de performances est détaillée au chapitre 7.8. Afin de prendre en considération des performances stabilisées des différents enrobés, les résultats d'essais réalisés après deux semaines sont utilisés.

Pour les enrobés REF, ET-C, ET-P et EST, les données sont issues de l'analyse performantielle en laboratoire (chapitre 4).

Pour l'enrobé EBT, les performances indiquées sont issues de la recherche de (Raess et Pittet 2008). Des données relatives à la performance de l'enrobé en fatigue n'étant pas disponibles, une hypothèse de comportement moyen a été réalisée sur la base de l'expérience acquise en laboratoire.

Le Tableau 9-3 récapitule les indices bruts et normalisés utilisés par la suite dans l'analyse multicritère.

Tableau 9-3 : Indices de performance brut et normalisé des enrobés

	REF	ET-C	ET-P	EST	EBT
Sensibilité à l'eau (ratio ITRS)					
Indice brut	90%	87%	96%	78%	83%
Indice normalisé	3.6	3.1	4.4	1.0	2.0
Résistance aux déformations permanentes (ornièrre 30'000 cycles)					
Indice brut	5.6%	5.0%	5.8%	6.7%	4.7%
Indice normalisé	3.4	3.6	3.3	3.1	3.7
Résistance à la fatigue (ϵ_6)					
Indice brut	$120 \cdot 10^{-6}$	$117 \cdot 10^{-6}$	$113 \cdot 10^{-6}$	$108 \cdot 10^{-6}$	$90 \cdot 10^{-6}$
Indice normalisé	4.5	4.4	4.2	3.9	3.0

9.3 Partie 2 : Analyse multicritère

Une fois les différents indicateurs établis et importés dans la seconde partie du modèle, l'analyse multicritère peut être réalisée afin de choisir le type d'enrobé globalement le plus performant.

9.3.1 Niveau 1 : Analyse Pareto

Le premier niveau d'analyse consiste à étudier séparément les différentes variantes (enrobés) afin d'en identifier les processus unitaires (PU) dominants sur le cycle de vie de chaque enrobé. Les paramètres d'énergie, d'émission et de coût énergétique sont considérés et une représentation de Pareto est effectuée en distinguant les différents processus unitaires du cycle de vie (Figure 9-1). Dans les autres niveaux d'analyse, les données agrégées sur l'ensemble du cycle de vie sont considérées (somme des PU).

Un exemple de résultat pour la consommation énergétique de l'enrobé de référence est proposé dans la Figure 9-5. Le détail des résultats pour chaque enrobé et paramètre (énergie, émissions, coûts énergétique) est disponible en annexe.

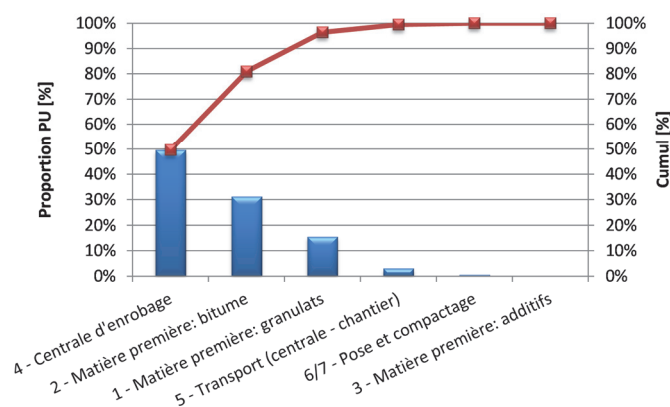


Figure 9-5 : Identification des processus unitaires dominants pour la consommation énergétique de l'enrobé REF

Les processus unitaires dominants au niveau de la consommation énergétique de chaque enrobé sont répertoriés dans le Tableau 9-4. Ce tableau indique le classement ainsi que la proportion relative des quatre processus unitaires consommant le plus d'énergie par rapport au total calculé sur le cycle de vie. La prise en compte des quatre principaux processus de consommation énergétique est suffisante, le reste de l'énergie représente en effet moins de 3% du total. Nous pouvons relever les éléments suivants :

- Les hypothèses de base au niveau du type d'enrobé, de la granulométrie, de la teneur en liant ainsi que des moyens et distances de transport sont comparables pour les différents enrobés. Les différences se situent donc essentiellement au niveau du processus de la centrale d'enrobage et des éventuels additifs utilisés.
- La centrale d'enrobage est le processus unitaire consommant le plus d'énergie pour les enrobés REF, ET-C, ET-P et EST. La consommation d'énergie de ce PU représente entre 40% (ET-C) et 50% (REF) du total. La production du bitume (de l'extraction de la matière première jusqu'au bitume livré à la centrale) est également une phase consommant une grande quantité d'énergie (29% à 33% du total). Ces deux phases consomment à elles seules entre 69% (ET-C) et 81% (REF) du total de l'énergie consommée au cours du cycle de vie des enrobés.
- Dans le cas de l'enrobé EBT, le processus unitaire requérant la plus grande quantité d'énergie est le bitume (32%), suivi de très près par la fabrication de l'enrobé à la centrale (31% du total de l'énergie).
- Les enrobés REF, ET-P et EST possèdent le même classement au niveau des processus unitaires dominants, l'ordre de grandeur de la contribution des différents processus unitaires est également comparable.
- Dans le cas de l'enrobé ET-C, une quantité non négligeable d'énergie est consommée pour l'élaboration de la cire (14%). Ceci est lié à la quantité de cire nécessaire (3% de la masse du bitume). Les additifs utilisés pour les enrobés EST et ET-P ayant un dosage sensiblement plus faible (0.4% de la masse du bitume), leur consommation énergétique relative à l'élaboration des additifs est faible (2% du total).
- Pour les mêmes raisons, l'additif utilisé pour l'enrobé EBT, dosé à 3% de la masse du bitume, requiert une importante quantité d'énergie (16% du total).

Tableau 9-4 : Analyse Pareto niveau 1 – Processus unitaires dominants (énergie)

	REF	ET-C	ET-P	EST	EBT
1 - Matière première : granulats	3 (15%)	3 (14%)	3 (16%)	3 (16%)	3 (17%)
2 - Matière première : bitume	2 (31%)	2 (29%)	2 (33%)	2 (33%)	1 (32%)
3 - Matière première : additifs		3 (14%)			4 (16%)
4 – Centrale d'enrobage	1 (50%)	1 (40%)	1 (45%)	1 (45%)	2 (31%)
5 – Transport (centrale-chantier)	4 (3%)		4 (3%)	4 (3%)	
6/7 – Pose et compactage					

Une analyse semblable peut être menée pour les émissions et les coûts énergétiques. L'analyse selon les coûts énergétiques conduit aux mêmes conclusions et classements des processus unitaires. L'analyse des processus unitaires dominants au regard des émissions est légèrement différente pour l'enrobé EBT. Le processus unitaire conduisant à la majorité des émissions est la centrale d'enrobage (39% du total des émissions), puis la fabrication du bitume (28%). Cette analyse des émissions est à considérer avec précaution. Comme discuté dans le chapitre 6 notamment, les émissions sont largement dépendantes des agents énergétiques utilisés et de la calibration du brûleur dans le cas de la centrale

d'enrobage. Ainsi, une centrale consommant moins d'énergie peut émettre davantage d'émissions de GES qu'une autre centrale consommant plus d'énergie. Pour les calculs théoriques, nous avons supposé une centrale identique pour l'ensemble des enrobés (10% électricité, 90% fioul).

Dans ce premier niveau d'analyse, les performances sont évaluées pour chaque enrobé séparément par l'intermédiaire des indices normalisés. Un exemple de résultat est présenté dans la Figure 9-6 pour les enrobés ET-P et EBT.

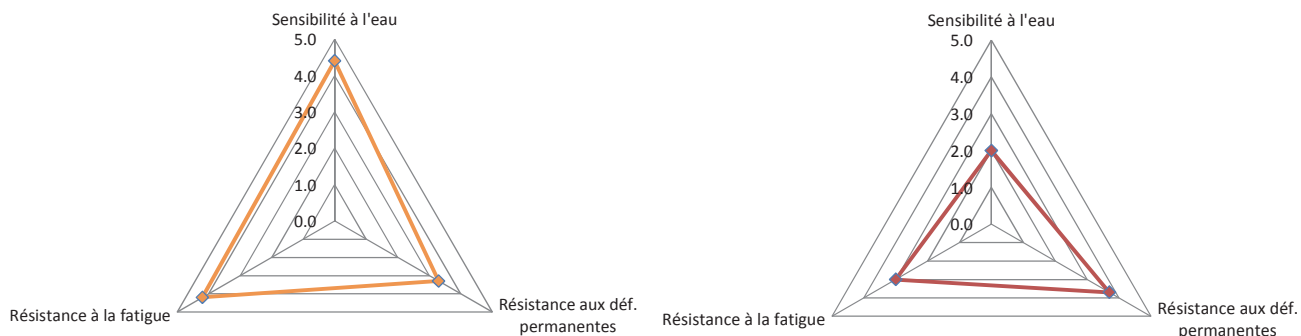


Figure 9-6 : Indices de performance normalisés pour les enrobés ET-P (gauche) et EBT (droite)

9.3.2 Niveau 2 : Analyse graphique

Le second niveau consiste en une analyse graphique des différents enrobés afin d'identifier les éventuels surclassements complets de variantes.

Une première analyse est réalisée pour chaque critère individuellement. Les critères sont l'énergie, les émissions, le coût énergétique et les performances (sensibilité à l'eau, résistance aux déformations permanentes, résistance à la fatigue). Le modèle mis en place propose des analyses dynamiques selon les choix de l'utilisateur pour les critères à comparer (voir annexe et partie 2 du modèle). La Figure 9-7 propose un exemple de comparatif des indices normalisés de performances des différents enrobés. Aucune relation de surclassement complet ne peut être mise en évidence. L'enrobé ET-P est le plus performant pour ce qui est de la sensibilité à l'eau, l'enrobé EBT obtient le meilleur résultat vis-à-vis de la résistance aux déformations permanentes, alors que l'enrobé de référence présente le meilleur comportement à la fatigue.

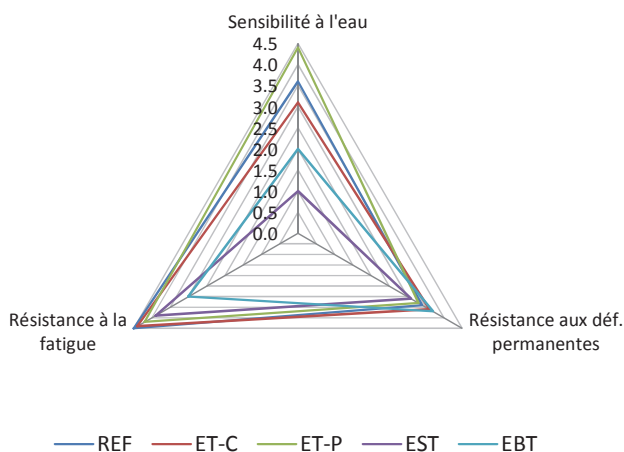


Figure 9-7 : Comparatif des indices normalisés de performance des enrobés

Les performances des différents enrobés peuvent ensuite être mises en relation avec les autres critères de consommation énergétique, émissions et coût énergétique. La Figure 9-8 propose un comparatif

selon un diagramme radar. L'établissement de ce diagramme est réalisé en utilisant les facteurs de normalisation par défaut. La note de performance correspond à l'ensemble des performances (indices bruts) tel que détaillé au chapitre 8.

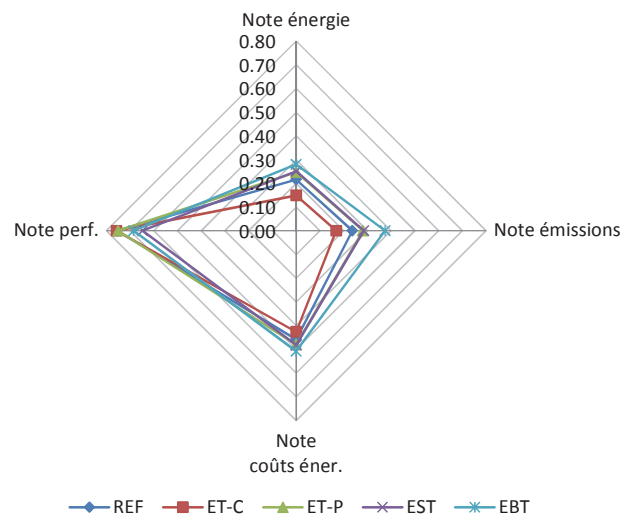


Figure 9-8 : Comparaison des enrobés (énergie - émissions - coûts énergétique - performances)

Les résultats et différentes représentations graphiques mises en place dans le second niveau du modèle ne permettent pas d'identifier une variante surclassant de manière indiscutable toutes les autres variantes, ceci pour l'ensemble des critères. Sur cette base, il est donc difficile de sélectionner le type d'enrobé le plus performant. L'analyse graphique par des diagrammes radar notamment présente l'avantage d'être très intuitive et aisée à mettre en place. On peut cependant rappeler les particularités suivantes qui sont illustrées lors de ce calcul :

- Lorsqu'une variante est meilleure qu'une autre variante pour un critère donné, l'ampleur de ce surclassement ne peut être clairement déterminée.
- L'interprétation doit être faite avec précaution. Dans le cas de la Figure 9-8, la représentation donne l'impression que les performances sont de manière générale excellentes alors que l'énergie, les émissions et les coûts sont très peu performants pour l'ensemble des enrobés. Cet effet visuel est lié aux facteurs de normalisation utilisés pour la représentation. Le choix des facteurs de normalisation ne modifie pas le résultat mais influence la perception.

Les représentations graphiques et l'analyse Pareto ne suffisant pas, une analyse plus approfondie est nécessaire afin de sélectionner l'enrobé le plus adapté. Ceci permet également de considérer davantage de critères.

9.3.3 Niveau 3 : Agrégation partielle

Dans le niveau 3 (agrégation partielle) et le niveau 4 (agrégation complète) qui suivra, nous considérons dans un premier temps la pondération établie par défaut. Les seuils par défaut sont également utilisés. L'établissement de ces différentes données ainsi que l'ensemble des détails relatifs à la méthode d'agrégation partielle peuvent être consultés au chapitre 8. L'objectif des valeurs par défaut insérées dans le modèle consiste à proposer des données réalistes et représentatives afin de procéder à une première évaluation. Ces différents seuils seront ensuite variés lors de l'analyse de sensibilité.

Les hypothèses de base pour le calcul de l'agrégation partielle concernent les éléments suivants :

- Pondération (valeurs par défaut indiquées dans Figure 8-18)

- Seuil d'indifférence q_j (valeurs par défaut indiquées dans Tableau 8-7)
- Seuil de préférence stricte p_j (valeurs par défaut indiquées dans Tableau 8-7)
- Seuil de veto v_j (valeurs par défaut indiquées dans Tableau 8-7)

Critères qualitatifs

Deux critères qualitatifs sont considérés. L'évaluation de chaque enrobé par rapport au critère de « complexité du processus de fabrication » et au critère de « potentiel de recyclabilité » est indiquée dans le Tableau 9-5 et respectivement le Tableau 9-6. L'échelle d'évaluation est décrite dans le Tableau 8-5 et le Tableau 8-6.

Tableau 9-5 : Notes des différents enrobés pour le critère qualitatif C5.1 « Complexité du processus de fabrication » (agrégation partielle)

	REF	ET-C	ET-P	EST	EBT
Processus de fabrication en centrale	6.0	4.0	4.0	0.0	0.0
Mode d'insertion des additifs	6.0	4.0	4.0	4.0	4.0
Ajout/maîtrise de la teneur en eau	6.0	6.0	6.0	0.0	0.0

Tableau 9-6 : Notes des différents enrobés pour le critère qualitatif C5.2 « Potentiel de recyclabilité » (agrégation partielle)

	REF	ET-C	ET-P	EST	EBT
Additifs utilisés	6.0	1.0	1.0	3.0	1.0
Vieillessement du liant à la fabrication	2.0	4.0	4.0	6.0	6.0
Cycles de retraitement subis	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0

Résultat

Le calcul du cas de base fournit le classement des variantes indiqué dans le Tableau 9-7.

Tableau 9-7 : Agrégation partielle - Classement des variantes selon la méthode de Siskos-Huber (cas de base)

Enrobé	REF	ET-C	ET-P	EST	EBT
Rang selon Siskos-Huber	3	4	1	4	2

Selon cette méthode de classement, la variante ET-P est préférée, la variante EBT étant en seconde position. Les enrobés ET-C et EST sont les variantes les moins performantes. On notera que de manière générale, seule « la meilleure » variante intéressera le décideur.

Afin de valider la méthode de calcul et fournir un type de classement complémentaire, le cas de base est également modélisé dans le logiciel Electre III/IV, version 3.1b développé par le LAMSADE. La matrice de concordance globale et la matrice des degrés de crédibilité du surclassement modélisées sont similaires au calcul effectué dans l'implémentation MS-Excel, les très faibles différences étant liées au nombre de décimales acceptées par le logiciel lors de l'insertion des données. La Figure 9-9 illustre le résultat des distillations ascendantes et descendantes calculées avec le logiciel, ainsi que le préordre partiel final. Les variantes y sont codées ainsi : REF=A0001, ET-C=A0002, ET-P=A0003, EST=A0004, EBT=A0005.

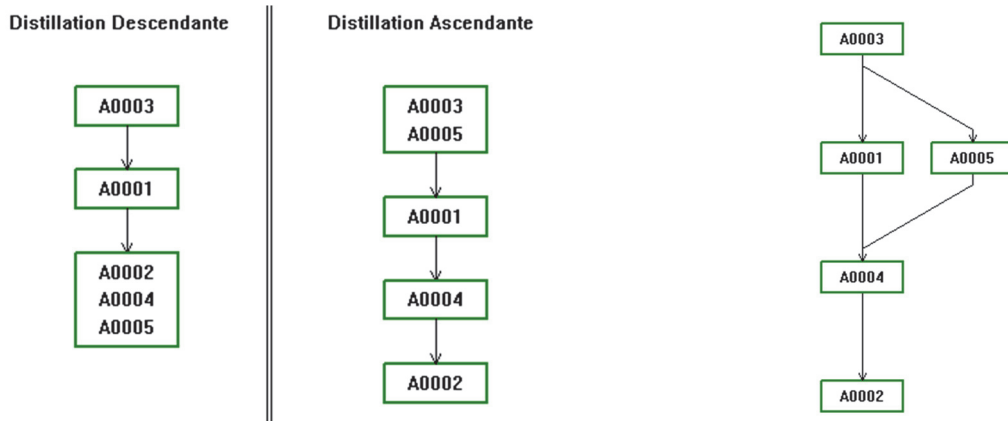


Figure 9-9 : Agrégation partielle - Résultats des distillations (gauche) et préordre partiel final (droite) pour le cas de base

L'analyse du préordre partiel final indique que la variante ET-P est la préférée, tout comme pour le classement selon Siskos-Huber. Les variantes REF et EBT sont jugées incomparables, les variantes EST et ET-C étant en queue de classement. L'ordre des variantes selon l'algorithme de distillation ou le classement selon Siskos-Huber est donc très proche ; la variante préférée est la même dans les deux cas. Dans la suite, nous allons essentiellement utiliser la méthode de classement selon Siskos-Huber qui a été implémentée dans le modèle.

Analyse de robustesse

La solution de base est considérée comme *la* solution. La robustesse de cette solution est évaluée en effectuant une analyse de sensibilité sur différents paramètres. Nous postulons lors de l'analyse de sensibilité que un seul paramètre est varié à la fois, les autres paramètres conservant les valeurs par défaut utilisées pour la solution de base.

En considérant la matrice de performances brutes comme fixe (i.e. l'évaluation des différentes performances est certaine), l'analyse de sensibilité peut concerner la pondération ainsi que les différents seuils (indifférence, préférence stricte, veto). Le nombre de cas à calculer lors d'une analyse de sensibilité complète sur l'ensemble des facteurs est exponentiel et la réalisation peut rapidement s'avérer lourde. Afin de ne pas multiplier inutilement les analyses, il est généralement choisi de se concentrer sur les paramètres susceptibles d'influencer le plus fortement les résultats.

L'analyse de sensibilité est focalisée dans un premier temps sur la pondération des critères de niveau 1 (C.X) pour lesquels l'importance relative est la plus élevée dans la pondération par défaut utilisée pour le cas de base. Cela concerne les coûts énergétiques (C3), les performances (C4) ainsi que les critères qualitatifs (C5). Les différentes pondérations sont variées entre la borne minimale et maximale admissible (voir Figure 8-18). Le total des différentes pondérations doit toujours être égal à 100%. Deux options sont envisageables pour la variation de pondération et le calcul des poids ajustés :

- Le poids du critère ω_i est varié, la différence par rapport à 100% est alors répartie de manière équivalente sur l'ensemble des autres critères, ceci indépendamment de leur niveau initial de pondération.
- Nous préférons la seconde méthode expliquée ci-après. On admet que le seul poids qui varie est celui pour lequel l'analyse de sensibilité est réalisée. Afin de rester dans un système où la somme des pondérations des critères est toujours égale à 100%, le poids final $\omega_{i,f}$ du critère i pour lequel l'analyse de sensibilité est effectuée, ainsi que le poids final $\omega_{j,f}$ des autres critères j seront calculés ainsi :

$$\omega_{i,f} = \frac{\omega_{i,nouv}}{1 - \omega_{i,ini} + \omega_{i,nouv}}$$

$$\omega_{j,f} = \frac{\omega_{j,ini}}{1 - \omega_{i,ini} + \omega_{i,nouv}}, j \neq i$$

$\omega_{i,nouv}$	Nouvelle pondération du critère ω_i pour lequel l'analyse de sensibilité est réalisée
$\omega_{i,ini}$	Pondération initiale du critère ω_i pour lequel l'analyse de sensibilité est réalisée
$\omega_{j,ini}$	Pondération initiale du critère ω_j

Les résultats de l'analyse de sensibilité sur la pondération sont indiqués dans le Tableau 9-8 pour le critère de coût énergétique, le Tableau 9-9 pour le critère relatif aux performances mécaniques et dans le Tableau 9-10 pour les critères qualitatifs. Dans ces tableaux, le cas de base (pondération par défaut) est indiqué. Puis, pour les différentes variations de pondérations du critère concerné, les poids sont calculés de manière à ce que la somme des pondérations soit toujours égale à 100%. L'incrément dans la variation de pondération est de 5%. Pour chaque cas (i.e. nouvelle pondération), le classement des différentes variantes est indiqué dans la partie inférieure du tableau. Nous pouvons relever :

- De manière générale et pour les trois analyses de sensibilité, la variante préférée (ET-P) n'est pas influencée par les modifications de pondération. Ceci illustre la robustesse de la solution.
- En deuxième et troisième position du classement, les variantes REF et EBT sont proches. La différence de classement entre ces deux variantes dépend de la pondération. Par exemple, lorsque le poids du critère de coût énergétique (C3) est bas (20%), la variante REF sera préférée car elle possède un coût plus élevé que la variante EBT. La variante EBT est par contre préférée lorsque la pondération du critère de coût augmente (dès 25%).
- En fin de classement, les variantes EST et ET-C sont également proches, la préférence entre ces deux variantes dépendant de la pondération. Par exemple, lorsque la pondération relative aux critères de performances est élevée (dès 30%), alors la variante ET-C est préférée à la variante EST, ceci car l'enrobé ET-C présente globalement de meilleures performances mécaniques.
- Les tendances obtenues sont donc identiques à celles mises en évidence avec la solution de base et par le calcul des distillations.

Tableau 9-8 : Agrégation partielle - Analyse de sensibilité de la pondération du critère de coût énergétique (C3)

			Choix de pondération du critère de coût énergétique (C3)						
			30%	25%	20%	40%	45%	50%	
Poids des critères	Energie (C1)	ω_1	12.5%	13.2%	13.9%	14.7%	11.9%	11.4%	10.9%
	Emissions (C2)	ω_2	12.5%	13.2%	13.9%	14.7%	11.9%	11.4%	10.9%
	Coûts (C3)	ω_3	35.0%	31.6%	27.8%	23.5%	38.1%	40.9%	43.5%
	Critères performantiels (C4)	ω_4	25.0%	26.3%	27.8%	29.4%	23.8%	22.7%	21.7%
	Critères qualitatifs (C5)	ω_5	15.0%	15.8%	16.7%	17.6%	14.3%	13.6%	13.0%
Classement	REF	a1	3	3	3	2	3	3	3
	ET-C	a2	4	4	4	4	5	5	5
	ET-P	a3	1	1	1	1	1	1	1
	EST	a4	4	5	5	5	4	4	4
	EBT	a5	2	2	2	3	2	2	2

Tableau 9-9 : Agrégation partielle - Analyse de sensibilité de la pondération des critères de performances (C4)

			Choix de pondération des critères de performances (C4)						
			20%	15%	10%	30%	35%	40%	
			BASE	Calcul des pondérations					
Poids des critères	Energie	ω_1	12.5%	13.2%	13.9%	14.7%	11.9%	11.4%	10.9%
	Emissions	ω_2	12.5%	13.2%	13.9%	14.7%	11.9%	11.4%	10.9%
	Coûts	ω_3	35.0%	36.8%	38.9%	41.2%	33.3%	31.8%	30.4%
	Critères performantiels	ω_4	25.0%	21.1%	16.7%	11.8%	28.6%	31.8%	34.8%
	Critères qualitatifs	ω_5	15.0%	15.8%	16.7%	17.6%	14.3%	13.6%	13.0%
Classement	REF	a1	3	3	3	3	3	3	2
	ET-C	a2	4	5	5	5	4	4	4
	ET-P	a3	1	1	1	1	1	1	1
	EST	a4	4	4	4	4	5	5	5
	EBT	a5	2	2	2	2	2	2	3
				Classement des variantes					

Tableau 9-10 : Agrégation partielle - Analyse de sensibilité de la pondération des critères qualitatifs (C5)

			Choix de pondération des critères qualitatifs (C5)				
			10%	5%	0%	20%	
			BASE	Calcul des pondérations			
Poids des critères	Energie	ω_1	12.5%	13.2%	13.9%	14.7%	11.9%
	Emissions	ω_2	12.5%	13.2%	13.9%	14.7%	11.9%
	Coûts	ω_3	35.0%	36.8%	38.9%	41.2%	33.3%
	Critères performantiels	ω_4	25.0%	26.3%	27.8%	29.4%	23.8%
	Critères qualitatifs	ω_5	15.0%	10.5%	5.6%	0.0%	19.0%
Classement	REF	a1	3	3	3	3	
	ET-C	a2	4	4	4	5	
	ET-P	a3	1	1	1	1	
	EST	a4	4	5	5	4	
	EBT	a5	2	2	2	2	
				Classement des variantes			

L'analyse de sensibilité peut ensuite être effectuée pour les différents seuils. Le domaine de variation des seuils est défini de manière à respecter la règle $q_j \leq p_j < v_j$.

Nous analysons le seuil de préférence stricte p_j qui, pour rappel, peut être interprété comme la marge maximale d'erreur liée aux calculs effectués. Lorsque la différence atteint ce seuil, alors il y a une préférence stricte entre deux variantes pour le critère considéré. L'analyse du seuil de préférence stricte est réalisée sur le critère de coût énergétique (C3) car il s'agit d'un aspect déterminant du processus de décision, ainsi que sur le critère relatif à la consommation d'énergie (C1). La consommation d'énergie est particulièrement importante dans le processus d'inventaire du cycle de vie et des différences significatives entre les variantes sont calculées pour ce critère. Les résultats détaillés sont présentés en Annexe F. On remarquera les éléments suivants :

- Le seuil de préférence stricte du critère C3 est varié entre 0.4 CHF et 3.6 CHF. Quelle que soit la valeur du seuil de préférence stricte, la variante ET-P reste la variante préférée selon le classement établi par la méthode de Siskos-Huber. Pour des seuils de préférence stricte supérieurs ou égaux à 1.3 CHF, la variante REF est en seconde position et donc préférée à la variante EBT. Les variantes ET-C et EST sont globalement toujours aux deux dernières positions du classement, à une seule exception : Lorsque le seuil de préférence stricte prend des valeurs élevées (≥ 2.5 CHF), la variante ET-C dont le coût est élevé se trouve « favorisée » et elle se positionne alors au troisième rang aux dépens de la variante EBT. Ce cas n'est cependant pas très réaliste et surtout il ne modifie pas la variante de tête qui reste l'enrobé ET-P.
- L'analyse de sensibilité du seuil de préférence stricte relatif au critère de la consommation énergétique (C1) est réalisée en variant le seuil entre 15 MJ et 120 MJ. Là-aussi, la variante ET-P reste en tête de classement pour l'ensemble des combinaisons calculées. Lorsque le seuil de

préférence stricte est élevé (≥ 45 MJ), alors la variante REF est en seconde position, l'enrobé EBT passant en troisième position du classement.

- L'analyse des seuils de préférence stricte relatifs aux autres critères ne modifie globalement pas le classement du cas de base.

Les résultats détaillés de l'analyse de sensibilité pour les seuils de veto sont également disponibles en Annexe. Le seuil de veto est une donnée purement volontariste et l'utilisateur peut aussi choisir de ne pas en utiliser. Nous effectuons une analyse de sensibilité des seuils de veto des critères C3 (coût énergétique), C1 (consommation d'énergie) et C4.3 (performances – résistance à la fatigue) pour lesquels la modification des seuils peut potentiellement affecter le classement (détails en Annexe).

- Pour les critères C3 et C1, la variation du seuil de veto ne modifie pas le choix de la variante préférée. Comme précédemment, les points de basculement entre le choix des variantes en quatrième et cinquième position (enrobés ET-C et EST) peuvent être observés selon la valeur des seuils.
- L'analyse du seuil de veto sur la performance en fatigue indique que la variante ET-P est préférée, si le seuil de veto est ≥ 7.7 μm . Pour un seuil de veto inférieur à cette valeur la variante REF se classe en première position en raison des bonnes performances en fatigue de l'enrobé et de la différence avec la variante en seconde position pour ce critère, ce qui empêche l'enrobé REF d'être surclassée par les autres variantes. Un seuil de veto aussi bas n'est cependant pas recommandé, ni réaliste, car l'analyse s'en trouve biaisée.

Le seuil de veto est une donnée complexe et pouvant sensiblement affecter les résultats. C'est pourquoi, les spécialistes recommandent parfois de ne pas appliquer de seuil de veto sur les critères financiers afin que ces derniers ne soient pas discriminants et « faussent » ainsi l'analyse. Nous effectuons un calcul (logiciel Electre III/IV) de deux variantes : pas de seuil de veto sur le prix (C3) et aucun seuil de veto pour l'ensemble des critères. Les résultats des distillations sont indiqués dans la Figure 9-10.

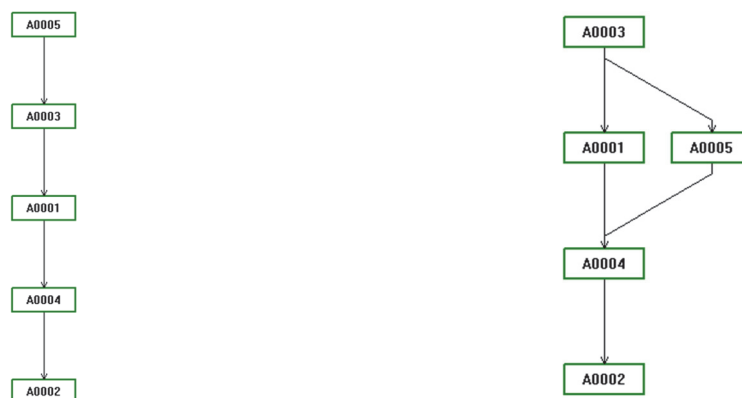


Figure 9-10 : Préordre partiel final sans seuil de veto sur aucun critère (gauche) et sans seuil de veto uniquement sur le critère de coût énergétique (droite)

En supprimant l'ensemble des effets de veto, alors la variante EBT est préférée, juste devant la variante ET-P. La variante ET-C reste la moins bonne selon ce classement. Le classement des variantes selon la méthode de Siskos-Huber sur la base de la matrice des degrés de crédibilité du surclassement fournie par le logiciel est identique.

Si l'on supprime le seuil de veto uniquement sur le critère de coût énergétique, alors le résultat de la distillation n'est pas modifié par rapport au cas de base ; la variante ET-P est préférée. Là-aussi, le classement selon Siskos-Huber est comparable au cas de base, la seule différence se trouvant en fin de

classement où la variante EST se trouve en quatrième position et la variante ET-C en cinquième position (ces deux variantes sont égales dans le cas de base).

Afin d'illustrer l'utilité des méthodes d'agrégation, nous pouvons relever qu'un classement global univoque des variantes peut difficilement être réalisé exclusivement sur la base d'un classement brut de chaque enrobé pour les différents critères (Figure 9-11). Selon la moyenne des différents classements obtenus pour les 8 critères, l'enrobé EBT est le meilleur (2.5), devant l'enrobé REF (2.625). L'enrobé ET-P n'est qu'en troisième position si l'on considère uniquement ce classement. Cette donnée n'est cependant qu'illustrative. Elle ne prend pas en considération l'ampleur de la différence entre les variantes, ni les préférences de l'utilisateur.

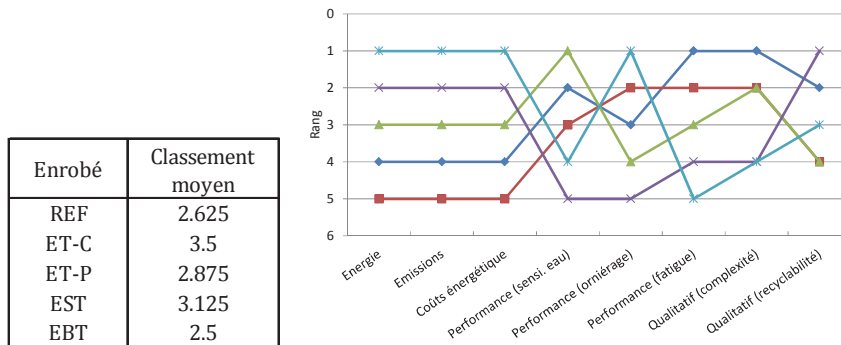


Figure 9-11 : Comparaison du classement des variantes selon les différents critères

9.3.4 Niveau 4 : Agrégation complète

La solution de base obtenue par la méthode d'agrégation complète (théorie de l'Evidence) est également calculée en utilisant les valeurs par défaut proposées dans l'outil et détaillées au chapitre 8. La robustesse de cette solution sera ensuite évaluée par une analyse de sensibilité. Considérant toujours la matrice de performances brutes comme fixe, les hypothèses de base pour le calcul par agrégation complète concernent les éléments suivants :

- Pondération (Figure 8-18)
- Matrices de transformation pour critères qualitatifs (Tableau 8-10) et quantitatifs (Tableau 8-11)
- Fonction d'utilité (Tableau 8-12)

Critères qualitatifs

Comme expliqué dans les détails de la méthode, nous conservons une évaluation qualitative dans ce niveau d'analyse, ce qui permet de prendre en considération une part d'inconnue sur les données. Les critères qualitatifs sont évalués de la même manière que pour l'agrégation partielle, mais selon une échelle qualitative. Ainsi, les notes sont converties et elles s'étendent de A=6 à G=0.

Le tableau de performances brutes finalement utilisé pour l'analyse multicritère des enrobés selon la théorie de l'Evidence est indiqué ci-dessous.

Tableau 9-11 : Agrégation complète – Tableau de performances brutes

					1	2	3	4	5	
					REF	ET-C	ET-P	EST	EBT	
C. quantitatifs	Critère Niveau 1	Critère Niveau 2	Critère Niveau 3	Unités						
	C1	Energie			MJ	627.16	681.18	602.13	599.58	576.07
C2		Emissions			kg CO2,eq	45.81	49.86	43.13	42.91	37.50
C3		Coûts éner.			CHF	16.263	17.216	15.603	15.533	14.758
C4		Performance			%	90.0%	87.0%	96.0%	78.0%	83.0%
C5	Qualitatifs	C4.1;Sensibilité eau		[10-6]	120	117	113	108	90	
		C4.2;Déform. perm.		%	5.6%	5.0%	5.8%	6.7%	4.7%	
		C4.3;Résist. fatigue		%	5.6%	5.0%	5.8%	6.7%	4.7%	
		C5.1.1;Séquence		-	A	C	C	G	G	
C5	Qualitatifs	C5.1;Complexité		-	A	C	C	C	C	
		C5.1.2;Insertion additif		-	A	C	C	C	C	
		C5.1.3;Eau		-	A	A	A	G	G	
		C5.2.1;Additifs utilisés		-	A	F	F	D	F	
C5	Qualitatifs	C5.2;Recyclabilité		-	E	C	C	A	A	
		C5.2.2;Vieillessement		-	E	C	C	A	A	
					A	A	A	A	A	
					A	A	A	A	A	

Résultat

Le degré de croyance pour chacune des variantes (i.e. enrobé) et pour les différents niveaux d'évaluation (mauvais, faible, moyen, bon, excellent) est présenté dans la Figure 9-12. Comparativement aux autres variantes, l'enrobé ET-C présente une croyance élevée pour le degré d'évaluation « faible » et un degré de croyance inférieur aux autres variantes pour les degrés d'évaluation « moyen » et « bon ». Ceci peut indiquer un mauvais classement final de cette variante. On peut encore relever que les variantes ET-P et EBT présentent un degré de croyance élevé pour les degrés d'évaluation « bon » et « excellent », la différence exacte entre ces deux variantes au niveau du classement est cependant difficile à estimer. La faible part d'inconnue pour l'ensemble des enrobés (< 1%) est liée à la matrice de transformation utilisée pour les critères qualitatifs. Le classement exact des différents enrobés est cependant difficile à déterminer sur la base de cette seule figure.

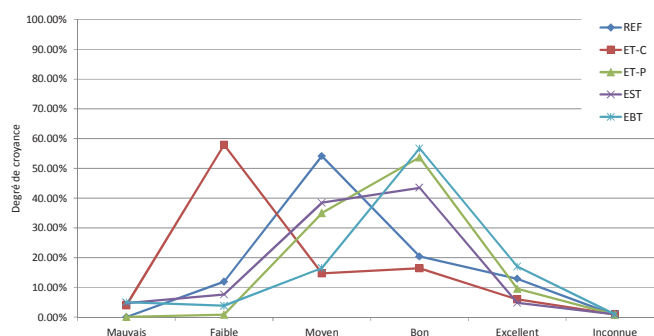


Figure 9-12 : Agrégation complète – Degrés de croyance des différentes variantes

Le recours au calcul d'utilité permet de déterminer le classement des variantes (Figure 9-13). La variante EBT est classée en première position dans ce cas de base ($u_{\min}(\text{EBT}) > u_{\max}(\text{ET-P})$). Son utilité est cependant très proche de la variante ET-P classée en seconde position. Ensuite, les variantes EST (troisième position) et REF (quatrième position) montrent également une utilité moyenne très proche l'une de l'autre. La variante ET-C présente une utilité sensiblement plus faible que les autres enrobés pour ce cas de base.

	Mauvais	Faible	Moyen	Bon	Excellent
Degré d'utilité	0.00	0.35	0.55	0.85	1.00

Utilité	REF	ET C	ET P	EST	EBT
u_{\min}	0.6416	0.4831	0.7468	0.6557	0.7561
u_{\max}	0.6486	0.4923	0.7555	0.6650	0.7656
u_{moy}	0.6451	0.4877	0.7512	0.6603	0.7609

intervalle u (\pm)	0.0035	0.0046	0.0043	0.0047	0.0048
RANG	4	5	2	3	1

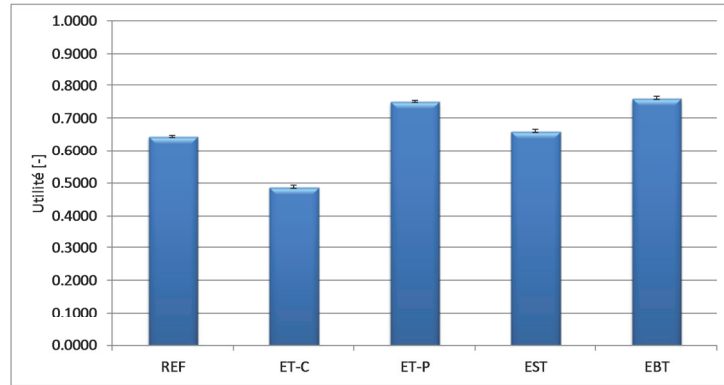


Figure 9-13 : Agrégation complète - Calcul de l'utilité du cas de base

Analyse de robustesse

Comme pour le troisième niveau d'analyse, la robustesse de la solution proposée est évaluée par une analyse de sensibilité sur les paramètres variables : pondération, matrices de transformation (qualitatif et quantitatif) et fonction d'utilité.

La variation de la pondération se fait de manière analogue que pour l'analyse de sensibilité réalisée dans le cas de l'agrégation partielle. On pourra consulter cette section pour plus de détails sur le calcul des différentes importances relatives. Les résultats de l'analyse de sensibilité de la pondération pour les calculs d'agrégation complète sont présentés dans le Tableau 9-12, le Tableau 9-13 et le Tableau 9-14.

- La variation de la pondération allouée au coût énergétique influence le classement de la variante de tête. Lorsque la pondération est supérieure à 33%, alors la variante EBT est préférée. Par contre, si le poids de ce critère est inférieur à 33%, alors la variante ET-P est classée en première position. De même, lorsque le poids du critère C3 est $\leq 25\%$, alors la variante REF se classe en troisième position, en lieu et place de la variante EST qui lui est préférée lorsque la pondération est supérieure à 25%. Pour les différents cas évalués, l'enrobé ET-C reste en fin de classement.
- Les mécanismes sont globalement similaires lorsque le poids du critère de performances (C4) est varié. En raison de ses meilleures performances mécaniques que la variante EBT, la variante ET-P est préférée lorsque l'importance relative à ce critère est $\geq 30\%$.
- Si la pondération allouée au critère qualitatif (C5) est $> 15\%$, alors la variante ET-P est préférée à la variante EBT en première position de classement.
- Finalement, la solution obtenue quant à la variante choisie dans le cas de base (EBT) est moins robuste que pour l'agrégation partielle, la variante ET-P pouvant selon les choix de pondérations être préférée. En troisième et quatrième position de classement, les enrobés REF et EST sont également très proches, la préférence dépendant de la pondération. L'analyse de sensibilité des différentes pondérations indique que la variante ET-C se classe dans l'ensemble des cas testés en dernière position du classement.

Tableau 9-12 : Agrégation complète - Analyse de sensibilité de la pondération du critère de coût énergétique (C3)

	BASE	Choix de pondération du critère de coût énergétique (C3)					
	35%	30%	25%	20%	40%	45%	50%
Classement des variantes							
REF	4	4	3	3	4	4	4
ET-C	5	5	5	5	5	5	5
ET-P	2	1	1	1	2	2	2
EST	3	3	4	4	3	3	3
EBT	1	2	2	2	1	1	1

Tableau 9-13 : Agrégation complète - Analyse de sensibilité de la pondération des critères de performances (C4)

	BASE	Choix de pondération des critères de performances (C4)					
	25%	20%	15%	10%	30%	35%	40%
Classement des variantes							
REF	4	4	4	4	4	3	3
ET-C	5	5	5	5	5	5	5
ET-P	2	2	2	2	1	1	1
EST	3	3	3	3	3	4	4
EBT	1	1	1	1	2	2	2

Tableau 9-14 : Agrégation complète - Analyse de sensibilité de la pondération des critères qualitatifs (C5)

	BASE	Choix de pondération des critères qualitatifs (C5)			
	15%	10%	5%	0%	20%
Classement des variantes					
REF	4	4	4	4	3
ET-C	5	5	5	5	5
ET-P	2	2	2	2	1
EST	3	3	3	3	4
EBT	1	1	1	1	2

L'analyse de sensibilité de la matrice de transformation des critères quantitatifs est ensuite réalisée :

- Le Tableau 9-15 présente différentes variantes de matrice de transformation pour le coût énergétique (critère C3), avec le classement relatif à chacun des cas. Le premier cas correspond à un resserrement des limites entre le degré d'évaluation « faible » et le degré d'évaluation « bon ». Dans ce cas, la variante ET-P est préférée. Cette même variante ET-P est préférée dans le cas 2 (répartition linéaire entre « mauvais » et « excellent ») et le cas 3 (échelle élargie avec intervalle régulier entre les évaluations). Le cas 4 correspond à une distribution régulière des degrés d'évaluation entre les valeurs minimales et maximales calculées lors de l'inventaire du cycle de vie. Dans ce quatrième cas, la variante EBT est alors préférée en tête de classement. On remarquera que l'enrobé ET-C est systématiquement en cinquième position, les enrobés REF et EST se partageant la troisième et quatrième position du classement selon les cas étudiés.
- Le Tableau 9-16 analyse trois différents cas pour la matrice de transformation du critère relatif aux émissions. Le choix des valeurs limites des degrés d'évaluation est effectué de manière à étudier une répartition linéaire entre l'évaluation « mauvais » et l'évaluation « excellent » (cas 1), un resserrement entre l'évaluation « faible » et « moyen » (cas 2) et une répartition linéaire entre les émissions minimale et maximale mesurées lors de l'inventaire du cycle de vie. Pour l'ensemble des cas testés, le classement final est identique à celui obtenu pour le cas de base i.e. la variante EBT est préférée.
- Une analyse de la matrice de transformation du critère relatif à l'énergie ne modifie pas le classement obtenu pour le cas de base.

Tableau 9-15 : Agrégation complète – Analyse de sensibilité de la matrice de transformation du critère quantitatif coût énergétique (C3)

		BASE	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
Evaluation [CHF/t]	Mauvais	19.00	19.00	19.00	21.00	17.30
	Faible	17.00	17.00	17.50	19.00	16.65
	Moyen	16.00	16.50	16.00	17.00	16.00
	Bon	15.00	16.00	14.50	15.00	15.35
	Excellent	13.00	13.00	13.00	13.00	14.70
Classement des variantes						
Classement	REF	4	4	3	3	4
	ET-C	5	5	5	5	5
	ET-P	2	1	1	1	2
	EST	3	3	4	4	3
	EBT	1	2	2	2	1

Tableau 9-16 : Agrégation complète - Analyse de sensibilité de la matrice de transformation du critère quantitatif émissions (C2)

		BASE	Cas 1	Cas 2	Cas 3
Evaluation [MJ/t]	Mauvais	60	60	60	50
	Faible	50	53	46	47
	Moyen	45	45	43	44
	Bon	40	38	40	40
	Excellent	30	30	30	37
Classement des variantes					
Classement	REF	4	4	4	4
	ET-C	5	5	5	5
	ET-P	2	2	2	2
	EST	3	3	3	3
	EBT	1	1	1	1

L'analyse de sensibilité a également été conduite sur la matrice de transformation des critères qualitatifs (voir Annexe F). Dans un premier temps, l'inconnue de 10% attribuée à la matrice par défaut a été enlevée par le calcul de deux différentes variantes. Comparativement au cas de base, les modifications effectuées sur la matrice de transformation ne présentent pas d'incidence sur le classement des variantes. L'augmentation de l'inconnue (30%) ne modifie également pas le classement final de variantes, l'enrobé EBT étant préféré.

La dernière analyse de sensibilité concerne la fonction d'utilité pour laquelle le choix peut avoir une incidence sur le classement des variantes. La fonction d'utilité peut par exemple traduire la propension du décideur à prendre des risques. Les trois différents cas analysés ainsi que le classement des variantes sont indiqués dans le Tableau 9-17. La meilleure variante est à-nouveau l'enrobé EBT ou l'enrobé ET-P, ceci selon la fonction d'utilité choisie. Ces résultats corroborent les conclusions données lors des autres analyses de sensibilité.

Tableau 9-17 : Agrégation complète – Analyse de sensibilité de la fonction d'utilité

		BASE	Cas 1	Cas 2	Cas 3
Utilité [-]	Mauvais	0.00	0.00	0.00	0.00
	Faible	0.35	0.25	0.10	0.20
	Moyen	0.55	0.50	0.60	0.40
	Bon	0.85	0.75	0.80	0.70
	Excellent	1.00	1.00	1.00	1.00
Classement des variantes					
Classement	REF	4	4	4	4
	ET-C	5	5	5	5
	ET-P	2	2	1	2
	EST	3	3	3	3
	EBT	1	1	2	1

Notons qu'il est également possible de ne pas renseigner certaines données du tableau de performances brutes. La théorie de l'Evidence prend en considération l'inconnue des données. Comme expliqué en début de chapitre, une hypothèse de comportement à la fatigue de l'enrobé EBT a été effectuée car nous ne disposons pas de résultats d'essais. Nous pouvons calculer :

- Si la donnée relative au comportement en fatigue de l'enrobé EBT n'est pas renseignée, alors l'inconnue pour cette variante est de 5.92%, le cas de base ayant une inconnue de 0.95%. La relation $u_{\min}(EBT) \geq u_{\max}(ET-P)$ n'est plus valable. Il s'agit alors de calculer le degré de préférence P de la variante EBT par rapport à la variante ET-P qui lui est la plus proche. Le degré de préférence est déterminé ainsi :

$$P(EBT > ET - P) = \frac{\max[0, u_{\max}(EBT) - u_{\min}(ET - P)] - \max[0, u_{\min}(EBT) - u_{\max}(ET - P)]}{[u_{\max}(EBT) - u_{\min}(EBT)] + [u_{\max}(ET - P) - u_{\min}(ET - P)]} = 69\%$$

- Si aucune des performances mécaniques de l'enrobé EBT n'a pu être déterminée, alors l'inconnue pour la variante est de 11.30%, ce qui est près de 12 fois plus que pour le cas de base. La variante EBT est toujours en tête de classement, le degré de préférence $P(EBT > ET-P)$ est de 91%.

9.4 Discussion des résultats

Cet exemple de calcul prend en considération les différents enrobés pour lesquels les performances mécaniques ont été évaluées en laboratoire (REF, ET-C, ET-P, EST), ainsi qu'un enrobé semi-tière additionnel (EBT).

Il est important de garder à l'esprit que ce calcul constitue une application de la méthodologie dont les résultats dépendent des hypothèses et postulats effectués ; les choix ayant été faits afin de représenter le mieux possible le contexte d'étude. Les résultats ne peuvent pas être généralisés et chaque cas nécessitera la réalisation d'une évaluation complète et la considération de chaque paramètre et hypothèse dans le contexte précis de l'étude (distances de transport, bornes de l'inventaire du cycle de vie, type de centrale, ...).

Les calculs réalisés mettent en évidence les éléments suivants :

- Les résultats et tendances obtenus aux différents niveaux d'analyse sont consistants. Chaque niveau d'analyse apporte sa propre contribution à l'évaluation globale. Les résultats de l'agrégation partielle et de l'agrégation complète ne sont pas nécessairement similaires pour le cas de base, mais l'analyse de robustesse de la solution fournit des compléments importants permettant d'affiner le choix.

- Les analyses graphiques (niveau 1 et 2) ne permettent pas de sélectionner l'enrobé le plus performant globalement car il n'y a pas de surclassement complet de variante, mais elles mettent notamment en évidence les processus unitaires dominants pour chaque type d'enrobé.
- L'étude par agrégation partielle identifie clairement deux groupes de variantes. Dans le groupe de tête, les enrobés REF, ET-P et EBT. Parmi ces trois enrobés, le mélange ET-P obtient le meilleur classement et la solution présente une bonne robustesse au vu des résultats de l'analyse de sensibilité. On trouvera en fin de classement les variantes EST et ET-C.
- L'analyse par agrégation complète ainsi que les analyses de sensibilité associées permettent d'identifier trois groupes de variantes. En tête de classement, les variantes EBT et ET-P présentent une utilité moyenne très proche. La solution de base calculée préfère la variante EBT. L'analyse de sensibilité de la solution de base indique que selon les conditions (pondération par exemple), la variante ET-P peut être préférée. La solution proposée est moins robuste que lors de l'analyse par agrégation partielle, les variantes EBT et ET-P étant très proches. Dans un deuxième groupe les variantes EST et REF se partagent la troisième et quatrième place, ceci selon les hypothèses de base. La variante ET-C arrive en cinquième position du classement pour le cas étudié.
- Finalement et sur la base des calculs réalisés, il semble que la variante ET-P soit globalement la meilleure. Cet enrobé n'est que rarement le plus performant pour un critère donné, mais ses performances sont toujours relativement proches des variantes de tête de classement. L'enrobé ET-P semble proposer un bon compromis général dans le cas présent. L'enrobé EBT est cependant très proche de la variante de tête et il peut lui être préférée selon les conditions. Ensuite, les enrobés REF et EST se situent globalement en troisième et quatrième position, ceci selon les préférences de l'utilisateur (pondération) et les hypothèses de base. Parmi les enrobés évalués, nous pouvons relever la variante ET-C qui se trouve très souvent en fin de classement. Ceci est lié à l'utilisation d'additif d'une part, mais surtout au dosage de l'additif. Le dosage en cire est 7.5 fois plus élevé que le dosage de l'additif chimique utilisé pour l'enrobé ET-P. Cette quantité élevée d'additif péjore le bilan sur le cycle de vie et les bonnes performances mécaniques de l'enrobé ET-C ne permettent pas de compenser suffisamment le « déficit » calculé sur le cycle de vie.

Remarque : Pour des raisons d'organisation, l'exemple de calcul discuté dans ce chapitre a été réalisé avant que l'ensemble des résultats de fatigue sur la totalité des éprouvettes testées ne soient disponibles. Ainsi, pour l'enrobé ET-P, une déformation $\varepsilon_6=113 \mu\text{m}/\text{m}$ a été considérée pour les performances en fatigue lors de l'analyse multicritère. Le résultat final de l'essai (chapitre 4.9.1) indique une valeur $\varepsilon_6=111\pm 1 \mu\text{m}/\text{m}$. Après la réalisation d'une série de calculs vérificatifs, nous pouvons cependant affirmer que cette très faible différence au niveau de la performance en fatigue de l'enrobé ET-P n'affecte pas les résultats et tendances observées dans le présent chapitre 9.

10. CONCLUSIONS GENERALES

La recherche menée a apporté des contributions dans trois domaines principaux. Tout d'abord, par l'étude approfondie des performances mécaniques des enrobés tièdes. Dans une deuxième phase, par la mise en place et l'analyse d'un essai rapide et discriminant pour l'évaluation du module sécant des enrobés. Finalement, sur la base de l'analyse performantielle en laboratoire ainsi qu'entre autre de considérations énergétiques, environnementales et économiques, la proposition et l'implémentation d'une méthodologie multicritère d'évaluation des enrobés. L'outil proposé fournit une aide à la décision dans le choix de l'enrobé bitumineux.

10.1 Conclusions générales

La recherche conduit aux conclusions ci-après, réparties en fonction des objectifs principaux.

Analyse performantielle en laboratoire

Les essais performantiels en laboratoire fournissent des résultats consistants et cohérents. Ils mettent en évidence les différences de comportement selon le type d'enrobé tiède considéré ; les mélanges évalués présentant globalement des performances satisfaisant aux exigences de la normalisation et aux standards de performances.

L'ajout de cire Fischer-Tropsch diminue sensiblement la viscosité dans le domaine des températures de fabrication, pose et compactage et permet ainsi de réduire ces températures par rapport aux mélanges à chaud. Une fois solidifiée, la cire augmente la viscosité ce qui confère à l'enrobé une excellente résistance à l'orniérage. Corollaire de cette augmentation de rigidité, le comportement à basse température des enrobés avec cire est plus fragile que celui de l'enrobé de référence à chaud.

L'utilisation d'un additif chimique (agent tensio-actif) pour la fabrication des enrobés tièdes ne modifie pas de manière significative la viscosité du liant ou du mastic, mais agit à l'interface liant-granulat de l'enrobé. Les performances mécaniques de l'enrobé tiède fabriqué sont comparables à celles de l'enrobé de référence à chaud.

Malgré une faible humidité résiduelle, l'enrobé tiède avec maîtrise de la teneur en eau présente des performances mécaniques sensiblement moins élevées que l'enrobé de référence à chaud ; notamment en raison du vieillissement plus faible du liant. Ceci est particulièrement le cas en ce qui concerne la sensibilité à l'eau et la résistance aux déformations permanentes. Le comportement à basse température est par contre moins affecté.

Finalement, les différents enrobés testés n'ont pas montré de processus significatif de montée en performance retardée lors des essais réalisés au cours des trois premiers mois suivant la fabrication. La méthode alternative de conservation des échantillons dans des sacs plastique ne permet pas de mettre en évidence des différences de comportement des mélanges évalués.

Mise en place d'un essai de traction indirecte pulsé

L'essai mis en place offre une variante pertinente et rapide permettant de déterminer le module sécant d'un échantillon d'enrobé. Ces résultats peuvent ensuite être utilisés dans le cadre d'un dimensionnement ou pour le calcul de durée de vie.

Les premiers essais sur enrobé ont démontré la robustesse et la fiabilité de la chaîne de mesure. L'utilisation d'une pastille de contact entre le capteur de déformation et l'éprouvette ainsi que la réalisation de l'essai sur trois éprouvettes pour un même mélange ont permis de sensiblement améliorer la qualité de la mesure et la fidélité des résultats. Les essais effectués ont également démontré la nécessité de travailler avec soin et selon une méthode rigoureuse. La réalisation de l'essai nécessite des échantillons homogènes, à la géométrie parfaite. L'essai s'avèrera particulièrement adapté pour le comparatif de produits dont les éprouvettes sont confectionnées en laboratoire.

La réalisation de l'essai selon la normalisation a permis de mettre en évidence un certain potentiel de développement de la méthode recommandée actuellement, ceci dans le but d'améliorer la fiabilité et la représentativité.

Modèle multicritère

La fabrication en centrale est un des processus dominant du cycle de vie d'un enrobé bitumineux. L'analyse approfondie de la problématique en centrale d'enrobage met en évidence les aspects spécifiques à considérer pour une optimisation énergétique et environnementale : gestion de la teneur en eau du sable, calibration du brûleur, dimensionnement,... La production d'enrobé tiède dans l'optique d'une diminution de la consommation d'énergie et des émissions ne s'avère utile et efficace que si la centrale fait l'objet d'une réflexion globale concernant son optimisation.

La méthode complète d'inventaire du cycle de vie des enrobés bitumineux propose différentes sources de données à l'utilisateur (littérature, mesures, calculs), lui permettant en tout temps de disposer de suffisamment d'informations. L'inventaire du cycle de vie, couplé avec le calcul d'indices de performances bruts et normalisés a permis de fournir des données d'entrée indispensables pour le modèle multicritère.

Une méthode multicritère permettant d'assister dans le choix du type d'enrobé adapté à chaque situation a été détaillée et implémentée de manière transparente. La méthodologie d'évaluation proposée offre un outil pertinent, flexible et complet pour l'aide à la décision.

Le modèle multicritère s'articule selon une procédure en quatre niveaux d'analyse, avec chacun ses particularités et apports spécifiques. Dans les deux premiers niveaux, une analyse graphique selon la méthode Pareto et l'établissement de diagrammes radars permettent d'une part d'identifier les processus unitaires dominants, et d'autre part de mettre en évidence les éventuels surclassements complets de variantes. Des critères qualitatifs sont pris en compte dès le troisième niveau d'analyse. Le troisième niveau intègre la notion de préférence et de critères flous selon une méthode d'agrégation partielle. Dans le quatrième niveau d'analyse, une méthode d'agrégation complète basée sur un algorithme dérivé de la théorie de l'Evidence, considère de manière innovante l'incertitude ainsi que l'inconnue des données de base. La méthodologie progressive développée et mise en place permet en tout temps à l'utilisateur d'arrêter la procédure, mais également de vérifier la robustesse de sa solution par l'application d'une méthode complémentaire ainsi que par une analyse de sensibilité. Non seulement les émissions, l'énergie et les coûts sont pris en considération, mais également les performances de l'enrobé, la complexité du processus de fabrication et le potentiel de recyclabilité.

La réalisation d'une analyse complète des enrobés considérés dans cette recherche identifie l'enrobé tiède avec additif chimique comme la solution globalement préférée. Le calcul met également en évidence l'impact d'un dosage élevé en additif pouvant sensiblement péjorer l'enrobé lors de l'analyse multicritère, ceci malgré des performances mécaniques élevées.

Synthèse

Les principales conclusions de la recherche menée peuvent être résumées ainsi :

- Dans le cas d'une formulation standard (non optimisée) telle qu'appliquée ici, les performances mécaniques des différents enrobés tièdes évalués (cire, additif chimique, maîtrise de la teneur en eau) sont globalement satisfaisantes. Les différents essais menés illustrent l'importance de l'analyse de la viscosité. Les différences de comportement, particularités et faiblesses potentielles des différentes catégories d'enrobés tièdes ont également été mises en évidence.
- L'évaluation des caractéristiques mécaniques et performances des enrobés dans les trois premiers mois suivant la fabrication n'a pas mis en évidence de processus significatif de montée en performance. La conservation des échantillons d'enrobé dans des sacs plastiques ne conduit pas à des différences de comportement par rapport à la conservation traditionnelle à l'air libre.
- L'essai de traction indirecte mis en place présente un potentiel élevé pour proposer une variante pertinente et fiable pour déterminer le module sécant de l'enrobé.
- Considérant l'inventaire du cycle de vie d'un enrobé, la production d'enrobé tiède en centrale d'enrobage ne fait de sens que si le processus de fabrication en centrale est également analysé et optimisé.
- Une méthodologie complète d'aide à la décision dans le choix de la technologie d'enrobage est proposée. Le modèle développé en différents niveaux de complexité croissante est original et il permet notamment de prendre en compte la préférence de l'utilisateur et l'incertitude et l'absence de données. La robustesse de la solution est également évaluée par l'intermédiaire d'une analyse de sensibilité.
- L'application de la méthode multicritère d'évaluation aux enrobés testés dans cette recherche, et pour les hypothèses spécifiques effectuées, identifie l'enrobé avec ajout d'additif chimique comme la variante la plus performante.

10.2 Perspectives de recherches et recommandations

Analyse performantielle en laboratoire

Sur la base de la campagne d'essais en laboratoire, nous pouvons mettre en évidence les thématiques de recherches et recommandations suivantes :

- La méthode de formulation ainsi que la détermination de la recette optimale doivent être analysées selon la perspective des enrobés tièdes, prenant en considération les particularités relatives à chacune des familles d'enrobés. Par exemple, l'utilisation d'un liant plus mou dans le cas des mélanges avec cire permet de diminuer la température de fabrication et également améliorer le comportement à basses températures. Des recherches combinant l'ajout de matériaux recyclés aux enrobés tièdes doivent également être menées ainsi que la détermination de la teneur optimale en liant et additif. Des directives doivent être proposées afin de garantir des performances mécaniques élevées des enrobés tièdes, favorisant ainsi leur utilisation.
- Pour les technologies recourant à l'ajout ou la maîtrise de la teneur en eau, il est indispensable d'évaluer l'incidence de l'humidité résiduelle sur les performances. Des valeurs limites et codes de bonne pratique doivent être proposés afin de garantir un comportement mécanique satisfaisant aux exigences.
- L'applicabilité et la signification des résultats d'essais traditionnels de caractérisation et d'évaluation des performances doivent être évaluées, de même que l'analyse et l'interprétation des résultats d'essais. Par exemple, l'interprétation de la mesure de viscosité du liant ou du mastic d'un enrobé comportant de l'eau, réalisée selon les méthodes traditionnelles, doit être reconsidérée. Dans le cas de moussage du bitume, la qualité et la stabilité de la mousse doivent être quantifiés (facteur d'expansion, durée de vie, ...), de même que les paramètres déterminants (bitume, eau, équipement utilisé, ...). Les méthodes de vieillissement des liants doivent également être évaluées afin de déterminer la correspondance avec la production d'enrobé tiède.
- La remise sous circulation d'une section en enrobé tiède dépend d'une part de la température, mais également de l'évolution de la viscosité de l'enrobé. Ces paramètres doivent être analysés pour les différentes familles et des règles d'applications proposées en fonction du type de sollicitations prévues.

Mise en place d'un essai de traction indirecte pulsé

Il ressort de la mise en place et l'analyse de l'essai de module sécant différentes pistes de recherche et développement :

- Tel que défini actuellement, le facteur de surface de charge est difficilement applicable et le calcul du module sécant corrigé n'est pas satisfaisant. Des recherches sont nécessaires afin de déterminer l'expression et la signification du facteur de surface de charge selon la température d'essai, le type de matériau testé et le signal de chargement appliqué.
- Afin de récolter davantage d'informations sur le comportement du matériau, l'investigation de temps de repos différents, l'augmentation du domaine de déformation tout en restant dans le domaine de linéarité des enrobés, ainsi que la variation de la fréquence de chargement seraient à étudier. La fréquence d'essai ainsi que sa correspondance avec les sollicitations réelles de la chaussée doivent être évaluées. Ces résultats et les conditions d'essais peuvent ensuite être analysés afin d'être corrélés avec la mesure de module complexe réalisée sur éprouvette trapézoïdale.

- La prise en compte de la viscoélasticité du matériau dans le mode de sollicitation, dans la réalisation de la mesure ainsi que dans l'interprétation des résultats est nécessaire. Ceci permettra d'étendre le domaine d'application de l'essai et la précision des résultats.
- L'essai de module sécant mis en place présente une certaine flexibilité. Il pourrait être adapté afin d'évaluer la résistance des matériaux à l'humidité ou alors dans le cadre de couplages thermomécaniques.

Modèle multicritère

Différents axes de développement du modèle d'inventaire du cycle de vie mis en place dans cette recherche peuvent être envisagés (bases de données, variété des matériaux, ...). Les principaux défis au niveau des analyses et inventaires du cycle de vie dans le domaine des chaussées sont les suivants :

- Les données sont un paramètre crucial, déterminant l'exactitude de l'analyse. Des bases de données reconnues, spécifiques au domaine routier doivent être créées. Certains processus secondaires ou innovants ne disposent à l'heure actuelle d'aucune donnée de consommation énergétique ou d'émissions. De plus, l'établissement de méthodes d'évaluation de la qualité et de l'incertitude des données est nécessaire.
- Une méthode de prise en compte et valorisation des matériaux recyclés dans l'enrobé doit être établie ; la fin de vie en matière d'enrobé bitumineux est plus complexe à définir que pour des produits de consommation courante. Le multi-recyclage doit être intégré à cette thématique de recherche.
- Les effets du trafic sur la chaussée et l'évolution des dégradations peuvent être inclus dans la méthodologie d'analyse du cycle de vie. Le couplage avec des outils de simulation de trafic et des programmes de gestion de la maintenance serait à analyser.

Le modèle multicritère d'évaluation mis en place offre de nouvelles perspectives pour l'aide à la décision dans le choix de l'enrobé bitumineux. Différents potentiels de développement et recherches peuvent être imaginés :

- Intégration des algorithmes de distillation à la méthode d'agrégation partielle afin de compléter le classement obtenu selon la méthode de Siskos-Huber.
- Mise en place d'une méthode d'analyse de sensibilité et de détermination de la robustesse de la solution proposée. Selon les résultats obtenus aux différents niveaux d'analyse ainsi que l'analyse de sensibilité, un indice de robustesse ou de confiance pourrait alors être développé pour chaque solution proposée.
- Intégration de la notion de coût de production des enrobés, en complément au coût énergétique considéré dans la version actuelle.

11. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abdo, J., F. Agnesina, et al. (2005). Béton et développement durable - Analyse du cycle de vie de structures routières. Cimbéton, Centre d'information sur le ciment et ses applications.

Airey, G. D., B. Rahimzadeh, et al. (2003). "Viscoelastic linearity limits for bituminous materials." *Materials and Structures* 36: 643-647.

Al-Rawashdeh, A. S. (2008). Performance Assessment of Warm Mix Asphalt (WMA) Pavements, Ohio University. Master of Science: 104.

Almeida, A. T. D. (2002). "Multicriteria modelling for a repair contract problem based on utility and the ELECTRE I method." *IMA Journal of Management Mathematics* 13: 9.

Anderson, J., C. Weiland, et al. (2011). Greenroads Manual v1.5, University of Washington: 488.

Assef-Vaziri, A. H., M. L. Pigois, et al. (1984). Essai de compression diamétrale appliqué aux enrobés hydrocarbonés, EPFL - LAVOC.

Austerman, A. J., W. S. Mogawer, et al. (2009). Evaluating the Effects of Warm Mix Asphalt Technology Additive Dosages on the Workability and Durability of Asphalt Mixtures Containing Recycled Asphalt Pavement. Transportation Research Board Annual Meeting. Washington D.C.: 18.

Barthel, W., J.-P. Marchand, et al. (2004). Warm Asphalt Mixes by Adding a Synthetic Zeolite. Eurasphalt & Eurobitume Congress 2004. Vienna (Austria): 8.

Bilal, J. et M. Chappat (2003). Développement durable: La route écologique du futur, analyse du cycle de vie. Paris (France), Colas: 40.

- Bilal, J., V. Grosshenny, et al. (2008). "Caractéristiques environnementales des matériaux routiers." *Revue générale des routes et aérodromes* N°865: 8.
- Bistor, B. (2007). *Aspha-min Warm Asphalt Mixes*. Warm Mix Asphalt Technical Working Group. USA.
- Blomberg, T. (2000). The increasing importance of environmental thinking through life cycle assessment. *Eurasphalt & Eurobitume Congress 2000*. Barcelona (Spain): 12.
- Blomberg, T., N. Boussad, et al. (1999). Partial life cycle inventory or "Eco-profile" for paving grade bitumen, *Eurobitume*. Report 99/007: 14.
- Bonvallet, J. (2001). "Les enrobés sont pluriels." *Revue générale des routes et aérodromes* N°799: 13.
- Boustead, I. (2005). *Eco-profiles of the European Plastics Industry - Crude Oil*, *PlasticsEurope*: 19.
- Bouyssou, D., D. Dubois, et al. (2006). *Concepts et méthodes pour l'aide à la décision 1: Outils de modélisation*.
- Bouyssou, D., D. Dubois, et al. (2006). *Concepts et méthodes pour l'aide à la décision 3: Analyse multicritère*, Hermès - Lavoisier.
- Brion, Y., C. L. Roux, et al. (1999). "Mesure de l'évolution de la cohésion à l'émulsion au jeune âge par le maniabilimètre Nynas." *Revue générale des routes et aérodromes* N°769: 6.
- Brosseaud, Y. et D. Sicard (2007). "Etat du développement des enrobés tièdes en France." *Revue générale des routes et aérodromes* N°857: 9.
- Bueche, N. (2009). *Warm asphalt bituminous mixtures with regards to energy, emissions and performance*. Young Researchers Seminar. Torino (Italy): 16.
- Bueche, N. (2010). *Gains en énergie avec les enrobés tièdes*. Journée technique EPFL-LAVOC, Lausanne (Switzerland).
- Bueche, N. (2010). *Notes d'utilisation - Presse laboratoire (INOVA), version 04*, EPFL-LAVOC: 36.
- Bueche, N. et A.-G. Dumont (2009). *IRF Greenhouse Gas Calculator - Analysis and validation*. Lausanne (Suisse), EPFL-LAVOC: 40.
- Bueche, N., A.-G. Dumont, et al. (2009). *Projet initial - Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques*. p. V. Office Fédéral des Routes (OFROU). Lausanne (Switzerland), EPFL-LAVOC: 122.
- Carbonneau, X., J.-P. Henrat, et al. (2006). "Enrobés 2 E de Colas: Une réponse sûre à la problématique des enrobés dits "tièdes"." *Revue générale des routes et aérodromes* N°849: 6.
- Carbonneau, X., B. Yvinec, et al. (2005). "Mesure du module en compression diamétrale." *Revue générale des routes et aérodromes* N°836: 53-59.
- Carter, A., O. Mainardis, et al. (2010). *Design of Half-Warm Asphalt Mixes with Additives*. Transportation Research Board Annual Meeting. Washington D.C.: 12.
- Carter, A. et D. Perraton (2002). *La mesure du module complexe des enrobés bitumineux*. 2ème Conférence spécialisée en génie des matériaux de la Société canadienne de génie civil. Montréal, Canada.
- Chailleux, E., C. De La Roche, et al. (2010). "Modeling of complex modulus of bituminous mixtures measured in tension/compression to estimate secant modulus in indirect tensile test." *Materials and Structures*(September 2010): 17.

Chailleux, E., C. De La Roche, et al. (2010). "Study of the influence of experimental conditions applied to the indirect tensile test versus type of bituminous mixture." *Materials and Structures*(Septembre 2010): 16.

Chappat, M. et J. Bilal (2004). *Ecological Pavement Life Cycle Analysis of Standard Pavement Structures*. Eurasphalt & Eurobitume Congress 2004. Vienna (Austria): 12.

Cholava, R. (2009). *ECRPD Project - WP6 - Life Cycles Evaluation*: 65.

Collop, A. C. et G. D. Airey (2003). *Determination of viscoelastic properties from the indirect tensile stiffness modulus (ITSM) test*. 6th International RILEM Symposium, Zurich (Switzerland).

Consoli, F., D. Allen, et al. (1990). *Guidelines for Life-Cycle Assessment: A "Code of Practice"*, Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC).

Corté, J.-F. et H. Di Benedetto (2005). *Matériaux routiers bitumineux 1 - Description et propriétés des constituants*.

Corté, J.-F., J.-L. Gourdon, et al. (2001). "Les expériences d'exactitude dans le domaine des essais relatifs aux chaussées." *Revue générale des routes et aérodromes* 793: 26-30.

Croix, P. D. et H. Di Benedetto (1996). *Binder-mix rheology: Limits of linear domain, non linear behaviour*. Eurasphalt & Eurobitume Congress 1996. Strasbourg (France).

Curran, M. A. et P. Notten (2006). *Summary of global life cycle inventory data resources, Task Force 1: Database registry, SETAC/UNEP Life Cycle Initiative*.

D'Angelo, J., E. Harm, et al. (2008). *Warm-Mix Asphalt: European Practice, Federal Highway Administration*: 60.

Damm, K.-W., Bielenberg, et al. (2006). *Nachuntersuchungen an ausgesuchten Streckenabschnitten zur Beurteilung des Langzeitverhaltens von TA-Asphalten, asphalt-labor, BAST*: 45.

De La Roche, C. (1996). *Module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux*, Ecole Centrale de Paris: 189.

De Larrard, F. (2009). "Quelques questions soulevées par l'analyse du cycle de vie des infrastructures routières." *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées* N°276: 8.

Delorme, J.-L., Y. Brosseau, et al. (2005). *Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés à chaud*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC): 172.

Di Benedetto, H. et J.-F. Corté (2004). *Matériaux routiers bitumineux 2 - Constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges*.

Di Benedetto, H. et C. De La Roche (1998). *State of the art on stiffness modulus and fatigue of bituminous mixtures*. RILEM Report 17: Bituminous binders and mixes. L. Franken: 138-180.

Di Benedetto, H., M. N. Partl, et al. (2001). "Stiffness testing for bituminous mixtures." *Materials and Structures* 34: 66-70.

Dierkens, M. (2005). *Mesures rhéologiques et modélisation de matériaux en cours de prise*. Génie Civil. Lyon, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat: 267.

Ducasse, M. (2003). "Evolution du matériel." *Revue générale des routes et aérodromes* N°823: 4.

Dumont, A.-G. (2003). *Cours de réalisation des infrastructures de transport*. Lausanne, EPFL - LAVOC.

- EAPA (2005). Low Temperature Asphalt. Brussels (Belgium), European Asphalt Pavement Association (EAPA): 10.
- EAPA (2007). Asphalt in Figures. Brussels (Belgium), European Asphalt Pavement Association (EAPA): 5.
- EAPA (2007). Environmental Guidelines on Best Available Techniques (BAT) for the Production of Asphalt Paving Mixes. Brussels (Belgium), European Asphalt Pavement Association (EAPA): 55.
- Edwards, Y. (2008). Influence of waxes on bitumen and asphalt concrete mixture performance. Eurasphalt & Eurobitume Congress 2008. Copenhagen (Denmark): 10.
- Edwards, Y. (2009). "Influence of Waxes on Bitumen and Asphalt Concrete Mixture Performance." Road Materials and Pavement Design 10(N°2/2009): 313-335.
- Edwards, Y., Y. Tasdemir, et al. (2010). "Energy saving and environmental friendly wax concept for polymer modified mastic asphalt." Materials and Structures N°43: 123-131.
- Elias, D. (1995). Comportement mécanique des enrobés bitumineux des "petites" aux "grandes" déformations. Laboratoire Géomatériaux, Institut national des sciences appliquées de Lyon.
- Figueira, J. et B. Roy (2002). "Determining the weights of criteria in the ELECTRE type methods with a revised Simos' procedure." European Journal of Operational Research 19: 10.
- Franken, L. et A. Vanelstraete (1993). New Developments in Analytical Asphalt Mix Design. 5th Eurobitume Congress. Stockholm (Sweden).
- Frischknecht, R., N. Jungbluth, et al. (2004). "The ecoinvent Database: Overview and Methodological Framework." The International Journal of Life Cycle Assessment: 7.
- Frischknecht, R. et G. Rebitzer (2005). "The ecoinvent database system: a comprehensive web-based LCA database." Journal of Cleaner Production 13: 7.
- Frocht, M. M. (1948). Photoelasticity. New-York.
- Gandhi, T. (2008). Effects of warm asphalt additives on asphalt binder and mixture properties. Civil Engineering, Clemson University: 144.
- Gaudefroy, V., F. Olard, et al. (2007). Laboratory investigations on the mechanical performances of foamed bitumen mixes using half-warm aggregates. Transportation Research Board Annual Meeting. Washington D.C.: 20.
- Golaz, B. (2007). Maîtrise de la viscosité des mélanges bitumineux. Lausanne (Suisse), EPFL-LAVOC: 46.
- Gonzalez-León, J.-A., L. Grampre, et al. (2009). Warm mix asphalts with low dosage chemical additives. Transportation Research Board Annual Meeting. Washington D.C.: 12.
- Gonzalez, J., S. Ligier, et al. (2009). Warm Mix Asphalts with Chemical Additives: Properties and Advantages. Enviroad 2009. Warsaw (Poland): 11.
- Grampre, L., J. A. G. Leon, et al. (2008). Warm asphalt mixtures by chemical additivation: Field tests and laboratory studies. Eurasphalt & Eurobitume Congress 2008, Copenhagen (Denmark): 7.
- Groz, P.-C., C. Alvarez, et al. (1996). Lifecycle analysis comparison of hot and cold methods for the production, application, and use of dense asphalt coatings. Eurasphalt & Eurobitume Congress 1996. Strasbourg (France): 16.

- Gudimettla, J. M. et L. A. Cooley (2003). Workability of Hot Mix asphalt. Transportation Research Board Annual Meeting. Washington D.C.: 23.
- Gudimettla, J. M., L. A. Cooley, et al. (2004). "Workability of Hot-Mix Asphalt." Transportation Research Record N°1891: 9.
- Gustavsson, B. et U. Lillbroända (1996). Nynas Workability Test. Eurasphalt & Eurobitume Congress 1996. Strasbourg (France): 7.
- Hakim, H., S. Said, et al. (2008). Evaluation of indirect tensile test according to EN standard. Eurasphalt & Eurobitume Congress 2008. Copenhagen (Denmark).
- Häkkinen, T. et K. Mäkelä (1996). Environmental impact of concrete and asphalt pavement. Espoo (Finland), Technical Research Center of Finland (VTT): 95.
- Harder, G., Y. LeGoff, et al. (2008). Energy and environmental gains of warm and half-warm asphalt mix: quantitative approach. Transportation Research Board Annual Meeting. Washington D.C.: 20.
- Harvey, J., N. Santero, et al. (2010). Pavement life cycle assessment workshop, University of California Pavement Research Center (UCPRC).
- Hassan, M. M. (2009). Life-Cycle Assessment of Warm-Mix Asphalt: An Environmental and Economic Perspective. Transportation Research Board Annual Meeting. Washington D.C.: 15.
- Hendrickson, C. T., A. Horvath, et al. (1997). Comparing Two Life Cycle Assessment Approaches: A Process Model- vs Economic Input-Output-Based Assessment. International Symposium on Electronics and the Environment IEEE: 5.
- Hertig, J.-A. (2006). Etudes d'impact sur l'environnement, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR)
- Horvath, A. et C. Hendrickson (1998). "Comparison of Environmental Implications of Asphalt and Steel-Reinforced Concrete Pavements." Transportation Research Record N°1626: 9.
- Huang, Y., R. Bird, et al. (2009). "Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements." Journal of Cleaner Production 17: 14.
- Hurley, G. C. et B. D. Prowell (2005). Evaluation of Aspha-min zeolite for use in warm mix asphalt. Auburn University, National Center for Asphalt Technology (NCAT).
- Hurley, G. C. et B. D. Prowell (2005). Evaluation of Sasobit for use in warm mix asphalt. Auburn University, National Center for Asphalt Technology (NCAT).
- Hurley, G. C. et B. D. Prowell (2006). Evaluation of Evotherm for use in warm mix asphalt. Auburn University, National Center for Asphalt Technology (NCAT).
- Jahromi, S. G. et A. Khodaii (2009). Investigation of variables affecting resilient modulus in asphalt mixes. GeoHuman International Conference 2009. Geotechnical special publication N° 191: 56-64.
- Janez, F. et A. Appriou (1996). "Théorie de l'Evidence et cadres de discernement non exhaustifs." Traitement du signal 13(N°3): 14.
- Jenkins, K. J. (2000). Mix design considerations for cold and half-warm bituminous mixes with emphasis on foamed bitumen. Civil Engineering, University of Stellenbosch: 368.
- Jolliet, O., M. Margni, et al. (2003). "IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology." The International Journal of Life Cycle Assessment 8: 324-330.

- Jolliet, O., M. Saadé, et al. (2005). *Analyse du cycle de vie - comprendre et réaliser un écobilan*. Lausanne.
- Jullien, A., P. Monéron, et al. (2006). "Air emissions from pavement layers composed of varying rates of reclaimed asphalt." *Resources, Conservation and Recycling* 47: 19.
- Jullien, A., A. Ventura, et al. (2004). *Life Cycle Inventory of Reclaimed Asphalt Pavement*. Eurasphalt & Eurobitume Congress 2004. Vienna (Austria): 13.
- Junod, A. et A.-G. Dumont (2005). *Formulation et optimisation des formules d'enrobés*. p. O.-. Office Fédéral des Routes. Lausanne (Switzerland), EPFL-LAVOC: 81.
- Keller, H. R. et D. L. Massart (1990). "Program for Pareto-optimality in multicriteria problems." *Trends in analytical chemistry* 9: 3.
- Kim, Y. R., Y. Seo, et al. (2004). "Dynamic modulus testing of asphalt concrete in indirect tension mode." *Transportation Research Record* 1891: 163-173.
- Klein, L. et A. Lawrence (2004). *Sensor and Data Fusion: A Tool for Information Assessment and Decision Making*. S. P. Monograph: 319.
- Koenders, B. G., C. Bowen, et al. (2000). *Innovative process in asphalt production and application to obtain lower operating temperatures*. Eurasphalt and Eurobitume Congress 2000. Barcelona (Spain): 11.
- Koenders, B. G., D.A.Stoker, et al. (2002). *WAM-Foam, asphalt production at lower operating temperatures*. International Society for Asphalt Pavement ISAP 2002. Copenhagen (Denmark): 12.
- Kristjansdottir, O., L. Michael, et al. (2007). *Assessing the Potential for Warm Mix Asphalt Technology Adoption*. Transportation Research Board Annual Meeting. Washington D.C.: 19.
- Kvasnak, A., R. West, et al. (2009). *Case Study of Warm Mix Asphalt Moisture Susceptibility in Birmingham*. Transportation Research Board Annual Meeting. Washington D.C.: 13.
- Landa, P. A., T. Kneepkens, et al. (2004). *Low temperature-asphalt, a production process with the possibility to produce and pave hot mix asphalt at temperatures below 100°C or 212°F*. Eurasphalt & Eurobitume Congress 2004. Vienna (Austria): 7.
- Larsen, O. R., O. Moen, et al. (2004). *WAM Foam asphalt production at lower operating temperatures as an environmental friendly alternative to HMA*. Eurasphalt & Eurobitume Congress 2004. Vienna (Austria): 10.
- Lecomte, M., F. Deygout, et al. (2008). *Emission and occupational exposure at lower asphalt production and laying temperatures*. Eurasphalt & Eurobitume Congress 2008. Copenhagen (Denmark): 8.
- Lim, C.-T., S.-A. Tan, et al. (1995). "Specimen size effects on the diametrical mechanical testing of cylindrical asphalt mixes." *Journal of Testing and Evaluation (JTEVA)* 23(Nov. 1995): 436-441.
- Loi (1985). *Ordonnance sur la protection de l'air (OPair)*, Assemblée Fédérale de la Confédération suisse: 98.
- Loi (1998). *Loi sur l'énergie (LEne)*, Assemblée Fédérale de la Confédération suisse: 18.
- Loi (1999). *Loi fédérale sur la réduction des émissions de CO₂*, Assemblée Fédérale de la Confédération suisse: 10.
- Loulizi, A., G. W. Flintsch, et al. (2006). "Comparing resilient modulus and dynamic modulus of hot-mix asphalt as material properties for flexible pavement design." *Transportation Research Record* N° 1970: 161-170.

- Luminari, M. et A. Fidato (1998). State of the Art Report on Mix Design. RILEM Report: Bituminous Binders and Mixes. L. Franken. 17: 32.
- Mallick, R. B., J. Bergendahl, et al. (2009). A Laboratory Study on CO₂ Emission Reductions Through the Use of Warm Mix Asphalt. Transportation Research Board Annual Meeting. Washington D.C.: 18.
- Mamlouk, M. S. et R. T. Sarofim (1988). Modulus of asphalt mixtures - An unresolved dilemma.
- Marchand, J.-P., S. Soliman, et al. (2008). Performance and environmental assessment of the warm bituminous mixes with Aspha-min. Eurasphalt & Eurobitume Congress 2008. Copenhagen (Denmark): 9.
- Marshall, R. et J. Fifer (2009). IEEA Technical Support - Asphalt Sector Guide - Sector Version. Manchester (UK), Environ: 96.
- Massaglia, R. et A. Ostanello (1989). N-tomic: A Support System for Multicriteria Segmentation Problem. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Springer-Verlag: 167-174.
- Maystre, L. Y., J. Pictet, et al. (1994). Méthodes multicritères ELECTRE. Lausanne (Switzerland), Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- Meil, J. (2006). A life cycle perspective on concrete and asphalt roadways: embodied primary energy and global warming potential. Ottawa (Canada), Athena Institute: 68.
- Mena, S. B. (2004). "Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision." Biotechnology, Agronomy, Society and Environment (BASE) 4: 10.
- Middleton, B. et R. W. Forfylyow (2009). An evaluation of warm mix asphalt produced with the double barrel green process. Transportation Research Board Annual Meeting. Washington D.C.: 14.
- Mousseau, V. (1992). "Analyse et classification de la littérature traitant de l'importance relative des critères en aide multicritère à la décision." Recherche opérationnelle 26(4): 22.
- Mroueh, U.-M., P. Eskola, et al. (1999). Life cycle assessment of road construction, Finnish National Road Administration: 59.
- Muench, S. T. (2010). Roadway Construction Sustainability Impacts: A Review of Life Cycle Assessments. Transportation Research Board Annual Meeting. Washington D.C.: 18.
- Nikkonen, J. (1996). The life-cycle assessment of bitumen. Eurasphalt & Eurobitume Congress 1996. Strasbourg (France): 11.
- NTUA (2006). Life Cycle Assessment of Road Pavement. SUSCON Project (Sustainable Construction in Public and Private Works through IPP), National Technical University of Athens: 28.
- Nunn, M. E. et T. M. Smith (1997). Improvements to the indirect tensile stiffness modulus test. 2nd European Symposium - Performance and durability of bituminous materials, Leeds.
- OFEFP (2001). Recommandations sur la mesure des émissions de polluants atmosphériques des installations fixes, Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage (OFEFP): 175.
- Ohlson, K. G. (1988). "Demonstration of KGOII asphalt mix production." Bulletin 75.
- Olard, F. (2003). Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures - Relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé, Institut national des sciences appliquées de Lyon: 226.
- Olard, F., C. L. Noan, et al. (2008). Low Energy Asphalts for Sustainable Road Construction. Eurasphalt & Eurobitume Congress 2008. Copenhagen (Denmark): 12.

- Olard, F., F. Noël, et al. (2005). "Mesure du module en compression diamétrale des enrobés bitumineux." *Revue générale des routes et aérodromes* N°844: 77-83.
- Olard, F., F. Noël, et al. (2006). "Modulus testing in indirect tension mode." *Road Materials and Pavement Design* 7(N° 4/2006): 543-554.
- ONU (1998). *Protocole de Kyoto à la convention-cadre des Nations-Unies sur les changements climatiques*. Kyoto (Japon): 24.
- Ould-Henia, M. (2005). *Modélisation et prédiction du comportement rhéologique des mélanges bitume caoutchouc*. Génie Civil. Lausanne, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne: 177.
- Paranhos, R. S. (2007). *Approche multi-échelles des émissions d'un procédé d'élaboration des enrobés à chaud*. Physique, Université de Rouen: 295.
- Pilloud, A. et M. Pittet (2010). *Effet de l'ajout d'un additif plastifiant (cire Sasobit) sur le comportement aux déformations permanentes d'un enrobé AC T 22S au liant 50/70 par comparaison avec un enrobé ne comportant pas d'additif*, EPFL-LAVOC: 65.
- Pittet, M., N. Bueche, et al. (En cours). *Formulation d'enrobés avec revêtements recyclés*. Projet VSS 2005/456, EPFL-LAVOC.
- Prowell, B. D. et G. C. Hurley (2007). *Warm-Mix Asphalt: Best Practices*. Lanham (USA).
- Pucci, T. (2000). *Approche prévisionnelle de la fissuration par sollicitation thermique des revêtements bitumineux*. Génie civil. Lausanne, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Radenberg (2006). *Merkblatt für Temperaturabsenkung von Asphalt M TA*, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen.
- Raess, E. et M. Pittet (2008). *Réduction de la consommation d'énergie des enrobés bitumineux*. Lausanne (Suisse), EPFL-LAVOC: 45.
- Ramani, T. L., L. Quadrifoglio, et al. (2009). *Improving the Performance-Measurement Based MCDM Approach for Transportation Planning Applications*. Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D.C.: 17.
- Ripoll, J. O. et C. M. Farré (2008). *Evaluation of greenhouse gas emissions from the production of hot asphalt mixtures*. Eurasphalt & Eurobitume Congress 2008. Copenhagen (Denmark): 10.
- Rode, F. (1983). "Das KGO Verfahren: Praxiserfahrungen mit einem neuen Mischprinzip für die Herstellung von bitumonösem Mischgut." *Die Asphaltstrasse* N°3/83: 4.
- Romier, A., M. Audéon, et al. (2004). "L'enrobage à basse énergie (EBE) aux performances des enrobés à chaud." *Revue générale des routes et aérodromes* N°831: 7.
- Romier, A., M. Audéon, et al. (2006). *Low-energy asphalt (LEA) with the performance of hot-mix asphalt*. Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D.C.: 23.
- Romier, A., M. Audéon, et al. (2006). "Low-Energy Asphalt with Performance of Hot-Mix Asphalt." *Transportation Research Record* N°1962: 101-112.
- Roy, B. (1968). "Classement et choix en présence de points de vues multiples." *Revue française d'automatique, d'informatique et de recherche opérationnelle* Tome 2: 18.
- Roy, B. (1991). "The outranking approach and the foundations of Electre methods." *Theory and Decision* 31: 24.

Sandoval, G. et G. Thenoux (2011). Stiffness modulus behavior in hot mix asphalt. Transportation Research Board Annual Meeting. Washington D.C.: 16.

Sauzéat, C., H. D. Benedetto, et al. (2008). Fatigue behaviour of half-warm mix asphalts. International Society for Asphalt Pavement ISAP 2008. Zürich (Suisse): 231-241.

Sayagh, S. (2007). Approche multicritère de l'utilisation de matériaux alternatifs dans les chaussées. Structures et Matériaux, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

Schärlig, A. (1985). Décider sur plusieurs critères, Presses Polytechniques Romandes.

SETRA (1994). Conception et dimensionnement des structures de chaussée - Guide technique, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA).

Shanian, A., A. S. Milani, et al. (2008). "A new application of ELECTRE III and revised Simos' procedure for group material selection under weighting uncertainty." Knowledge-Based Systems 21: 12.

Sheth, N. M. (2010). Evaluation of selected warm mix asphalt additives, University of Iowa. Master Thesis: 121.

Sicard, D. (2006). Réalisations à basses températures des enrobés denses et des asphaltes. Journée Technique LAVOC 2006, Lausanne (Suisse).

Simos, J. (1989). L'évaluation environnementale: Un processus cognitif négocié. Génie rural. Lausanne, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne: 340.

Simos, J. (1990). Evaluer l'impact sur l'environnement - Une approche originale pour l'analyse multicritère et la négociation, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.

Soenen, H., T. Tanghe, et al. (2008). A laboratory study on the use of waxes to reduce paving temperatures. Eurasphalt & Eurobitume Congress 2008. Copenhagen (Denmark): 12.

Solomon, S., D. Qin, et al. (2007). Fourth Assessment Report of the IPCC - Climate change 2007: The physical Science Basis, The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): 1166.

Steen, B. (1999). A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS). Version 2000 - General system characteristics, Chalmers University of Technology. Technical Environment Planning: 67.

Steuperaert, J. et A. Vanelstraete (1997). Code de bonne pratique pour la formulation des enrobés bitumineux. Bruxelles (Belgium).

Stripple, H. (2000). Life Cycle Inventory of Asphalt Pavements. Gothenburg (Sweden), Swedish Environmental Research Institute (IVL): 84.

Stripple, H. (2001). Life cycle assessment of a road - A pilot study for inventory analysis. Gothenburg (Sweden), Swedish Environmental Research Institute (IVL): 96.

Sugair, F. H. et J. A. Almudaiheem (1992). "Variations in measured resilient modulus of asphalt mixes." Journal of materials in civil engineering N°4: 343-352.

Sunghwan, K. et B. J. Coree (2005). Evaluation of Hot Mix Asphalt Moisture Sensitivity Using the Nottingham Asphalt Test Equipment. IHRB Project TR-483, Iowa State University: 63.

Taroun, A. et J.-B. Yang (2010). "Dempster-Shafer Theory of Evidence: Potential usage for decision making and risk analysis in construction project management." Journal of the Built and Human Environment Review: 14.

- Tille, M. (2000). Choix de variantes d'infrastructure routières: méthodes multicritères. Génie civil. Lausanne, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne: 388.
- Treloar, G. J., P. E. D. Love, et al. (2004). "Hybrid Life-Cycle Inventory for Road Construction and Use." *Journal of Construction engineering and management*(January/February 2004): 6.
- Tschoegl, N. W., W. G. Knauss, et al. (2002). "Poisson's ratio in linear viscoelasticity - A critical review." *Mechanics of Time-Dependant Materials* 6: 3-51.
- Vasconcelos, K. L., A. Bhasin, et al. (2010). "Influence of Reduced Production Temperatures on the Adhesive Properties of Aggregate and Laboratory Performance of Fine Aggregate-Asphalt Mixtures." *Road Materials and Pavement Design* 11(N°1/2010): 47-64.
- Ventura, A., A. Jullien, et al. (2008). "L'évaluation environnementale des infrastructures routières par la méthode des modules routiers." *Revue générale des routes et aérodromes* N° 865.
- Ventura, A., P. Monéron, et al. (2007). Données environnementales d'un procédé d'enrobage: quelles incertitudes? 18ème Congrès Français de Mécanique. Grenoble (France): 6.
- Ventura, A., P. Monéron, et al. (2009). Environmental comparison at industrial scale of hot and half-warm mix asphalt manufacturing processes. Transportation Research Board Annual Meeting. Washington D.C.: 12.
- Viranaiken, V., V. Gaudefroy, et al. (2010). A new asphalt fume generator: Development of an original sequential mixing and sampling protocol. Transportation Research Board Annual Meeting. Washington D.C.: 22.
- Visscher, J. D., F. Vervaecke, et al. (2008). Asphalt production at reduced temperatures and the impact on asphalt performance. International Society for Asphalt Pavement ISAP 2008. Zürich (Switzerland): 12.
- Visscher, J. D., F. Vervaecke, et al. (2010). "Asphalt Production at Reduced Teemperatures using Zeolites and the Impact on Asphalt Performance." *Road Materials and Pavement Design* 11(N°1/2010): 65-81.
- Wagner, M. (2010). Temperaturabgesenkte Asphalte: gebrauchsverhaltenorientierte Untersuchungen an Bitumen und Asphalten. Professur für Strasses- und Flugbetriebflächenbau, Universität Wien: 176.
- Wagner, M., K. Stangl, et al. (2008). Fischer-Tropsch paraffin modified bitumen - performance parameter and reduction of energy consumption. International Society for Asphalt Pavement ISAP 2008. Zurich (Switzerland): 10.
- Wagner, M., M. P. Wistuba, et al. (2008). Low viscous asphalt mixtures - a critical review of FT paraffin modified mixture properties using performance-based test methods. Transport Research Arena Europe 2008. Ljubljana (Slovenia): 8.
- Wang, M., H. Lee, et al. (2004). "Allocation of Energy Use in Petroleum Refineries to Petroleum Products." *The International Journal of Life Cycle Assessment* 9: 34-44.
- Wang, Y.-M., J.-B. Yang, et al. (2006). "Environmental impact assessment using the evidential reasoning approach." *European Journal of Operational Research* 174: 29.
- Wasiuddin, N. M., S. Selvamohan, et al. (2007). "Comparative Laboratory Study of Sasobit and Aspha-min Additives in Warm-Mix Asphalt." *Transportation Research Record* N° 1998: 82-88.
- Wasiuddin, N. M., S. Selvamohan, et al. (2007). A comparative laboratory study of Sasobit and Aspha-min in warm mix asphalt. Transportation Research Board Annual Meeting. Washington D.C.: 12.

- Wattin, M. (2011). Travail pratique de Master - Comportement thermomécanique des enrobés tièdes. Lausanne, EPFL-LAVOC.
- Wayman, M., I. Schiavi-Mellor, et al. (2010). Further guidance to accompany the protocol for the calculation of life cycle greenhouse gas emissions generated by asphalt used in highways - Part of the asphalt Pavement Embodied Carbon Tool (asPECT), Transport Research Laboratory (TRL).
- Weiland, C. et S. T. Muench (2010). Life Cycle Assessment of Interstate Highway Pavement Reconstruction Options in Seattle, Washington. Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D.C.: 18.
- Wielinski, J., A. Hand, et al. (2009). Laboratory and Field Evaluations of Foamed Warm Mix Asphalt Projects. Transportation Research Board Annual Meeting. Washington D.C.: 18.
- Witczak, Mirza, et al. (2003). MEPDG - Appendix CC-3: Updated traffic frequency calculation for asphalt layers. NCHRP.
- Yang, J.-B. (2001). "Rule and utility based evidential reasoning approach for multiattribute decision analysis under uncertainties." *European Journal of Operational Research* 131: 31.
- Yang, J.-B. et M. G. Singh (1994). "An Evidential Reasoning Approach for Multiple-Attribute Decision Making with Uncertainty." *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics* 24(1): 18.
- Yang, J.-B. et D.-L. Xu (2002). "On the Evidential Reasoning Algorithm for Multiple Attribute Decision Analysis Under Uncertainty." *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics* 32(3): 16.
- Zapata, P. et J. Gambatese (2005). "Energy Consumption of Asphalt and Reinforced Concrete Pavement Materials and Construction." *Journal of Infrastructure Systems*(March 2005).
- Zaumanis, M. (2010). Warm Mix Asphalt Investigation, Technical University of Denmark. Master of Science Theses: 111.
- Zionts, S. et J. Wallenius (1976). "An Interactive Programming Method for Solving the Multiple Criteria Problem." *Management Science* N°22: 13.

12.ANNEXES

Liste des annexes

Annexe A : Approche performantielle en laboratoire (Chapitre 4)

- A1 Essai sur liant : Détermination de la pénétrabilité à l'aiguille
- A2 Essai sur liant : Détermination du point de ramollissement – Méthode Bille et Anneau
- A3 Liant : Calcul de l'indice de pénétration
- A4 Essai sur liant : Détermination du point de fragilité Fraass
- A5 Essai sur liant : Détermination de la viscosité dynamique
- A6 Essai sur liant : Fluage en flexion à basse température
- A7 Méthode SUPERPAVE de classification des liants
- A8 Essai sur enrobé : Presse à cisaillement giratoire (PCG)
- A9 Essai sur enrobé : Compactage Marshall
- A10 Essai sur enrobé : Essai Marshall
- A11 Essai sur enrobé : Essai d'orniérage
- A12 Essai sur enrobé : Détermination de la résistance à la traction indirecte des éprouvettes
- A13 Essai sur enrobé : Détermination de la sensibilité à l'eau

- A14 Essai sur enrobé : Module complexe sur éprouvettes trapézoïdales
- A15 Essai sur enrobé : Essai de fatigue sur éprouvettes trapézoïdales
- A16 Représentation des résultats de module complexe
- A17 Fiche de reconstitution de la courbe théorique en fonction des composants bruts
- A18 Protocole de fabrication (exemple)
- A19 Mesure de viscosité sur mastic et liant : Mode opératoire rhéomètre à cisaillement dynamique
- A20 Mesure de viscosité sur mastic et liant : Résultats complémentaires
- A21 Résultats complémentaires aux essais de caractérisation étendus et essais performantiels
- A22 Test de Student
- A23 Essais de module complexe sur enrobé

Annexe B : Mise en place de l'essai de module sécant (Chapitre 5)

- B1 Définition des PID
- B2 Particularités relatives à l'enceinte thermique
- B3 Modèle de Burger
- B4 Proposition d'une procédure de conditionnement des échantillons
- B5 Mode opératoire pour la réalisation de l'essai IT-CY
- B6 Exemple de fiche d'essai IT-CY

Annexe C : Considérations énergétiques et environnementales (Chapitre 6)

- C1 Enquête de consommation énergétique et d'émissions en centrale suisse (formulaire vierge)
- C2 Consommation énergétique de centrales suisses (résultat d'enquête)
- C3 Emissions en centrales suisses (résultat d'enquête)
- C4 Energie de chauffage des composants
- C5 Energie de chauffage du malaxeur
- C6 Exemple de résultat de calcul avec le logiciel ECOROOT
- C7 Analyse paramétrique : Cas de base
- C8 Analyse de la consommation énergétique en centrale

Annexe D : Modèle multicritère – Partie 1 (Chapitre 7)

- D1 Ecran d'accueil et de navigation
- D2 Base de données pour inventaire du cycle de vie
- D3 Résultat d'inventaire du cycle de vie (exemple)
- D4 Etablissement des indices de performance (exemple)

D5 Fiche de synthèse de l'ICV et des indicateurs de performances (exemple)

Annexe E : Modèle multicritère – Partie 2 (Chapitre 8)

E1 Ecran d'accueil et de navigation

E2 Niveau 1 : Analyse Pareto

E3 Niveau 2 : Analyse graphique

E4 Niveau 3 : Agrégation partielle

E5 Niveau 4 : Agrégation complète

E6 Agrégation complète : Calcul de la matrice de décision pour critère quantitatif (VBA)

E7 Agrégation complète : Calcul de la matrice de décision pour critère qualitatif (VBA)

E8 Agrégation complète : Algorithme de la théorie de l'Evidence (VBA)

Annexe F : Exemple d'application de la méthodologie d'analyse multicritère (Chapitre 9)

F1 Inventaire du cycle de vie (enrobé REF)

F2 Indices de performance (enrobé REF)

F3 Fiche de synthèse des indicateurs : Enrobé REF (Partie 1 du modèle)

F4 Résultats niveau 1 : Analyse Pareto

F5 Résultats niveau 2 : Analyse graphique

F6 Résultats niveau 3 : Agrégation partielle

F7 Résultats niveau 4 : Agrégation complète

Annexe A. Approche performantielle en laboratoire (Chapitre 4)

A1 - Essai sur liant : Détermination de la pénétrabilité à l'aiguille

L'essai est réalisé selon les normes SN 670 511a et EN 1426. Il permet de classer les bitumes selon leur consistance. L'essai de pénétration consiste à mesurer l'enfoncement d'une aiguille normalisée dans un échantillon de bitume sous une charge de 100 g. et à une température de 25 °C (pour la détermination de la classe de bitume en Europe). La pénétration, exprimée en 10^{-1} mm, correspond à la profondeur d'enfoncement de l'aiguille.

La répétabilité indiquée dans la norme EN 1426 pour les conditions d'essai mentionnées est de 4% de la valeur moyenne dans le cas de liants de pénétrabilité $\geq 50 \cdot 10^{-1}$ mm.

A2 - Essai sur liant : Détermination du point de ramollissement – Méthode Bille et Anneau

Le point de ramollissement anneau et bille (A&B) est évalué selon les normes SN 670 512 et EN 1427. L'essai consiste à déterminer la température à laquelle une bille métallique imprime à un échantillon de bitume contenu dans un anneau une déformation définie. La vitesse d'échauffement lors de l'essai est constante (5 °C/min.). L'essai est stoppé lorsque le bitume, se déformant, touche le repère (plaque). Le résultat de l'essai est le point de ramollissement A&B, exprimé en °C, à laquelle le bitume se déformant touche la plaque.



Figure 12-1 : Dispositif pour détermination du point de ramollissement Anneau et Bille

La norme EN 1427 indique une valeur de répétabilité entre 1 et 1.5 °C pour la détermination de la température anneau et bille.

A3 - Liant : Calcul de l'indice de pénétration

L'indice de pénétration (IP), défini dans la norme EN 12591, n'est pas un essai mais un indice dérivé des résultats d'essai de pénétration et du point de ramollissement anneau et bille (A&B). Cet indice caractérise la susceptibilité thermique des bitumes, c'est-à-dire l'influence de la température sur la consistance. L'indice de pénétration est calculé ainsi :

$$IP = \frac{20(t_{AB} - t_p) - 500(\log_{10}(800) - \log_{10}(P_t))}{(t_{AB} - t_p) + 50(\log_{10}(800) - \log_{10}(P_t))}$$

IP Indice de pénétration

t_{AB} Température anneau et bille [°C]

t_p Température de l'essai de pénétration (en général 25 °C)

P_t Pénétration à la température t_p [10^{-1} mm]

Dans un graphique contenant en abscisse le point de ramollissement A&B et en ordonnée la pénétration à 25 °C (échelle logarithmique), les bitumes de même pénétration sont alignés. L'IP permet de classer les bitumes selon leur susceptibilité thermique : plus l'indice IP est élevé et moins le bitume est susceptible à la température. Les bitumes très susceptibles auront un indice fortement négatif.

A4 - Essai sur liant : Détermination du point de fragilité Fraass

Le point de fragilité Fraass est déterminé selon les normes SN 670 507 et EN 12593. Il permet de décrire les performances du bitume aux très basses températures (jusqu'à -30 °C). L'essai consiste à déposer un film de bitume (0.5 mm d'épais) sur une lame métallique élastique, puis à imposer à la lamelle des déformations par flexion. Le dispositif d'essai est placé dans une enceinte réfrigérante dont la température est régulièrement abaissée jusqu'à obtenir la rupture du film de liant. La vitesse de refroidissement est de 1 °C/min. Dès que la température atteint 10 °C de plus que le point de Fraass prévu, une flexion d'une durée de 11-12 s. est effectuée chaque minute avant relaxation. Le résultat de l'essai est la température Fraass, exprimée en degré °C, à laquelle se produit la première fissure visible à l'œil nu à la flexion maximale.

La norme EN 12593 indique une valeur de répétabilité de 3 °C pour la détermination du point de fragilité Fraass.

A5 - Essai sur liant : Détermination de la viscosité dynamique

Dans le cadre de notre recherche, la viscosité dynamique est déterminée à l'aide du viscosimètre cône et plaque (SN 670 500-5, EN 12596). Le liant est déposé sur une plaque réceptrice chauffante avant d'abaisser un cône (angle très ouvert), pointe vers le bas, sur la plaque. L'espace entre le cône et la plaque est alors rempli de liant. La mise en rotation du cône impose un gradient de cisaillement constant en cours d'essai. La vitesse de rotation peut par contre être variée selon la température d'essai.

Soit :

α Angle d'ouverture du cône [°]

ω Vitesse angulaire [rad/s]

Le gradient de vitesse est exprimé par : $D = \frac{\omega}{\alpha}$

La contrainte de cisaillement : $\tau = \frac{M}{\frac{2}{3}\pi R^3}$

La viscosité dynamique est donc : $\eta = \frac{\tau}{D} = \frac{M}{\omega} \cdot \frac{3\alpha}{2\pi R^3}$

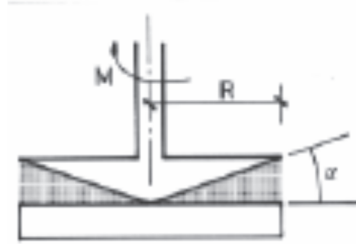


Figure 12-2 : Viscosimètre cône et plaque (gauche : (Dumont 2003))

Ce viscosimètre est utilisé au Lavoc pour les mesures sur liant. Un rhéomètre à plans parallèles (rhéomètre à cisaillement dynamique – Dynamic Shear Rheometer), imposant une sollicitation rotationnelle variable a été utilisé pour les mesures sur mastic. Ce dispositif est décrit plus loin.

A6 - Essai sur liant : Fluage en flexion à basse température

L'essai de fluage en flexion à basse température (Bending Beam Rhometer – BBR) est appliqué selon les normes SN 670 560 et EN 14771. Cet essai permet de déterminer la courbe de fluage dans le domaine des basses températures, par flexion d'un barreau de bitume posé sur deux appuis et soumis à une charge centrale.

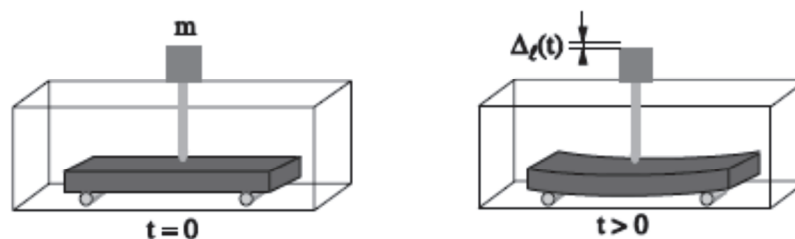


Figure 12-3 : Essai de fluage en flexion à basse température BBR (Corté et Di Benedetto 2005)

A partir des dimensions du barreau et de la force appliquée, la contrainte σ et la déformation ε du barreau en son milieu peuvent être calculés. Ensuite, le module en flexion $S(t,T)$ est donné par le rapport entre contrainte et déformation. Il est exprimé ainsi :

$$S(t, T) = \frac{PL^3}{4bh^3\Delta l(t, T)}$$

P Charge [N]

L Longueur du barreau entre les supports [mm]

b Largeur du barreau [mm]

h Epaisseur du barreau [mm]

Δl Flèche du barreau au temps de chargement t et pour une température T [mm]

Ainsi, pour différentes températures d'essais T et temps de chargement t , des courbes de module en flexion $S(t, T)$ peuvent être tracées. Ensuite, pour chaque température, le module de rigidité à 60 secondes de temps de chargement $s(60)$ peut être tracé et les isochrones correspondantes dessinées.

A7 - Méthode SUPERPAVE de classification des liants

Les spécifications européennes des bitumes routiers sont consignées dans la norme EN 12591. Pour chaque type de bitume, les valeurs limites des principaux essais y sont décrites. Les classes de bitumes sont différenciées par les valeurs minimales et maximales de pénétration à 25 °C (par exemple, bitume 50/70).

Les spécifications américaines des liants, appelées SUPERPAVE (superior performance asphalt pavement), sont issues du programme de recherche SHRP (strategic highway research program). L'objectif consistait alors à mettre au point un programme et rechercher des méthodes d'essais permettant de caractériser les liants bitumineux de façon rationnelle et non empirique. L'approche est sensiblement différente de celle mise en place dans la plupart des pays européens puisque la classification SUPERPAVE peut être directement mise en relation avec le domaine d'utilisation du liant. Les spécifications SUPERPAVE étaient initialement applicables à la fois aux bitumes purs et aux bitumes modifiés. Leur applicabilité aux bitumes modifiés est depuis passablement discutée. Les spécifications sont basées sur des niveaux admissibles de rigidité des liants, vieilliss ou non, pour des conditions spécifiques de climat et de trafic. Les différents grades de liants sont qualifiés par rapport à un couple de températures extrêmes haute et basse, avant d'être ajustés en fonction de deux facteurs relatifs au trafic. Les conditions climatologiques sont caractérisées par :

- Température maximale de la chaussée pour les 7 jours consécutifs les plus chauds.
- Température minimale de la chaussée pour la journée la plus froide.

Un liant est spécifié ainsi :

PG x-y	PG	Performance Grade
	x	Température haute (°C) à laquelle le liant est supposé travailler. Il s'agit de la température au-dessus de laquelle le bitume est susceptible de présenter des phénomènes de déformations irréversibles.
	y	Température basse (°C) à laquelle le liant est supposé travailler. Il s'agit de la température limite au-dessous de laquelle le bitume est susceptible de se fissurer par retrait thermique.

Pour les spécifications, des tests sont effectués sur les liants dans trois différents états :

- Non vieilli.
- Vieilli à court terme par l'essai RTFOT (Rolling Thin-Film Oven Test). Ce vieillissement simule le vieillissement lors de la production de l'enrobé et de sa pose.
- Vieilli à long terme par les essais RTFOT et PAV (Pressure aging vessel). Ceci simule un vieillissement de 5-10 ans.

Ces spécifications visent à lutter contre :

- L'orniérage à haute température. Pour cela, un module de rigidité minimal avant (1.0 kPa) et après (2.2 kPa) vieillissement à court terme est fixé. Le module de rigidité ($G^*/\sin\delta$) est déterminé avec le rhéomètre à cisaillement dynamique (dynamic shear rheometer DSR). G^* représente le module de cisaillement complexe et δ l'angle de déphasage.
- La fissuration thermique à basse température, en fixant un module de rigidité maximal $S(60)=300$ MPa et une valeur minimale de pente de $m(60)=0.3$ après vieillissement à court et long terme. La valeur m représente la susceptibilité au temps de charge qui est la pente de la tangente à la courbe $\log(S)=f(t)$ à $t=60$ secondes. L'essai de fluage en flexion à basse température est utilisé (BBR). La plus élevée des températures obtenues selon les deux critères est considérée comme température basse.
- La fissuration par fatigue (due au trafic) en fixant un module de rigidité maximal à température intermédiaire, après vieillissement à court et long terme ($G^*\sin\delta=5$ MPa).

On peut remarquer que l'essai de rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR) permet d'évaluer le comportement du liant à haute température et sa résistance à l'orniérage ($G^*/\sin\delta$) ainsi que le comportement du liant à la fatigue ($G^*\sin\delta$) pour des températures intermédiaires. De plus, au lieu de réaliser les essais à une température constante et déterminer les paramètres (module de rigidité), l'approche est différente car la température permettant d'atteindre un certain module de rigidité est recherchée.

De manière générale, plus le grade PG « haute température » est élevé, meilleure sera la résistance à l'orniérage car le bitume est plus rigide. Plus le grade PG « basse température » est petit, meilleure sera la résistance aux fissurations thermique. Par contre, plus la différence entre les grades haute et basse température est importante, plus le prix du bitume est élevé. Les incréments entre différentes catégories PG se font par pas de 6 °C.

A8 - Essai sur enrobé : Presse à cisaillement giratoire (PCG)

La presse à cisaillement giratoire (norme EN 12697-31) est utilisée comme mode de compaction d'éprouvettes ainsi que pour évaluer la compactibilité des mélanges bitumineux. Une masse déterminée d'enrobé portée à la température usuelle de fabrication est placée à l'intérieur d'un moule cylindrique préalablement chauffé à une température constante. Le tout est ensuite stabilisé en température avant d'être placé dans la presse à cisaillement giratoire. L'éprouvette, dont l'axe décrit un cône, est ensuite comprimée (pression verticale de 0.6 MPa). L'éprouvette tourne sur elle-même. A chaque instant, sa configuration est un cylindre oblique à faces parallèles. Le centre de la face inférieure est fixe alors que celui de la face supérieure décrit un cercle (30 t/min). L'angle d'inclinaison est de 1° ou 1.25° selon la méthode : L'approche de formulation SUPERPAVE demande un angle de 1.25°, nous utilisons dans notre recherche un angle de 1°.

Le compactage de l'éprouvette est effectué par pétrissage, contrairement au compactage Marshall qui procède par chocs successifs. Il s'agit donc d'efforts de cisaillement au sein du mélange, ce qui favorise le réarrangement granulaire et s'apparente aux sollicitations des engins de compactage sur chantier.

L'essai permet d'obtenir l'évolution de la compacité en fonction du nombre de girations. La courbe de compacité a l'allure d'une droite dans le cas où les girations sont exprimées en coordonnées logarithmiques. L'expression de la droite est la suivante :

$$C(N)=C1+K(\log(N))$$

- C1 Compacité calculée à une giration, caractérise la mise en place initiale du mélange.
- K Pente de la droite de régression, caractérise l'évolution du compactage après la mise en place du mélange.
- N Nombre de girations.
- C(N) Compacité à N girations

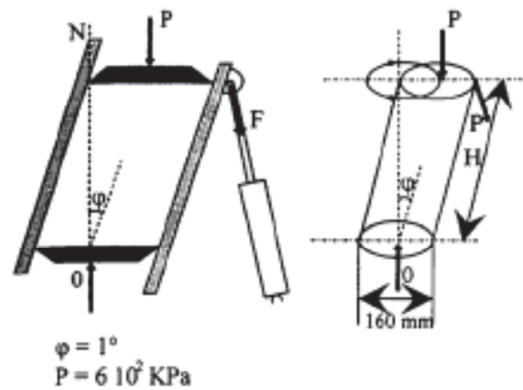


Figure 12-4 : Presse à cisaillement giratoire (Dumont 2003)

A9 - Essai sur enrobé : Compactage Marshall

Le compactage Marshall (normes SN 670 430 et EN 12697-30) est un compactage par chocs successifs d'un marteau (4536 g.) sur un moule (diamètre 101.6 mm, hauteur 76 mm) préalablement rempli d'enrobé et stabilisé à la température de compactage. Le compactage est effectué en laissant tomber le marteau 50 (ou 25) fois sur chacune des faces du moule. La hauteur de chute est de 460 mm.

La teneur en vides des éprouvettes ainsi compactées est déterminée par pesée hydrostatique avant une éventuelle utilisation pour des essais mécaniques. La teneur en vides obtenue sur chantier devrait être proche de la teneur en vides Marshall (50/50).

A10 - Essai sur enrobé : Essai Marshall

L'essai Marshall (normes SN 670 434a et EN 12697-34) consiste tout d'abord à conditionner les éprouvettes (compactage Marshall 50/50) dans un bain thermostatique (60 °C) pendant 40-60 min. Les éprouvettes sont ensuite placées entre les mâchoires de la presse Marshall avant d'être comprimées à la vitesse de 50 mm/mn jusqu'à la rupture de l'éprouvette. L'effort en fonction de la déformation verticale (ou déplacement de la traverse) est enregistré au cours de l'essai (Figure 12-5). Sur la base de cet enregistrement, on détermine l'intersection de la pente maximale de la courbe effort-déformation avec l'abscisse (A), le point où la pente est (presque) nulle (B) ainsi que la projection de B sur l'abscisse (B'). Les paramètres suivants sont ensuite calculés :

- Stabilité Marshall (Sm) : Segment BB', exprimé en kN. La stabilité représente la force maximale appliquée.
- Fluage Marshall (F) : Segment AB', exprimé en mm. Le fluage représente la déformation au maximum de la force.

- Fluage tangentiel F_t : Déformation nominale de l'éprouvette obtenue par extrapolation de la tangente du graphique effort-déformation, avant d'atteindre la stabilité, moins la déformation nominale obtenue par extrapolation de la tangente du graphe effort-déformation, ramenée à une charge nulle.
- Quotient Marshall : Rapport S_m/F

Notons que cette interprétation des courbes effort-déformation n'est pas uniforme dans tous les pays et qu'elle est passablement critiquée.

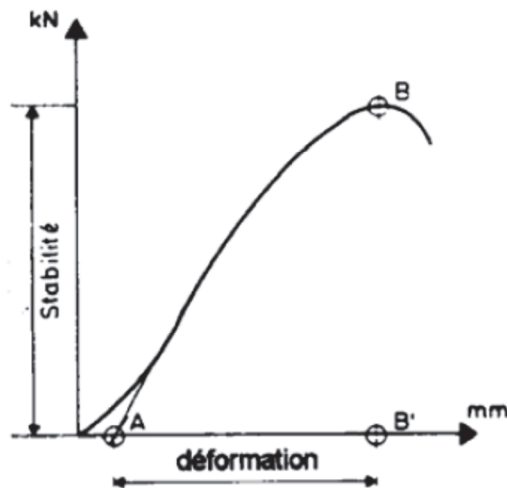


Figure 12-5 : Presse pour essai Marshall (Schéma :(Dumont 2003))

La norme EN 12697-34 indique un écart-type à la répétabilité de respectivement 0.61 kN et 0.25 mm pour la stabilité et le fluage Marshall.

A11 - Essai sur enrobé : Essai d'orniérage

Le compactage des plaques pour l'essai d'orniérage se fait selon les normes SN 670 433 et EN 12697-33. L'appareillage permet de compacter de grands échantillons d'enrobé tout en simulant les conditions de compactage in-situ. La teneur en vides est gérée selon le programme de compactage (type fort ou faible).

L'essai d'orniérage permet d'évaluer le risque de déformations permanentes sous charge de trafic. L'essai appliqué au Lavoc est l'essai d'orniérage « grand modèle » avec orniéreur LPC. L'essai d'orniérage ou simulateur de trafic (normes SN 670 422a-NA, EN 12697-22) consiste à effectuer des allers-retours avec un pneu caoutchouc lisse (pression des pneumatiques 0.6 MPa, force de contact roue-plaque de 5 kN) et à mesurer à intervalle régulier la profondeur de l'ornière. L'essai est effectué à température constante (50 °C ou 60 °C selon le type de couche) et la vitesse est de 1 cycle/s. Lors d'un essai, deux plaques (fabriquées avec la table de compactage ou prélevées in situ) sont testées simultanément. Dans le cadre de notre recherche, les plaques mesurent 18 cm x 50 cm pour une épaisseur de 10 cm (21 kg environ par plaque). Pour un nombre de cycles donnés, la profondeur d'ornière exprimée est la moyenne de 15 points de mesures (5 profils et 3 points par profil). A la fin de l'essai, la courbe de profondeur d'ornière en fonction du nombre de cycles peut être construite. La pente de la courbe d'orniérage (représentation logarithmique) ainsi que l'ornière à 10'000 ou 30'000 cycles sont généralement conservés comme indicateurs (spécifications des normes). L'ornière est exprimée en pourcentage de la hauteur initiale de la plaque testée.

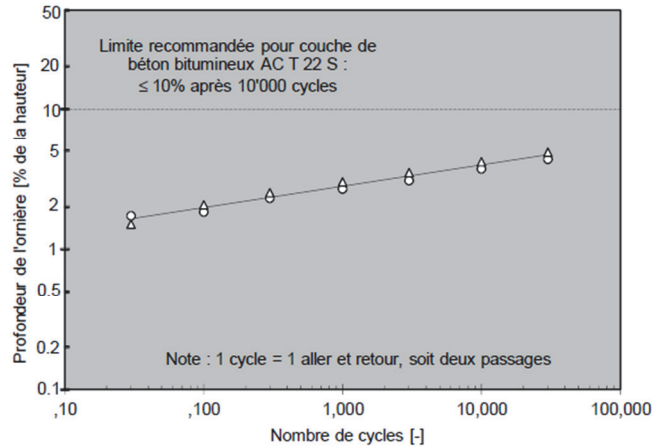


Figure 12-6 : Exemple de courbe d'orniérage au simulateur de trafic léger (STL)

La norme indique des valeurs de fidélité pour le pourcentage de profondeur d'ornière d'éprouvettes préparées en laboratoire de 1.11% à 30'000 cycles de chargement.

A12 - Essai sur enrobé : Détermination de la résistance à la traction indirecte des éprouvettes

L'essai de compression diamétrale (normes SN 670 423 et EN 12697-23) est également appelé essai de traction indirecte ou essai brésilien. L'essai consiste à placer une éprouvette dans une enceinte thermostatée jusqu'à atteinte de la température d'essai désirée. Les éprouvettes sont ensuite placées entre deux plateaux d'une presse permettant d'enregistrer la charge et la déformation verticale. La charge est appliquée jusqu'à rupture de l'éprouvette. La vitesse de déformation est maintenue constante durant l'essai ; cette vitesse variant selon la température d'essai.

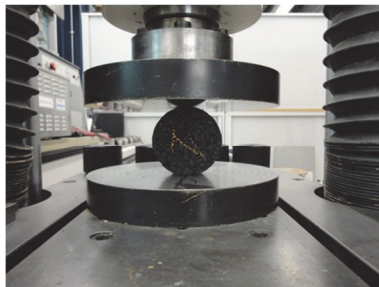


Figure 12-7 : Essai de compression diamétrale

Sur la base de cet essai, la contrainte à la rupture σ_{rup} et la déformation à la rupture ε_{rup} peuvent être déterminés.

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

$$\varepsilon_{rup} = \frac{\Delta D}{D}$$

- P Charge de rupture [N]
- h Hauteur de l'éprouvette [mm]
- D Diamètre de l'éprouvette [mm]
- ΔD Déplacement vertical [mm]

Dans le cadre de cette recherche, les essais de compression diamétrale sont réalisés à des températures de -10 °C, 15 °C et 40 °C, sur des éprouvettes Marshall 50/50. Le temps de mise en température ainsi que les conditions d'essais (vitesse d'écrasement, mode d'application de la charge) sont issues de (Assef-Vaziri, Pigois et al. 1984) qui recommande pour la vitesse de chargement 18 mm/min à -10 °C et 48 mm/min à 15 °C et 40 °C. La sollicitation des éprouvettes est réalisée sans bande de chargement. La déformation verticale est enregistrée. La déformation horizontale n'étant pas enregistrée, le coefficient de Poisson et le module de Young ne peuvent être déterminés. Pour chaque cas (température, méthode de conditionnement), trois éprouvettes sont testées et la valeur moyenne est conservée.

Selon la norme EN, les valeurs obtenues sont conservées si la différence à la traction indirecte entre les éprouvettes ne s'écarte pas de plus de 17%.

A13 - Essai sur enrobé : Détermination de la sensibilité à l'eau

La tenue à l'eau est évaluée à partir de la réduction de résistance d'éprouvettes conservées en immersion dans l'eau. L'essai de sensibilité à l'eau ITSR (indirect tensile strength) est appliqué dans cette recherche (normes SN 670 412a-NA et EN 12697-12, méthode A). Les éprouvettes utilisées sont issues d'un compactage Marshall avec 25 coups sur chacune des faces. Un lot de 8 éprouvettes est divisé en deux groupes homogènes. Le premier groupe contient les éprouvettes conservées à sec, à 25 °C. Les éprouvettes du second groupe sont, après avoir été mises sous vide, conservées dans un bain d'eau à 40 °C pour une durée située entre 68 et 72 heures. Les différents corps d'épreuve sont ensuite ramenés à la température de 25 °C pendant 2 heures avant réalisation de l'essai. L'essai consiste en un essai de traction indirecte, avec utilisation des bandes de chargement. La résistance à la compression diamétrale de chacun des deux lots (avec et sans conditionnement dans l'eau) est déterminée. Le ratio ITSR est le rapport en pourcentage des résistances à la traction indirecte des deux groupes d'échantillons (rapport des résistances après immersion sur celles sans immersion).

L'essai ITSR est un essai de caractérisation retenu en Suisse pour l'évaluation de la sensibilité à l'eau. La norme EN 12697-12 ne mentionne pas de données d'exactitudes pour la méthode appliquée mais cite une expérience américaine avec un écart-type inter-laboratoire de 8%. La répétabilité est estimée à environ 15%.

A14 - Essai sur enrobé : Module complexe sur éprouvettes trapézoïdales

Dans le cadre cette recherche, l'essai de module complexe est réalisé sur éprouvettes trapézoïdales (EN 12697-26). Le principe de l'essai consiste à encastrier des éprouvettes trapézoïdales à leur grande base puis imposer un déplacement sinusoïdal (ou une force) à leur extrémité libre. Le module complexe est ensuite calculé à des températures et à des fréquences variées (entre 3 et 30 Hz). Tout comme l'essai de fatigue, l'essai de module complexe peut être contrôlé en force ou en déplacement. Les mesures obtenues pendant l'essai sont la force appliquée, le déplacement et l'angle de déphasage. Ceci permet de calculer les deux composantes du module complexe comme détaillé au chapitre 5 : $E^*=E_1+iE_2$

La déformation est limitée à moins de $50 \cdot 10^{-6}$, ce qui permet de rester dans le domaine de comportement linéaire des enrobés. Les spécifications sur les enrobés bitumineux se réfèrent à une valeur minimale pour la norme du module complexe $|E^*|$ dans des conditions de fréquence et température spécifiées. Les normes suisses ne contiennent des exigences relatives au module complexe que pour les enrobés à module élevé (EME).

(Corté, Gourdon et al. 2001) indique un écart-type de répétabilité de 118 Pa et un écart-type de reproductibilité de 969 MPa pour les mesures de module complexe.

A15 - Essai sur enrobé : Essai de fatigue sur éprouvettes trapézoïdales

Le principe de l'essai (EN 12697-24, Annexe A) consiste à encastrier des éprouvettes trapézoïdales à leur grande base puis imposer un déplacement sinusoïdal à leur extrémité libre jusqu'à atteindre les critères de rupture.

L'interprétation de l'essai admet la rupture par fatigue lorsque l'effort nécessaire pour obtenir la déformation imposée est égal à la moitié de l'effort initial. L'essai est alors arrêté. A une température d'essai donnée, l'essai est répété avec plusieurs niveaux de déformations et un certain nombre d'éprouvettes homogènes, ce qui permet d'établir la courbe de fatigue $N=f(\varepsilon)$, N étant le nombre de chargements provoquant la rupture et ε étant la déformation maximale sur une fibre externe de l'éprouvette. La droite de fatigue est donc tracée en fonction des différentes amplitudes de déplacements auxquelles les essais pour un mélange ont été faits. La réalisation d'un essai de fatigue complet nécessite au moins 18 essais élémentaires.

Le résultat d'un essai de fatigue est fréquemment caractérisé par la déformation ε_6 correspondant à une durée de vie de un million de cycles et par la pente de la loi de fatigue $1/b$. La courbe de Wöhler représente la durée de vie en fonction des amplitudes de la charge appliquée dans une échelle bi-logarithmique.

Les normes suisses ne contiennent des exigences relatives à la fatigue que pour les enrobés à module élevé (EME). Concernant la fidélité de l'essai, la norme EN 12697-24 indique un écart-type de répétabilité de 1.43 μ déformation pour ε_6 et de 0.021 pour la pente de la loi de fatigue.

A16 - Représentations des résultats de module complexe

Les enrobés bitumineux sont des matériaux viscoélastiques thermo-susceptibles ; leur comportement rhéologique est directement lié au comportement du liant qui les compose, ce qui leur confère une susceptibilité à la température et au temps d'application de la charge (fréquence de sollicitation). Les résultats d'un essai de laboratoire de détermination du module complexe E^* sont fréquemment exprimés par des représentations graphiques des composantes du module complexe : norme du module complexe $|E^*|$, module d'élasticité dynamique E_1 , module de perte E_2 et angle de déphasage φ .

Courbes isothermes

Les courbes isothermes correspondent à la représentation dans un repère bi-logarithmique de la norme du module complexe $|E^*|$ en fonction de la fréquence, pour chacune des températures d'essais. La pente des courbes isothermes permet d'estimer la susceptibilité de l'enrobé au temps d'application de la sollicitation (susceptibilité cinétique). A basse température, le comportement de l'enrobé est quasi indépendant de la fréquence ; l'enrobé s'approche d'un comportement élastique.

Courbes isochrones

Les courbes isochrones correspondent à la représentation dans un repère bi-logarithmique de la norme du module complexe $|E^*|$ en fonction de la température d'essai, pour chacune des fréquences. La pente des isochrones permet d'estimer la susceptibilité thermique de l'enrobé.

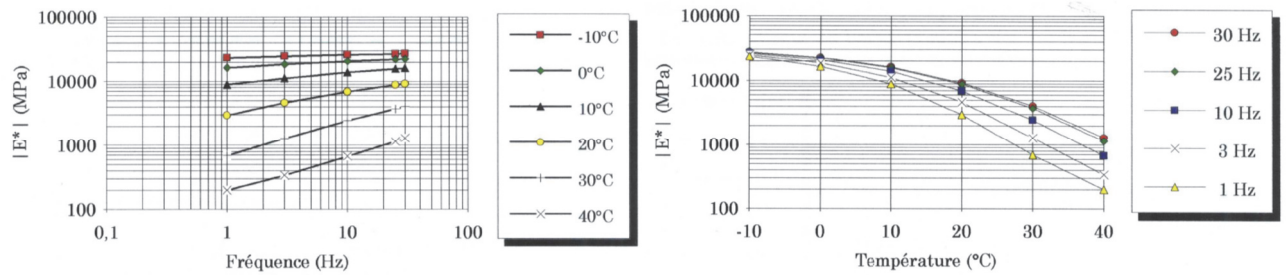


Figure 12-8 : Isothermes (gauche) et isochrones (droite) du module complexe (De La Roche 1996)

Courbe dans le plan Cole-Cole

La représentation dans le plan Cole-Cole consiste à reporter les modules E_1 (abscisse) et E_2 (ordonnée) dans une échelle linéaire. Si le matériau obéit au principe d'équivalence fréquence-température, les points expérimentaux définissent une courbe unique caractéristique du matériau. Cette représentation permet le calage de modèles rhéologiques. Elle n'est cependant pas très précise pour des faibles valeurs de module. Pour effectuer le calage avec des faibles valeurs de module, on utilisera la représentation dans l'espace de Black.

Courbe dans l'espace de Black

La courbe dans l'espace de Black consiste à reporter la norme du module complexe $|E^*|$ en échelle logarithmique en fonction de l'angle de phase correspondant. Si le matériau obéit au principe d'équivalence fréquence-température, les points expérimentaux définissent une courbe unique caractéristique du matériau. Ce type de représentation permet entre autre de visualiser la diminution de l'angle de phase pour les hautes températures.

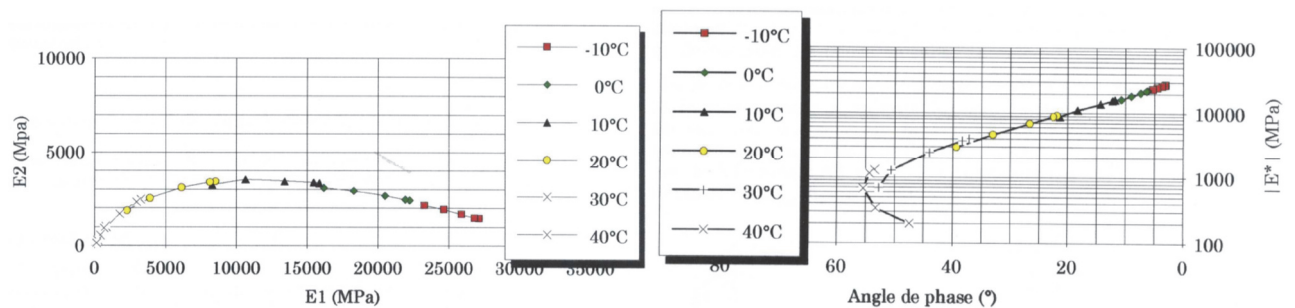


Figure 12-9 : Courbes de module complexe dans le plan Cole-Cole (gauche) et dans l'espace de Black (droite) (De La Roche 1996)

Courbe maîtresse

A l'examen des courbes isothermes, on remarque qu'une même valeur de module complexe peut être obtenue pour différents couples fréquence (ou temps)-température. Cette propriété d'équivalence temps-température peut être utilisée dans le but de construire une courbe unique du module complexe, pour une température de référence T_R choisie arbitrairement. Cette courbe est appelée courbe maîtresse. La température de référence T_R est généralement de 10°C ou 15°C . La construction de la courbe maîtresse se fait par translation de chaque isotherme, parallèlement à l'axe des fréquences, dans le but de faire superposer les points de même valeur de module sur la courbe isotherme de référence.

Le coefficient de translation de l'isotherme T par rapport à l'isotherme T_R est $\log(a_T)$. Le module vérifie alors la relation : $E^*(\omega, T) = E^*(\omega a_T, T_R)$, avec $a_{T_R}=1$

L'équation d'Arrhénius permet de déterminer $\log(a_T)$ par la relation suivante :

$$\log(a_T) = \frac{\delta H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right)$$

δH Energie apparente d'activation caractérisant le matériau

R Constante des gaz parfaits (8.314 J/mol.°K)

T, T_R Températures [°K]

La valeur de l'énergie d'activation pour les enrobés est généralement située autour de 200 à 250 J/mole (Di Benedetto et Corté 2004). La relation WLF (obtenue par William, Landl et Ferry) peut également être utilisée afin de déterminer le coefficient de translation.

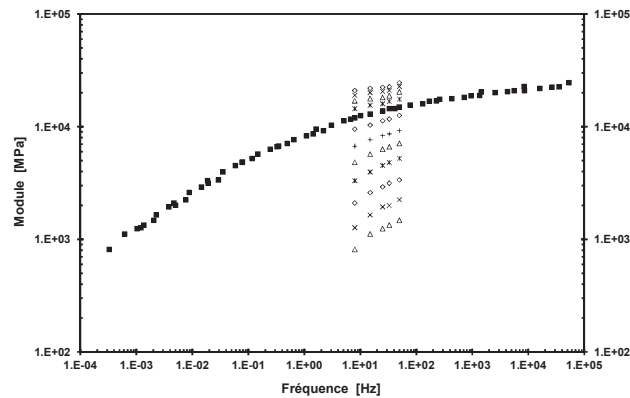


Figure 12-10 : Exemple de courbe maîtresse à $T_R=10$ °C (Source : Laboratoire Lavoc)

La courbe maîtresse présente l'avantage de déterminer le module d'un enrobé pour de très faibles fréquences de sollicitations inaccessibles par l'expérimentation.

A17 - Fiche de reconstitution de la courbe théorique en fonction des composants bruts

EPFL - LABORATOIRE DES VOIES DE CIRCULATION		RECONSTITUTION DE LA COURBE THEORIQUE AVEC LES COMPOSANTS BRUTS											
A - DONNEES DE PROJET				DEMARCHE									
Code Lavoc: OFENECOTNB				A- 1/insertion des données de projet									
Objet: RECETTE AC T 22S - Mélange de référence REF				C- 2/insertion de la teneur en RAP, recette cible, caractéristiques du fraisat (RAP) et des composants (analyse granulométrique)									
Fabrication REF-F1				C- 3/ Calcul de la recette théorique avec le bouton solveur. La <u>recette théorique</u> représente la proportion de granulats d'apports rapportée à 100%									
Date: 30.08.2010/NB				D- 4/ Calcul des différentes masses nécessaires à la composition de la gâchée (teneur en liant, masse des différents composants, masse des différentes fractions granulométriques et masses volumiques)									
B - DONNEES GENERALES				Version: MP/NB, 15.03.2010									
Apport = Granulats "neufs"		Valeurs à introduire											
		Valeurs calculées											
		Valeurs pour fabrication en laboratoire (à peser)											
C - CARACTERISTIQUES DE BASE				Vider formulaire									
Recette cible (par ex. mélanges de centrale)				RAP [%] 0 Attention: teneur en masse de RAP									
[mm]	Recette cible [%]	RAP brut [%]	0% RAP	100% Apport	Apport 100% pour solveur								
0.063	6.0	0.0	0.0	6.0	6.00	Valeur cible pour solveur							
2	29.5	0.0	0.0	29.5	29.50								
4	42.5	0.0	0.0	42.5	42.50								
8	60.7	0.0	0.0	60.7	60.70								
11.2	69.5	0.0	0.0	69.5	69.50								
16	82.6	0.0	0.0	82.6	82.60								
22.4	95.0	0.0	0.0	95.0	95.00	100% dans la contrainte							
Composants bruts (granulats d'apport) entrant dans la constitution de la recette													
Analyse granulométrique des composants bruts entrant dans la constitution de la recette													
Passant cumulé													
Passant à [mm]	Filler <0.063	Sable 0.063/2	Gravillon 2/4	Gravillon 4/8	Gravillon 8/11.2	Gravillon 11.2/16	Gravillons 16/22.4	Recette théorique [%]					
0.063	100.00%	4.00%	1.50%	0.40%	0.20%	0.20%	0.20%	6.00	Cible				
2	100.00%	95.10%	5.90%	1.00%	0.25%	2.86%	0.22%	29.50	Contrainte				
4	100.00%	100.00%	92.70%	5.60%	0.30%	5.61%	0.25%	42.50	Contrainte				
8	100.00%	100.00%	100.00%	94.30%	7.20%	11.10%	0.30%	60.70	Contrainte				
11.2	100.00%	100.00%	100.00%	99.90%	92.50%	15.50%	7.26%	69.50	Contrainte				
16	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	98.50%	17.70%	82.60	Contrainte				
22.4	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	99.80%	100.00	Contrainte =100% (ne pas écrêter lors du tamisage)				
Pourcentage de chaque fraction brute pour constitution de la recette théorique													
Filler <0,063 [%]	Sable 0/2 [%]	Gravillon 2/4 [%]	Gravillon 4/8 [%]	Gravillon 8/11 [%]	Gravillon 11/16 [%]	Gravillons 16/22.4 [%]	Somme composants [%]						
4.68	24.71	12.21	18.20	6.8	12.5	21.0	100.04						
D - CALCUL DES DONNEES NECESSAIRES A LA FABRICATION													
Calcul des teneurs en liant													
Insolubles [%]		0.00		0.1% si RAP // 0% si pas de RAP									
Apport Teneur liant/enrobé, enrobé neuf [%]		4.40											
RAP Teneur liant/enrobé, RAP [%]		0.00		mesure Labo									
Apport+RAP Teneur liant/enrobé y.c. gran. RAP [%]		4.40		y.c. insolubles									
Apport+RAP Teneur liant/granulat, y.c. gran. RAP [%]		4.60		y.c. insolubles									
RAP Teneur liant/granulat, RAP [%]		0.00		mesure Labo									
Apport Teneur liant/granulat, granulats d'apport [%]		4.60		sans insolubles									
Calcul de la masse des différents composants													
Masse de granulats totale pour la gâchée [g]		15000		Masse approximative initiale (contient pas liant d'apport)									
Masse de granulats d'apport [g]		15000											
Teneur liant/granulat, granulats d'apport [%]		4.60		y.c. insolubles									
Masse de liant nécessaire, enrobé neuf [g]		690											
Masse de RAP 0/11 [g]		0											
Granulats RAP [g]		0		Masse de la gâchée [g]									
Liant RAP [g]		0		15690									
Calcul de la masse des différentes fractions entrant dans la gâchée													
Estimation teneur en filler fabriqué par Guedu - granulats apport[%]		0.6											
Masse de chaque fraction entrant dans la composition de la gâchée													
Filler <0,063 [g]	Sable 0/2 [g]	Sable 2/4 [g]	Gravillon 4/8 [g]	Gravillon 8/11 [g]	Gravillon 11/16 [g]	Gravillons 16/22.4 [g]							
611	3797	1832	2730	1015	1877	3145							
Masses cumulées >0.063mm [g]		3797		5628		8358		9373		11250		14395	
Contrôle de la somme des composants granulats [g]		15006											
Calcul de la masse volumique et vérification finale													
MVR granulats [g/cm³]		2.700											
MVR liant [g/cm³]		1.030		valeur conventionnelle									
Masse volumique réelle de l'enrobé [g/cm³]		2.520											
Vérification de la proportion de granulats d'apport du mélange [g]		100.0%											
Fabrication de l'enrobé (cible): 150°C													
N° Echantillon	Type	Nbre éch	Essai à effectuer										
R25 à R28	Marshall 50/50, 135°C	4	S&F Marshall										
R29 à R34	Marshall 25/25, 135°C	6	ITSR										
Vérification: 10*1.2=12 kg													

A18 - Protocole de fabrication (exemple)

Protocole de fabrication en laboratoire
--

Données générales

- Procédé : **Enrobé tiède avec cire (3%) - Température finale visée : 120°C**
- Code référence de fabrication : **ET-C-F5**
- Etape recherche laboratoire : Formulation basée sur enrobé de référence, échantillons pour essais à 4 semaines (avec / sans conditionnement)
- Formulation & composants selon calcul Prado et fiche Excel
- Type de couche : couche de base AC T 22S

Protocole de fabrication

- Date : 29/09/2010 → **Essais 27.10.10**
- Opérateurs : JWFA, DJ, NB
- Remarque : Mélange cire avec liant 30 mn avant fabrication; puis 20 mn avec hélice
- Préparation composants de base (EN 12697-35) :

Composant	Quantité [g]	Conditionnement		Caractéristiques finales pour insertion dans le mélange	
		Méthode de mise en temp./conditionn*	Durée de mise en temp./condit.	Temp. [°C]	Humidité résiduelle [%]
Filler 0.063	652	Etuve	1 nuit	130	0
Sable 0/2	4050	Etuve	1 nuit	130	0
Granulats 2/4	1954	Etuve	1 nuit	130	0
Granulats 4/8	2912	Etuve	1 nuit	130	0
Granulats 8/11.2	1083	Etuve	1 nuit	130	0
Granulats 11.2/16	2002	Etuve	1 nuit	130	0
Granulats 16/22.4	3354	Etuve	1 nuit	130	0
Bitume	736	Etuve	1 nuit	130	NA
Additif (cire 3%/bitume)	22.09	-	20	20	0

- Séquence de fabrication en laboratoire (ordre chronologique d'entrée des composants dans le mélange) :

Etape N°	Libellé de l'étape	Composants	Quantité [kg]	Durée malaxage (Temps total)	Température du mélange [°C]
1	Mélanger liant et cire (pas de temps de maturation nécessaire)			Mélanger avec hélice (30 min)	130-140°C
	Préchauffage malaxeur à 120°C				
2	Granulats dans Gueudu et mise en marche malaxeur		Fin: 30s		
3	Ajout du bitume		Début: 30s Fin: 3mn		
4	Ajout du filler		Début: 3mn15 Fin: 3mn45		
5	Malaxage		Total: 5mn	(Objectif: 5 mn environ)	T _{mes} =123°C T _{IR} =119°C

Compactage des échantillons à 120°C (voir recette)

- Mélange avec hélice à 140°C – grande hélice; bon mélange
- Début fabrication: 09h44:30
- Début préparation Marshall: 9h51 à 9h58
- Début compactage Marshall: 10h41

A19 - Mesures de viscosité sur mastic et liant : Mode opératoire rhéomètre à cisaillement dynamique

Le rhéomètre à cisaillement dynamique (dynamic shear rheometer – DSR) peut être utilisé pour des mesures sur bitume selon les normes. EN 14770 et SN 670 559. Dans cette recherche, le rhéomètre à plans parallèles a été utilisé afin d'effectuer également des mesures sur mastic, nécessitant quelques adaptations des conditions et du protocole d'essai. Nous décrivons ici le mode opératoire pour la préparation des échantillons et l'utilisation du rhéomètre dans le cadre des mesures sur mastic et liant.

Préparation des échantillons et du matériel

- Préparation des échantillons de liant et mastic dans des godets de pénétration (environ 60 g.). Le comportement du mastic au jeune âge évolue rapidement. Pour cela, réaliser les essais dans les 4 h. à 6 h. suivant la préparation des échantillons. Les échantillons sont préparés au laboratoire du Lavoc.
- Matériel nécessaire : Plaque chauffante, bec bunsen, gants, baguette en verre, spatule, matériel de nettoyage (solvant, papier, ...).
- Une fois sur place, réchauffer les échantillons à l'aide d'une plaque chauffante. Pour la température de réchauffage, maintenir l'échantillon à une température de 85 ± 5 °C au-dessus de la température anneau et bille, ou à 180 °C. Adopter la valeur la plus faible.

Tableau 12-1 : Température de réchauffage pour mesures de viscosité (DSR)

Liant	T _{A&B} [°C]	T _{chauffage} [°C]
50/70 base	51.9	140
50/70+3% cire	79.2	165
50/70+0.4% additif	51.2	140

Assurer un contrôle de la température et brasser régulièrement afin de ne pas carboniser le liant ou le mastic.

Utilisation du rhéomètre AR2000

La démarche décrite brièvement ici est un complément au guide d'utilisation « AR series » contenant les détails d'utilisation du logiciel de commande et de la machine d'essai.

1. Vérifier la pression d'air (2.1 bars).
La tige du rhéomètre est montée sur un palier à air. En cas d'absence de pression d'air, la rotation de la tige provoque un frottement endommageant la machine d'essai. Faire également attention à ne jamais manipuler la tige en tirant vers le haut au risque de l'endommager.
2. Ouvrir l'arrivée d'eau pour le système Peltier.
3. Allumer le rhéomètre.
4. Enlever le système de protection du pied et si nécessaire enlever la plaque de base pour installer le système Peltier.
5. Installer le support et les plaques (diamètre 25 mm).
6. Nettoyer les plaques.
7. Démarrer le logiciel de commande du rhéomètre.
8. Calibrer l'inertie de la géométrie.
9. Régler le zéro de l'entrefer à la température d'essai.
10. Déposer le matériau à tester et régler manuellement l'entrefer entre 500 et 2000 μm (viser 900-1000 μm).
11. Vérifier le ménisque (allure).

12. Quand l'entrefer est correct et le ménisque satisfaisant, lancer la procédure d'essai.
13. Exporter les résultats.
14. Sauver la session et les paramètres de mesure.
15. Démontez le porte-échantillon, nettoyez le matériel en enlevant le liant/mastic resté en contact.
16. Remettre la protection.

A20 - Mesures de viscosité sur mastic et liant : Résultats complémentaires

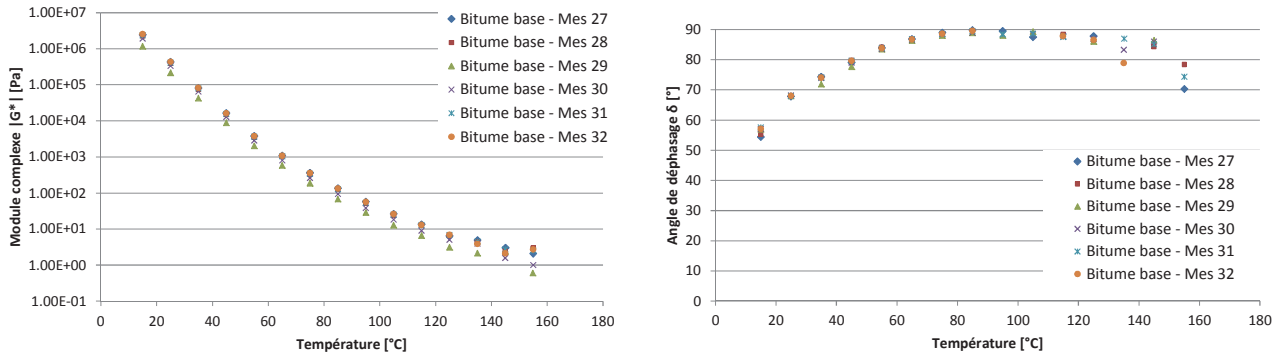


Figure 12-11 : Analyse de répétabilité - mesure de module de cisaillement complexe (gauche) et angle de déphasage (droite) sur bitume de base

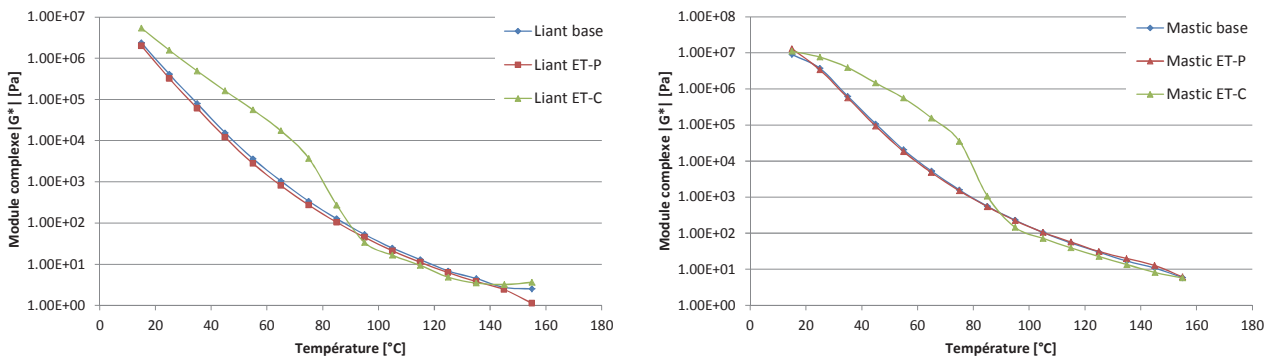


Figure 12-12 : Module de cisaillement complexe des liants (gauche) et des mastics (droite)

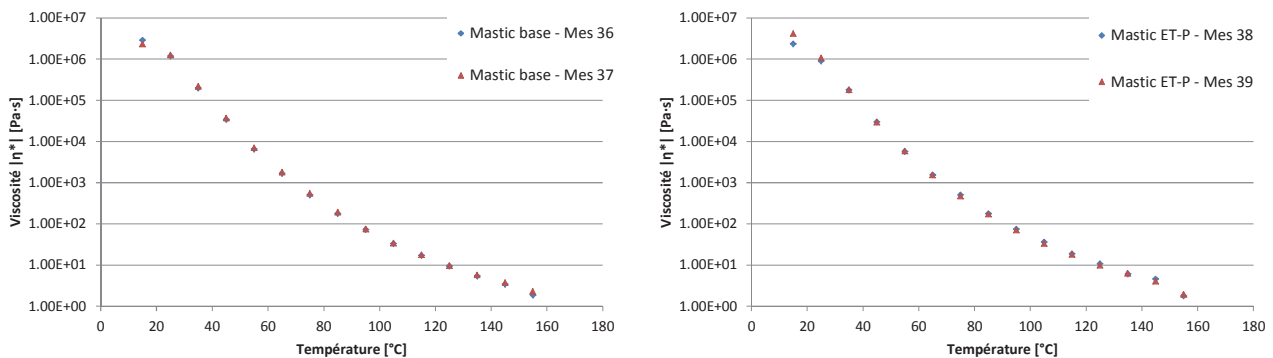


Figure 12-13 : Mesures de viscosité sur mastic de base (gauche) et mastic ET-P (droite)

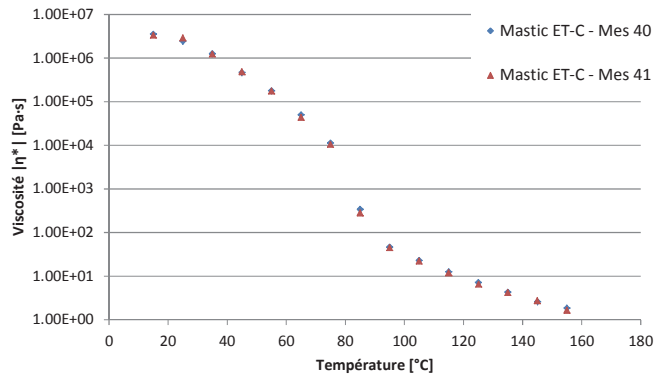


Figure 12-14 : Mesures de viscosité sur mastic ET-C

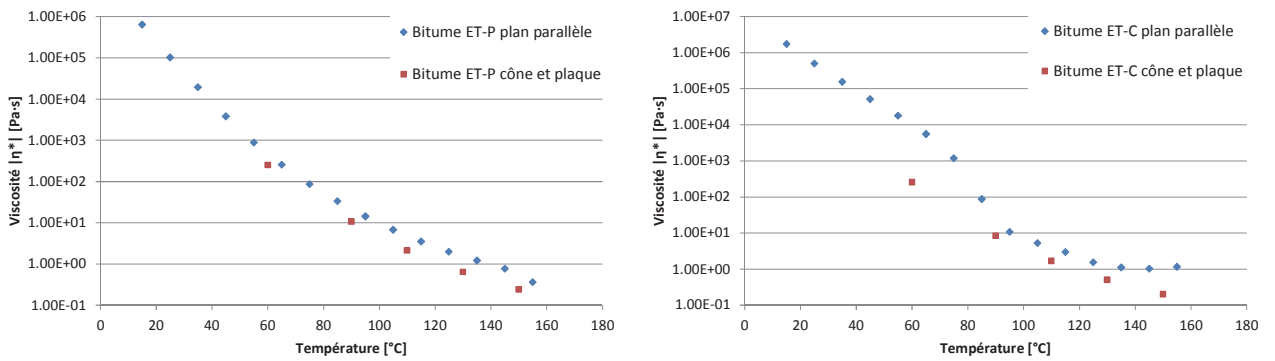


Figure 12-15 : Comparatif des mesures sur liant avec rhéomètre cône-plaque et plans parallèles (gauche : ET-P, droite : ET-C)

A21 - Résultats complémentaires aux essais de caractérisation étendus et essais performantiels

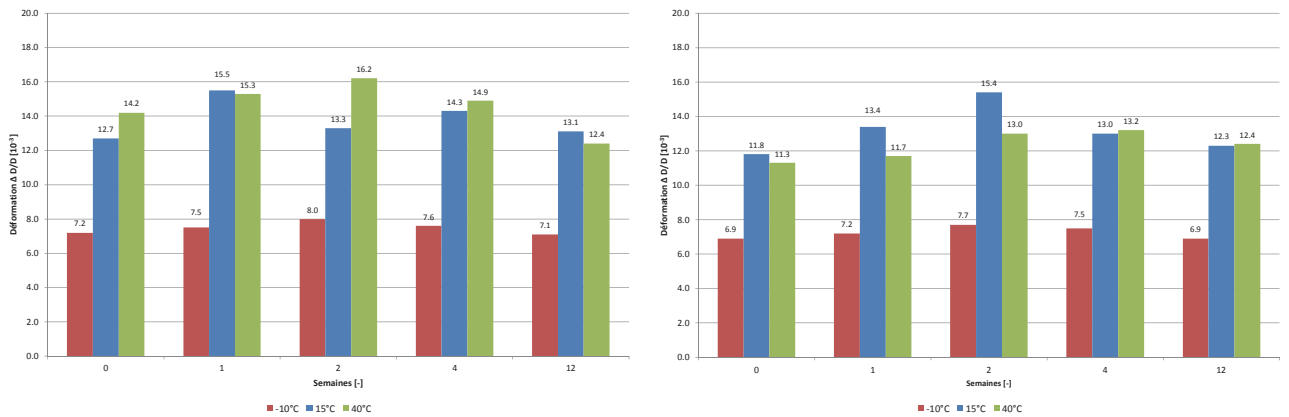


Figure 12-16 : Déformations mesurées à la compression diamétrale, sans conditionnement (gauche : REF, droite : ET-C)

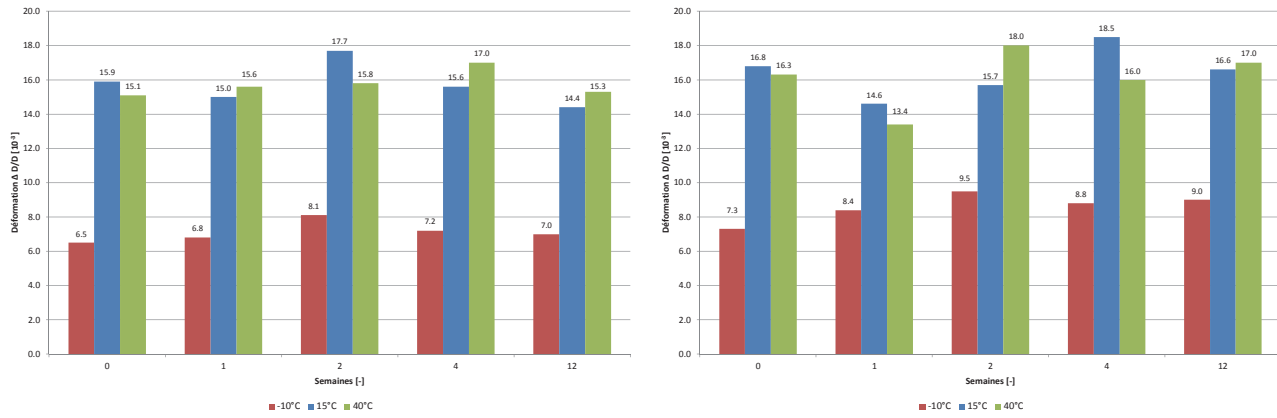


Figure 12-17 : Déformations mesurées à la compression diamétrale, sans conditionnement (gauche : ET-P, droite : ET)

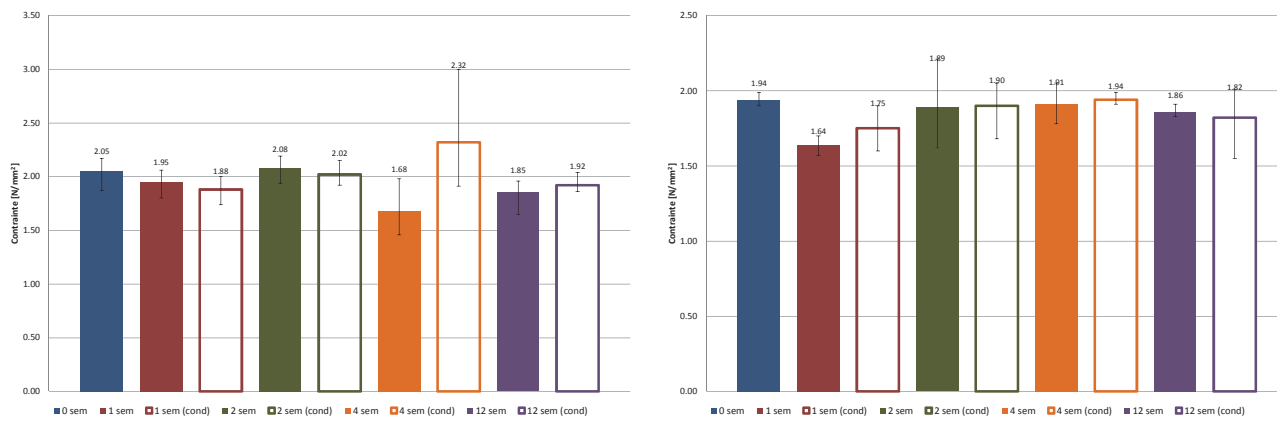


Figure 12-18 : Contraintes mesurées à la compression diamétrale (15 °C) avec/sans conditionnement des échantillons (gauche : REF, droite : ET-C)

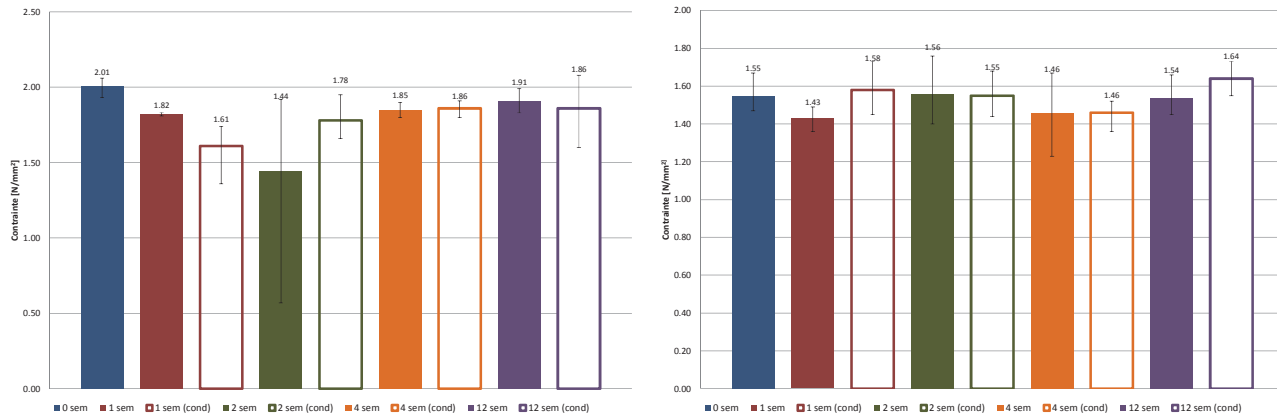


Figure 12-19 : Contraintes mesurées à la compression diamétrale (15 °C) avec/sans conditionnement des échantillons (gauche : ET-P, droite : ET)

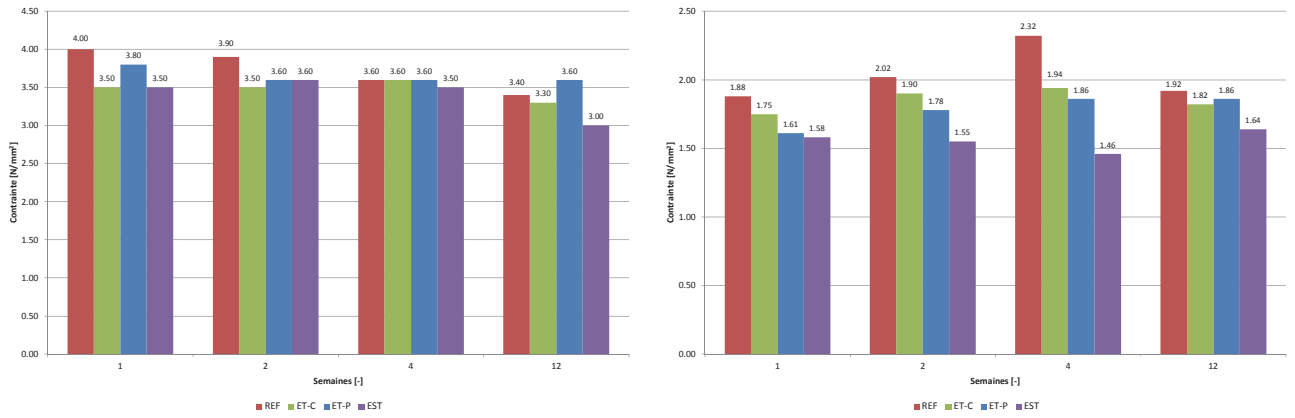


Figure 12-20 : Contraintes mesurées à la compression diamétrale, avec conditionnement (gauche : -10 °C, droite : 15 °C)

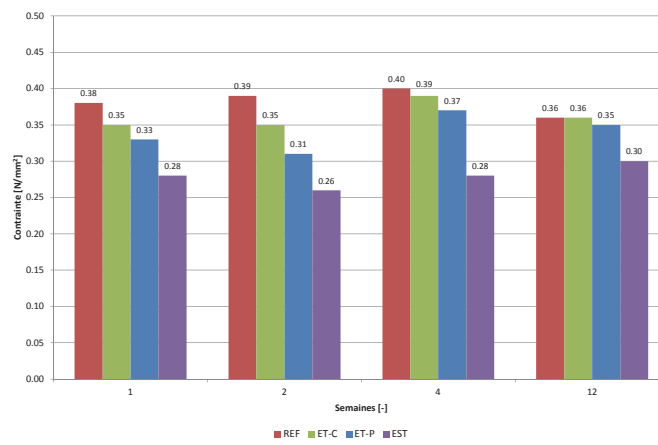


Figure 12-21 : Contraintes mesurés à la compression diamétrale, avec conditionnement (40 °C)

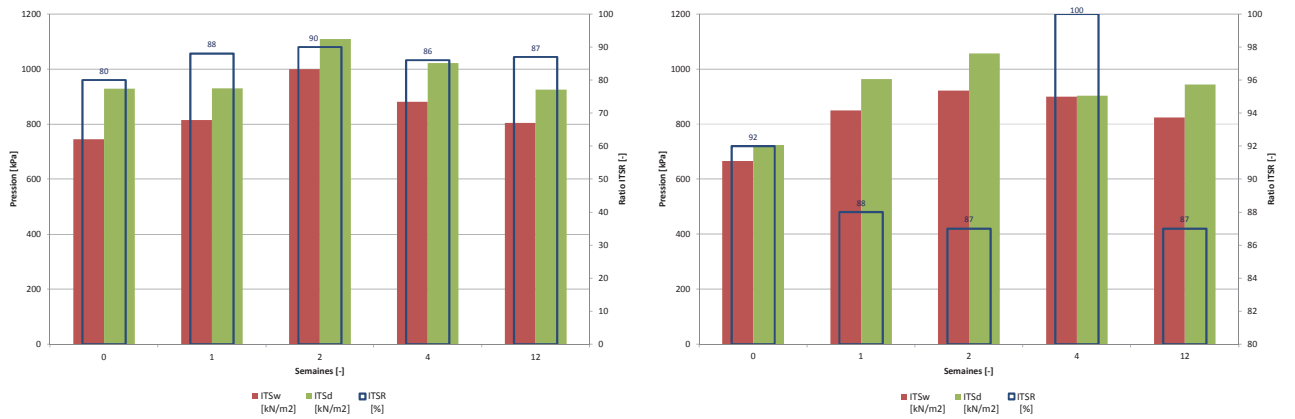


Figure 12-22 : Sensibilité à l'eau à différents pas de temps (gauche : REF, droite : ET-C)

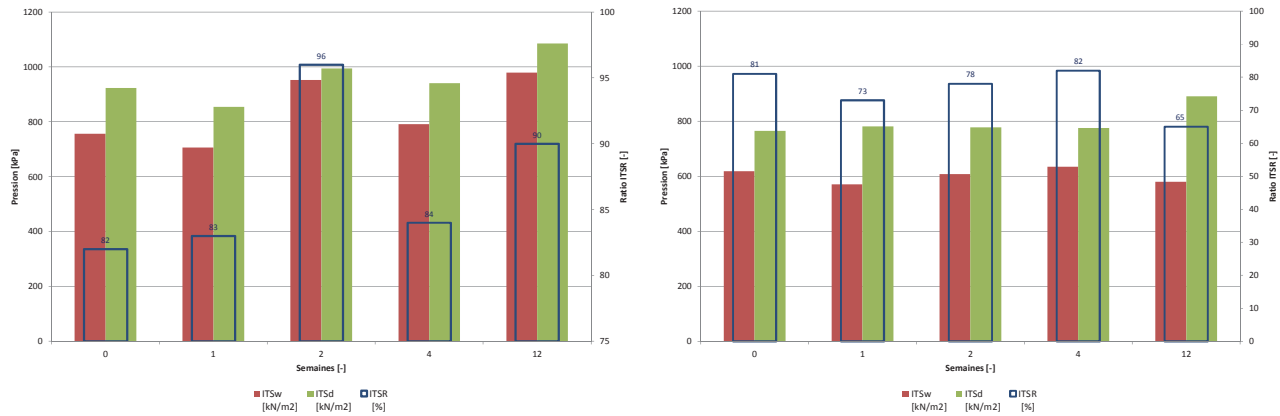


Figure 12-23 : Sensibilité à l'eau à différents pas de temps (gauche : ET-P, droite : EST)

A22 - Test de Student

Le test de Student, appelé également « T-Test », est un test paramétrique permettant de comparer deux groupes de données expérimentales en répondant à la question de savoir si la moyenne de chacun des groupes est statistiquement différente. Pour cela, les données sont traitées en prenant en considération la variance des données. Le test fait l'hypothèse d'échantillons indépendants et d'une loi normale (gaussienne) de répartition des données.

Dans le cas de deux groupes de données indépendantes (indice 1 et 2), la formule suivante est utilisée afin de calculer l'écart du test T :

$$T = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{var_1}{n} + \frac{var_2}{n}}}$$

T	écart du test
\bar{X}	moyenne
var	variance
n	nombre de valeurs observées

Dans cette formule, le numérateur correspond à la moyenne de chacun des groupes et le dénominateur traduit leur variabilité. L'écart du test T est ensuite comparé avec l'écart critique t_α issu de la table de la loi de Student et déterminé en fonction du nombre de degrés de liberté ν . Le coefficient α représente le risque d'erreur (i.e $\alpha\%$ du temps nous trouvons une différence significative entre les échantillons alors qu'en réalité il n'y en a pas). Le calcul est généralement effectué avec $\alpha=0.01$ et $\alpha=0.05$. Le nombre de degrés de liberté est déterminé par : $\nu=n_1+n_2-1$

Soit l'hypothèse de base H_0 : « La différence entre les moyennes des deux échantillons n'est pas statistiquement significative »

L'évaluation du résultat est la suivante :

- Si $T < t_\alpha(\nu)$: L'hypothèse H_0 est acceptée, La différence entre les moyennes des échantillons n'est pas statistiquement significative.
- Si $T > t_\alpha(\nu)$: L'hypothèse H_0 est rejetée et on lui préfère l'hypothèse contraire « La différence entre les moyennes des échantillons est statistiquement significative ».

CONDITIONS D'ESSAI																
TEMPERATURE	[°C]:	-10, -5, 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30														
FREQUENCE	[Hz]:	1, 3, 10, 25, 40														
EPSILON THEO.	[1E-6]:	40														
CARACTERISTIQUES DU BETON BITUMINEUX																
TENEUR EN LIANT / E (THEORIQUE) [%]:		4.40														
TENEUR EN VIDES MOY. GEOM. [%]:		4.9														
DEGRE DE COMPACTAGE [%]:		101.7														
		MODULE E* 10 °C / 25 Hz :		14741 MPa												
		MODULE E* 15 °C / 10 Hz :		10379 MPa												
RESULTATS D'ESSAI																
T	f	E*	E* Ecart type	Phi	E1	E2	f réf. 15°C	T	f	E*	E* Ecart type	Phi	E1	E2	f réf. 15°C	
[°C]	[Hz]	[MPa]	[MPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[Hz]	[°C]	[Hz]	[MPa]	[MPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[Hz]	
-10	1	21130	852	4.7	21059	1737	11022	20	1	4156	288	30.1	3597	2081	0.19	
	3	22270	915	3.8	22221	1472	33067		3	5660	390	26.0	5088	2480	0.56	
	10	23225	883	3.1	23192	1242	110222		10	7616	507	21.7	7077	2816	1.88	
	25	23939	844	2.4	23917	1020	275555		25	9216	582	18.7	8729	2957	4.70	
	40	24420	820	1.7	24408	741	440889		40	10019	730	17.3	9564	2984	7.52	
-5	1	18738	840	6.1	18632	1990	1491	25	1	2471	194	34.0	2049	1381	0.037	
	3	20082	859	5.1	20001	1802	4473		3	3629	270	32.8	3050	1968	0.112	
	10	21364	851	3.9	21314	1465	14910		10	5266	307	28.5	4627	2515	0.374	
	25	22207	782	3.3	22171	1265	37275		25	6760	413	25.1	6122	2866	0.935	
	40	22797	846	3.0	22766	1188	59641		40	7565	421	24.1	6907	3084	1.496	
0	1	16004	730	7.8	15855	2180	217	30	1	1432	94	41.1	1079	941	0.0078	
	3	17535	803	6.4	17424	1965	651		3	2199	137	38.5	1720	1369	0.0235	
	10	19074	848	5.4	18991	1778	2170		10	3460	225	34.6	2848	1965	0.0785	
	25	20099	836	4.5	20037	1575	5426		25	4680	299	31.8	3979	2463	0.1962	
	40	20607	841	3.9	20558	1412	8681		40	5316	366	30.6	4577	2704	0.3140	
5	1	12907	685	11.8	12633	2648	33.9	35	1	798	54	43.1	583	545	0.00173	
	3	14648	734	9.8	14437	2481	101.6		3	1274	79	42.4	942	859	0.00520	
	10	16435	810	8.0	16276	2285	338.6		10	2115	140	40.2	1616	1365	0.01732	
	25	17753	914	6.7	17631	2073	846.5		25	3006	211	38.6	2350	1874	0.04331	
	40	18402	936	5.9	18304	1895	1354.3		40	3552	263	37.6	2813	2168	0.06930	
10	1	9441	492	17.1	9026	2768	5.6	40	-	-	-	-	-	-	-	
	3	11316	557	14.3	10966	2792	16.9		-	-	-	-	-	-	-	-
	10	13312	651	11.4	13050	2631	56.4		-	-	-	-	-	-	-	-
	25	14741	705	9.8	14527	2501	141.0		-	-	-	-	-	-	-	-
	40	15413	722	8.9	15226	2395	225.6		-	-	-	-	-	-	-	-
15	1	6557	417	23.3	6022	2592	1	45	-	-	-	-	-	-	-	
	3	8273	458	19.5	7798	2762	3		-	-	-	-	-	-	-	
	10	10379	563	16.1	9974	2870	10		-	-	-	-	-	-	-	
	25	11943	598	13.8	11598	2847	25		-	-	-	-	-	-	-	
	40	12840	676	12.8	12522	2840	40		-	-	-	-	-	-	-	

Tableau 12-3 : Résultats d'essais de module complexe E* sur enrobé ET-C (2 semaines)

CONDITIONS D'ESSAI															
TEMPERATURE	[°C]	-10, -5, 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30													
FREQUENCE	[Hz]	1, 3, 10, 25, 40													
EPSILON THEO.	[1E-6]	40													
CARACTERISTIQUES DU BETON BITUMINEUX															
TENEUR EN LIANT / E (THEORIQUE) [%]		4.40													
TENEUR EN VIDES MOY. GEOM. [%]		5.1													
DEGRE DE COMPACTAGE [%]		100.6													
								MODULE E* 10 °C / 25 Hz : 14213 MPa MODULE E* 15 °C / 10 Hz : 9567 MPa							
RESULTATS D'ESSAI															
T	f	E*	E* Ecart type	Phi	E1	E2	f réf. 15°C	T	f	E*	E* Ecart type	Phi	E1	E2	f réf. 15°C
[°C]	[Hz]	[MPa]	[MPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[Hz]	[°C]	[Hz]	[MPa]	[MPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[Hz]
	1	20768	1275	5.0	20690	1801	9042		1	3105	143	37.3	2469	1884	0.19
	3	21859	1337	4.0	21807	1508	27126		3	4619	228	31.9	3922	2440	0.58
-10	10	22855	1368	3.3	22818	1301	90420	20	10	6636	320	25.8	5976	2886	1.95
	25	23597	1353	2.7	23570	1131	226049		25	8304	411	22.0	7697	3117	4.87
	40	24249	1369	2.1	24233	873	361679		40	9198	401	20.2	8634	3171	7.80
	1	18376	843	6.5	18258	2082	1276		1	1657	89	44.8	1175	1168	0.040
	3	19822	854	5.2	19739	1810	3829		3	2679	136	40.0	2053	1721	0.120
-5	10	21009	1021	4.2	20952	1541	12763	25	10	4305	228	33.9	3572	2403	0.401
	25	21921	1044	3.3	21884	1275	31908		25	5798	298	29.6	5042	2863	1.003
	40	22484	1232	2.7	22459	1051	51053		40	6603	319	27.8	5840	3081	1.605
	1	15267	750	9.4	15063	2484	194		1	856	68	49.7	553	653	0.0087
	3	16788	827	7.6	16643	2206	581		3	1459	108	46.8	998	1064	0.0261
0	10	18380	883	6.0	18280	1916	1936	30	10	2573	177	42.0	1913	1721	0.0870
	25	19689	1026	5.0	19613	1721	4839		25	3772	269	38.0	2974	2320	0.2175
	40	20434	908	4.1	20382	1457	7742		40	4648	594	37.0	3714	2794	0.3481
	1	11975	664	13.7	11633	2844	31.4		-	-	-	-	-	-	-
	3	13779	737	11.3	13514	2690	94.2		-	-	-	-	-	-	-
5	10	15648	815	8.9	15461	2410	314.1	35	-	-	-	-	-	-	-
	25	17038	878	7.5	16895	2209	785.3		-	-	-	-	-	-	-
	40	17705	999	6.3	17599	1934	1256.5		-	-	-	-	-	-	-
	1	8608	408	19.8	8097	2920	5.4		-	-	-	-	-	-	-
	3	10529	507	16.2	10112	2934	16.3		-	-	-	-	-	-	-
10	10	12657	630	12.8	12341	2811	54.4	40	-	-	-	-	-	-	-
	25	14213	656	10.7	13964	2647	135.9		-	-	-	-	-	-	-
	40	14959	743	8.9	14780	2307	217.5		-	-	-	-	-	-	-
	1	5484	206	28.2	4832	2593	1		-	-	-	-	-	-	-
	3	7344	305	20.6	6873	2589	3		-	-	-	-	-	-	-
15	10	9567	422	18.4	9077	3022	10	45	-	-	-	-	-	-	-
	25	11201	531	15.5	10796	2986	25		-	-	-	-	-	-	-
	40	12189	537	13.8	11838	2904	40		-	-	-	-	-	-	-

Tableau 12-4 : Résultats d'essais de module complexe E* sur enrobé ET-P (2 semaines)

CONDITIONS D'ESSAI																
TEMPERATURE	[°C]:	-10, -5, 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30														
FREQUENCE	[Hz]:	1, 3, 10, 25, 40														
EPSILON THEO.	[1E-6]:	40														
CARACTERISTIQUES DU BETON BITUMINEUX																
TENEUR EN LIANT / E (THEORIQUE) [%]:		4.40														
TENEUR EN VIDES MOY. GEOM. [%]:		5.1														
DEGRE DE COMPACTAGE [%]:		100.6														
		MODULE E* 10 °C / 25 Hz :		12910 MPa												
		MODULE E* 15 °C / 10 Hz :		8478 MPa												
RESULTATS D'ESSAI																
T	f	E*	E* Ecart type	Phi	E1	E2	f réf. 15°C	T	f	E*	E* Ecart type	Phi	E1	E2	f réf. 15°C	
[°C]	[Hz]	[MPa]	[MPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[Hz]	[°C]	[Hz]	[MPa]	[MPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[Hz]	
-10	1	20209	662	4.9	20134	1733	11774	20	1	2439	122	40.8	1845	1595	0.19	
	3	21271	669	3.8	21224	1408	35323		3	3738	180	35.2	3054	2156	0.56	
	10	22223	643	3.1	22190	1200	117744		10	5591	255	28.9	4893	2705	1.86	
	25	22904	735	2.5	22883	982	294359		25	7198	335	24.9	6528	3032	4.65	
	40	23463	695	1.6	23454	640	470974		40	8136	379	23.5	7462	3243	7.43	
-5	1	17348	461	7.1	17214	2156	1570	25	1	1237	92	48.1	826	920	0.037	
	3	18705	519	5.7	18613	1854	4711		3	2064	134	43.6	1495	1423	0.110	
	10	20080	456	4.6	20014	1627	15703		10	3445	204	37.5	2732	2099	0.365	
	25	20955	547	3.7	20911	1360	39258		25	4797	272	33.2	4014	2627	0.914	
	40	21523	583	3.0	21492	1143	62813		40	5602	248	31.1	4798	2892	1.462	
0	1	14268	451	10.4	14035	2568	225	30	1	636	66	52.0	392	501	0.0076	
	3	15879	480	8.4	15709	2316	676		3	1106	113	49.4	721	839	0.0228	
	10	17513	505	6.7	17392	2054	2255		10	2002	188	45.4	1404	1426	0.0758	
	25	18599	442	5.6	18512	1805	5637		25	2977	259	42.0	2212	1992	0.1896	
	40	19237	508	4.8	19171	1596	9019		40	3538	247	40.5	2689	2300	0.3034	
5	1	10564	572	15.7	10169	2863	34.7	35	-	-	-	-	-	-	-	
	3	12438	562	12.8	12129	2757	104.1		-	-	-	-	-	-	-	-
	10	14397	501	10.0	14176	2511	347.1		-	-	-	-	-	-	-	-
	25	15718	507	8.3	15552	2279	867.9		-	-	-	-	-	-	-	-
	40	16382	481	6.6	16274	1878	1388.6		-	-	-	-	-	-	-	-
10	1	7255	401	22.9	6681	2829	5.7	40	-	-	-	-	-	-	-	
	3	9180	402	18.6	8699	2932	17.1		-	-	-	-	-	-	-	-
	10	11306	415	14.7	10934	2877	57.1		-	-	-	-	-	-	-	-
	25	12910	406	12.3	12613	2754	142.8		-	-	-	-	-	-	-	-
	40	13617	295	10.4	13391	2466	228.4		-	-	-	-	-	-	-	-
15	1	4594	184	31.3	3925	2388	1	45	-	-	-	-	-	-	-	
	3	6342	247	26.0	5698	2784	3		-	-	-	-	-	-	-	
	10	8478	297	20.6	7935	2985	10		-	-	-	-	-	-	-	
	25	10147	396	17.5	9679	3046	25		-	-	-	-	-	-	-	
	40	11029	446	15.5	10630	2942	40		-	-	-	-	-	-	-	

Tableau 12-5 : Résultats d'essais de module complexe E* sur enrobé EST (2 semaines)

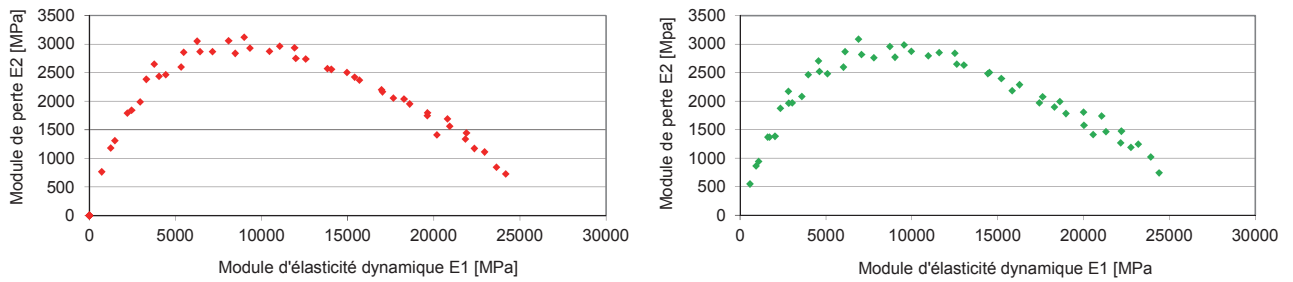


Figure 12-24 : Représentation dans le plan Cole-Cole, 2 semaines (gauche : REF, droite : ET-C)

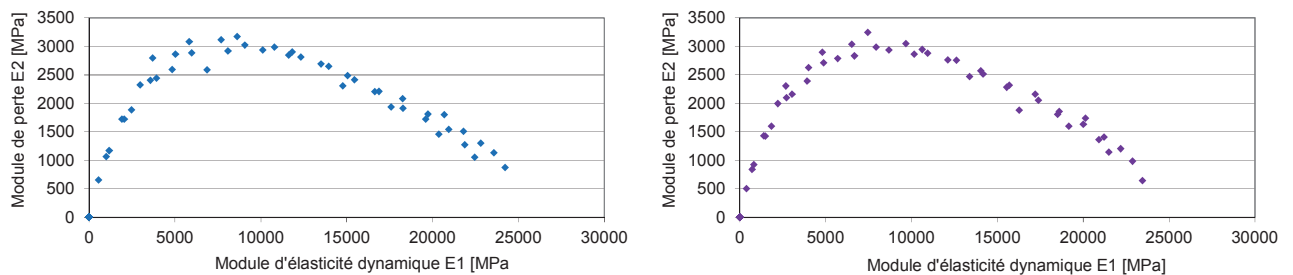


Figure 12-25 : Représentation dans le plan Cole-Cole, 2 semaines (gauche : ET-P, droite : EST)

Annexe B. Mise en place de l'essai de module sécant (Chapitre 5)

B1 - Définition des PID

Avant de démarrer les essais, la définition des PID (Proportional Integral Dérivé) est nécessaire pour les échantillons testés. Les PID en force et déplacement sont établis selon la procédure détaillée dans (Bueche 2010).

Le régulateur PID permet d'effectuer une régulation du vérin lors de la manipulation et ainsi minimiser la différence entre la consigne et la mesure. La signification des facteurs est la suivante :

- P : Action proportionnelle où l'erreur est multipliée par un gain défini.
- I : Action intégrale où l'erreur est intégrée sur un certain intervalle de temps.
- D : Action dérivée où l'erreur est dérivée suivant un temps donné.

Les PID sont déterminés ici de manière itérative, en imposant dans un premier temps $I=0$ et $D=0$. La bonne définition de ces paramètres permet ensuite d'être rapide et précis et ainsi limiter les dépassements (overshoot).

Les facteurs suivants sont utilisés dans le cadre de l'essai en contrôle force: $P=0.6$, $I=3.0$, $D=0.5$, $A=0$, $F=0$. Ces facteurs ont par ailleurs été évalués aux températures extrêmes d'essai prévues (-10 °C et 40 °C) afin de s'assurer qu'ils sont également valables malgré la variation de rigidité de l'éprouvette bitumineuse.

B2 - Particularités relatives à l'enceinte thermique

Une enceinte thermique avec conditionnement à l'azote est utilisée. L'utilisation de ce type d'enceinte n'est pas sans conséquences. Par exemple, la mise en route de l'enceinte et l'enclenchement/déclenchement de la valve à azote provoquent des parasites et variations de forces sur le vérin. Ces variations de force peuvent atteindre quelques kilo newtons et elles ne sont donc pas négligeables. Afin de corriger ceci, les mesures suivantes ont été prises :

- Mise à terre de l'enceinte thermique en substituant une plaque en laiton (matériau conducteur) à celle en PVC utilisée initialement pour y poser l'enceinte thermique.
- Installation d'une diode dans le système de commande de la valve à azote. Cette diode permet alors d'effectuer un court-circuit et de couper le pic de tension qui apparaît lorsque la commande d'azote est enclenchée.

Suite à ces mesures, le problème est alors corrigé. En effet, le bruit sur le signal non filtré des capteurs LVDT est alors inférieur à 0.1 μm et le bruit sur le signal LVDT filtré est presque nul. Ceci est très important étant donné la précision requise pour l'essai. L'effet sur la force est également satisfaisant puisque les pics se trouvent également corrigés (graphique FFT).

B3 - Modèle de Burger

Le modèle de Burger est un modèle analogique viscoélastique linéaire combinant des ressorts et des amortisseurs. Il est utilisé par (Nunn et Smith 1997) afin d'établir le coefficient de correction pour le calcul du module sécant (section 5.8.2).

De manière théorique, le modèle de Burger est la combinaison de deux modèles simples de Maxwell en parallèle. Le modèle de Maxwell (liquide viscoélastique) se présente ainsi :

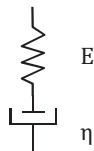


Figure 12-26 : Modèle de Maxwell

Avec,

E : Rigidité (module) du ressort

η : Viscosité de l'amortisseur

Il vient les fonctions de fluage $F(t)$ et de relaxation $R(t)$:

$$F(t) = \frac{1}{E} + \frac{t}{\eta}$$

$$R(t) = Ee^{-\frac{t}{\tau}}$$

Avec $\tau = \frac{\eta}{E}$ où τ est le temps de relaxation.

$$\text{Le module complexe est alors : } E^*(\omega) = E \frac{i\omega\tau}{1+i\omega\tau} = \frac{E\omega^2\eta^2 + iE^2\omega\eta}{E^2 + \omega^2\eta^2}$$

Dans le modèle de Burger, les deux modèles de Maxwell sont disposés en parallèle et la fonction de relaxation s'exprime ainsi (les indices 1 et 2 font référence aux deux modèles de Maxwell) :

$$R(t) = E_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + E_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}}, \text{ avec } \tau_1 = \frac{\eta_1}{E_1} \text{ et } \tau_2 = \frac{\eta_2}{E_2}$$

$$\text{Le module complexe, selon le modèle de Burger : } E^*(\omega) = \frac{E_1}{1+(i\omega\frac{\eta_1}{E_1})^{-1}} + \frac{E_2}{1+(i\omega\frac{\eta_2}{E_2})^{-1}}$$

Le modèle de Burger utilisé afin d'établir le coefficient de correction pour le calcul du module sécant est représenté ci-dessous :

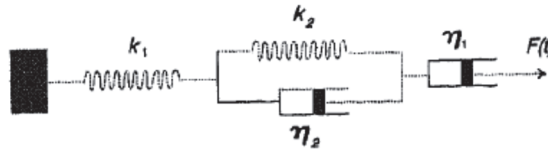


Figure 12-27 : Modèle de Burger pour calcul du module sécant corrigé (Nunn et Smith 1997)

B4 - Proposition d'une procédure de conditionnement des échantillons

Avant de pouvoir réaliser des mesures de module sécant, il est nécessaire de définir la procédure de conditionnement à suivre aux différentes températures d'essais.

Pour ces essais, une éprouvette PCG de diamètre 150 mm et hauteur 75 mm a été équipée de thermocouples permettant ainsi de mesurer la température au centre de l'éprouvette ainsi qu'à la surface de l'éprouvette (1 cm de profondeur). Après installation des capteurs, les orifices ont ensuite été remplis avec de la pâte thermique spécifique. Pour ces éprouvettes, un enrobé dense de courbe granulométrique continue a été choisi, ce qui nous permet de considérer le cas potentiellement le plus critique.

La presse multifonction utilisée pour la réalisation de l'essai IT-CY est équipée d'un système de mise en température à l'azote pour les basses températures. D'autres étuves pouvant fonctionner en continu sur plusieurs jours et fonctionnant à l'air sont également disponibles au laboratoire. Pour la réalisation des essais, il est décidé de procéder à la mise en température dans les étuves à air, ce qui permet de préparer l'essai IT-CY dans l'enceinte recourant à l'azote qui peut être rapidement mise en température. Une fois à la température d'essai, l'échantillon est déplacé dans l'étuve NAT (à azote), puis stabilisé avant réalisation de l'essai.

Les Figure 12-28 et Figure 12-29 indiquent le temps nécessaire afin d'atteindre respectivement la température de -10 °C et 40 °C au sein de l'échantillon ; l'étuve (à air) étant pré-conditionnée à la température cible avant introduction des éprouvettes.

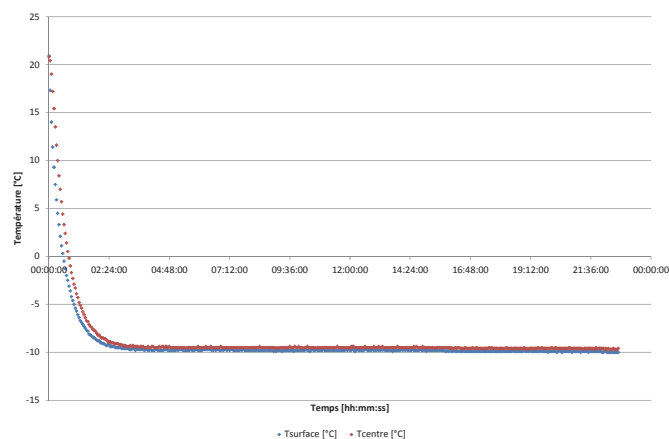


Figure 12-28 : Evolution de la température dans l'échantillon (consigne -10 °C)

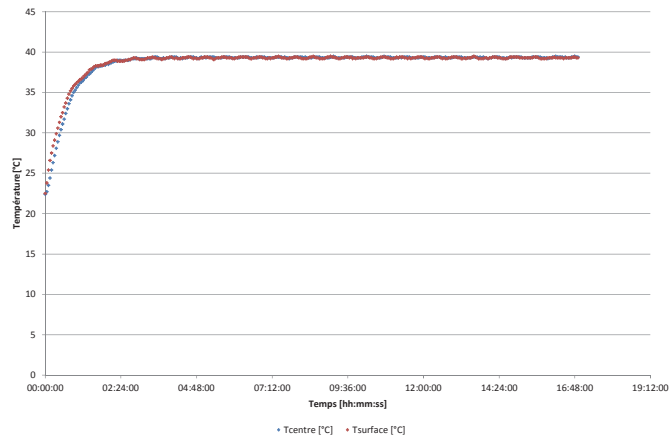


Figure 12-29 : Evolution de la température dans l'échantillon (consigne 40 °C)

Nous pouvons ainsi déterminer que, une fois l'étuve (air) mise à température, un temps de minimum 6 h. est nécessaire afin que l'échantillon se trouve à la température d'essai. Ceci est valable pour des températures allant de -10 °C à 40 °C et pour le type d'échantillon mentionné précédemment. Ce résultat est comparable aux résultats obtenus par (Assef-Vaziri, Pigois et al. 1984) qui propose également un temps de mise en température de 6 h. pour un essai à -10 °C ainsi que pour un essai à 45 °C (échantillons de 160 mm de hauteur et diamètre).

Par ailleurs, nous effectuons ici le postulat qu'une température d'essai de « x » degrés est atteinte lorsque le cœur de l'échantillon se trouve à ± 1 °C de la cible. Après 6 h. de conditionnement, la température de -9.5 °C est atteinte au cœur de l'échantillon (consigne -10 °C), et 39.3 °C est atteint pour l'essai à 40 °C.

Une fois l'échantillon mis à température, ce dernier est transféré dans l'étuve à azote dans laquelle l'essai IT-CY sera effectué. Lors du transfert entre les étuves, une modification de la température est inévitable. Il est nécessaire de limiter la variation de température lors du transfert de l'échantillon entre les enceintes. La perte de température est mesurée ci-après (température laboratoire 20 °C).

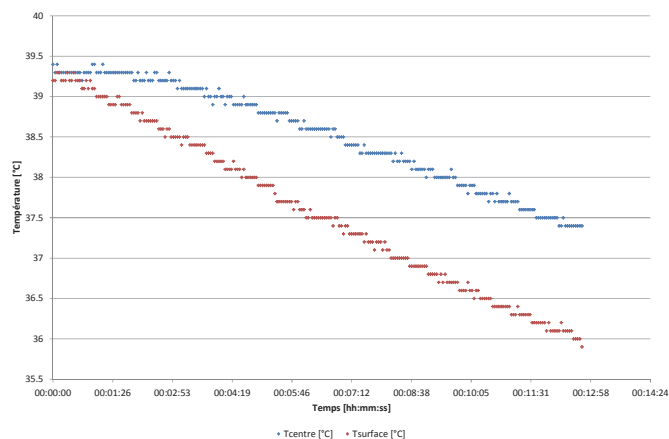


Figure 12-30 : Variation de la température en sortie d'étuve (40 °C)

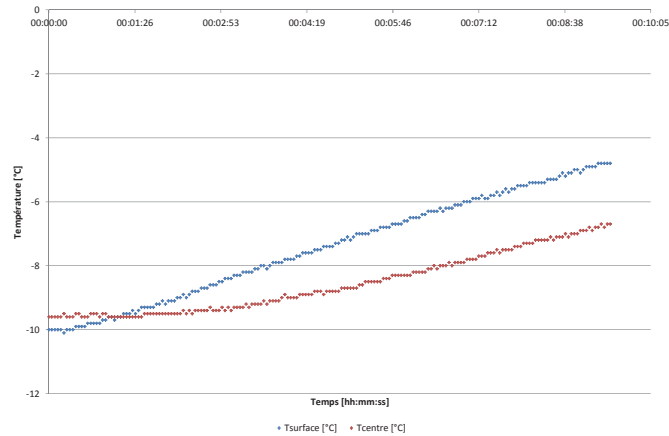


Figure 12-31 : Variation de température en sortie d'étuve (-10 °C)

On observe ici l'importante perte de température en surface de l'éprouvette durant la première minute après la sortie de l'étuve. Afin de conserver une température de ± 1 °C par rapport à la cible, il est donc nécessaire de limiter le temps de perte de température à 1 minute à 40 °C et 2 minutes à -10 °C. Pour simplifier la procédure, un temps limite de 1 minute est fixé à toutes les températures.

L'éprouvette préalablement mise en température est finalement insérée dans la chambre de conditionnement à l'azote qui sera utilisée pour l'essai IT-CY. La Figure 12-32 indique le temps nécessaire pour la mise en température de l'enceinte ; temps qui est fonction des caractéristiques de la valve à azote.

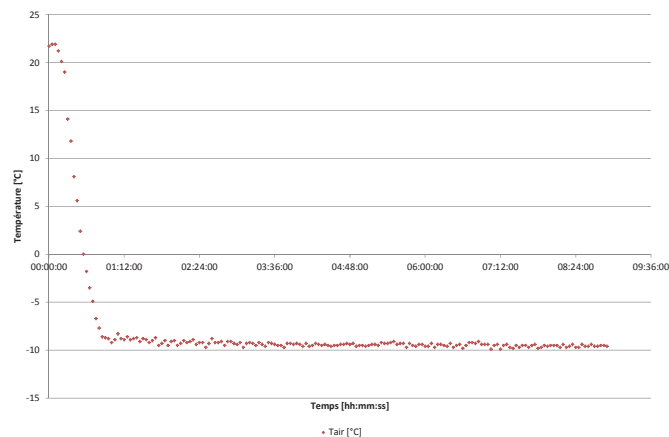


Figure 12-32 : Durée de mise en température pour enceinte thermique à azote (IT-CY), consigne -10 °C

On peut considérer ici que environ 75 mn sont nécessaires afin d'atteindre la température souhaitée au sein de l'enceinte. Une fois l'échantillon installé dans l'enceinte thermique et prêt à l'essai, une stabilisation d'environ 20 mn est imposée afin de garantir une température respectant les exigences.

Nous pouvons finalement résumer les conditions suivantes pour le conditionnement des échantillons :

Durée de mise en température -10 °C	min 6 heures
Durée de mise en température 40 °C	min 6 heures
Durée pour transfert entre étuves	max 1 minute
Durée pour mise en température enceinte azote	min 75 minutes
Temps de stabilisation dans enceinte azote avant essai	min 20 minutes

B5 - Mode opératoire pour la réalisation de l'essai IT-CY

Afin de réaliser l'essai conformément à la norme EN 12697-26 « Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 26 : Module de rigidité », Annexe C (Essai de traction indirecte sur éprouvette cylindrique (IT-CY), la procédure détaillée ici a été mise au point :

1. Préparation des échantillons
 - 1.1. Numérotter les échantillons.
 - 1.2. Tracer et numérotter deux diamètres perpendiculaires sur chaque échantillon testé.
2. Conditionnement des échantillons
 - 2.1. Conditionnement (étuve à air) selon la procédure décrite en Annexe A
3. Préparation du module NAT (voir Figure 12-33 à Figure 12-35)
 - 3.1. Nettoyer les barreaux de chargement. L'épaisseur des barreaux de chargement est de 20 mm pour l'utilisation d'éprouvettes de diamètre 150 mm.
 - 3.2. Vérifier que le gabarit d'alignement supporte bien horizontalement le chariot avec les capteurs LVDT.
 - 3.3. Installer le module NAT dans l'enceinte thermique.
4. Mise en route de la presse et mise en température
 - 4.1. Vérifier les limites de sécurité (force et position) et les ajuster si nécessaire.
 - 4.2. Mise en température de l'enceinte à azote.
5. Mise en place de l'échantillon
 - 5.1. Relever le gabarit d'alignement en abaissant le bras de levier.
 - 5.2. Centrer l'échantillon à tester au milieu de la barre de chargement inférieure. A cet instant, le gabarit d'alignement doit être en contact avec l'échantillon, les barres d'alignement étant à équidistance de la base de chargement.
Attention : L'échantillon ne doit pas reposer sur le gabarit d'alignement mais sur la barre de chargement.
 - 5.3. Installer le chariot LVDT en le posant sur les barres d'alignement. Les capteurs LVDT et les vis de serrage du chariot doivent alors être centrés sur le diamètre dessiné.
 - 5.4. Déposer le barreau de chargement supérieur.
 - 5.5. Fixer le chariot LVDT à l'aide des 4 vis de serrage. Attention à ne pas trop serrer.
 - 5.6. Installer les capteurs LVDT et les positionner à mi-course (vérifier serrage tête).
 - 5.7. Abaisser le gabarit d'alignement en montant le bras de levier en position verticale. Le chariot LVDT est maintenant fixé à l'échantillon.
 - 5.8. Vérifier que les LVDT sont bien dans la gamme souhaitée (mi-course) et effectuer un « reset compensation ».
 - 5.9. Refermer enceinte thermique et attendre stabilisation de la température.
6. Contact entre l'échantillon et la presse
 - 6.1. Passer en « Manipulation mode » et mettre la haute pression. La haute pression doit être conservée pour toute la durée de l'essai.
 - 6.2. Manipuler le vérin en mode déplacement et descendre jusqu'à environ 5-10 mm du contact avec la bille de chargement.
 - 6.3. Manipuler le vérin en mode force et effectuer le contact avec une force d'environ -0.2 kN. Pour des essais à basse température, la pression de contact requise sera plutôt aux alentours de -0.3...-0.4 kN.
S'assurer du bon contact ainsi que du bon alignement entre la bille de répartition des forces et le vérin de sollicitation.
 - 6.4. Ajuster les LVDT afin qu'ils soient dans la gamme souhaitée (mi-course, effectuer un « reset compensation » si nécessaire).
7. Réalisation de l'essai
 - 7.1. Essai Pre_NAT (Programme « NAT_pre_test3 »)
 - 7.1.1. Compléter le programme d'essai avec les forces souhaitées et la fréquence d'acquisition (Recording).
 - 7.1.2. Valider les changements (Apply).

- 7.1.3. Exécuter l'essai.
- 7.1.4. Visionner les résultats et définir la force requise pour l'essai IT-CY.
- 7.2. Essai NAT (Programme « NAT_test3 »)
 - 7.2.1. Compléter le programme d'essai avec la force et la fréquence d'acquisition (Recording) souhaités.
 - 7.2.2. Valider les changements (Apply).
 - 7.2.3. Exécuter l'essai.
 - 7.2.4. Visionner les résultats et les exporter (format *.txt).
8. Réaliser l'essai sur le second diamètre
Attendre minimum 20 min. à température constante, puis répéter les points 4 à 7.
9. Traitement et analyse des résultats
Utiliser la fiche prévue à cet effet

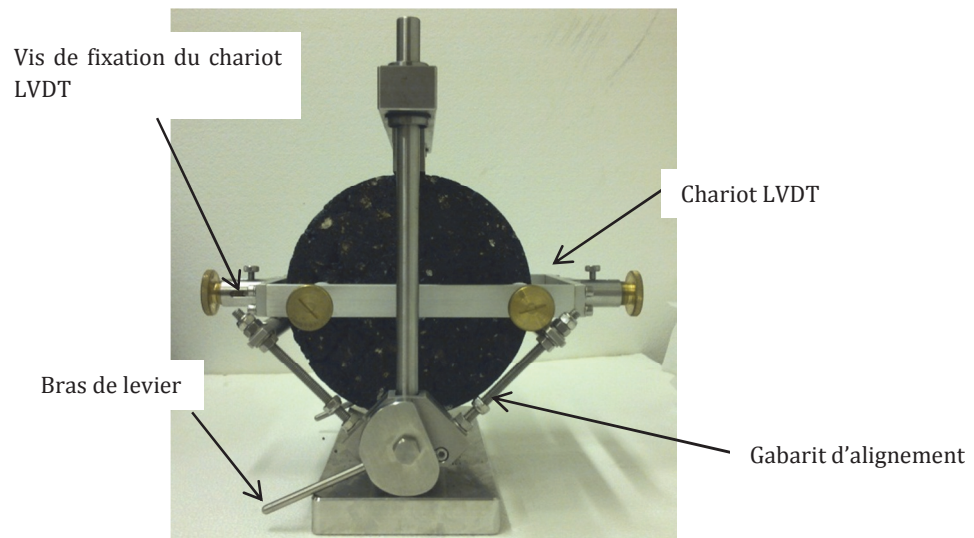


Figure 12-33 : Module NAT avec gabarit d'alignement levé

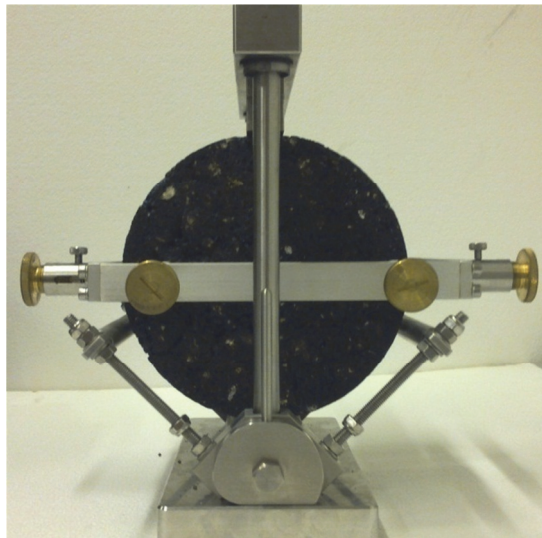
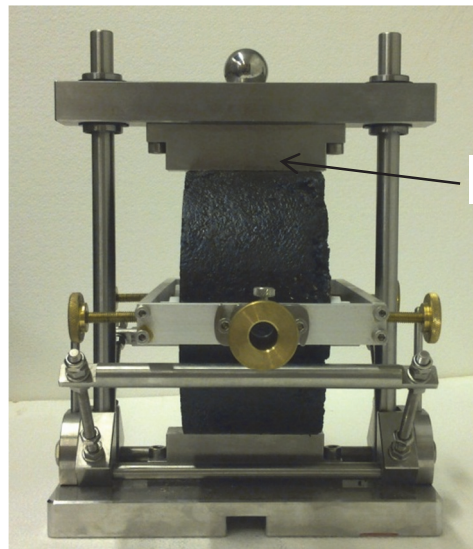


Figure 12-34 : Module NAT avec gabarit d'alignement abaissé



Barreaux de chargement

Figure 12-35 : Vue de profil du module NAT

B6 - Exemple de fiche d'essai IT-CY

Version 7, NB, 11.01.2011		Rapport d'essai NAT				
Essais sur mélanges bitumineux: Module de rigidité Traction indirecte sur éprouvettes cylindriques (IT-CY)						
Norme de base: EN 12697-26:2004 (F), Annexe C						
Projet:	Calibration NAT	N° Mesure Presse:		_0064 (I), _0067 (II)		
Date essai:	12.01.2011	Opérateurs:		NB		
Type de mélange:	AC 4 L	Code échantillon:		1		
Fabrication:	Centrale	Mode de compaction:		PCG		
Remarques:		Durée conditionnement [h]:		17		
Données de base						Exigences EN
Température d'essai [°C]:	15					
Diamètre échantillon [mm]:	150	80 ... 200 mm				
Épaisseur échantillon [mm]:	75	30 ... 75 mm				
Coefficient Poisson [-]:	0.35					
Cible temps de montée [ms]:	124	124 ±4 ms				
Cible déformation horizontale [µm]:	7	7±2 µm				
Pér. de répétition des impulsions [s]:	3.0	3±0.1 s				
Nb pulse de conditionnement [-]:	10					
Force verticale cible (Pre-NAT) [kN]:	3.5					
Résultats -Diamètre 1						
	Pulse N°1	Pulse N°2	Pulse N°3	Pulse N°4	Pulse N°5	Moyenne
Force verticale [kN]	-3.18	-3.18	-3.16	-3.17	-3.17	-3.17
Temps montée [s]	0.123	0.126	0.126	0.127	0.126	0.126
Déformation hor. [µm]	-6.8	-6.9	-7.0	-6.9	-6.9	-6.9
Fact. surface de charge	53%	54%	54%	54%	54%	54%
Module rigidité Sm [Mpa]						
Mesuré (Sm)	3870	3808	3755	3802	3812	3809
Ajusté (Sm')	3708	3672	3630	3679	3680	3674
Vérifications (D=150mm)						
Temps de montée	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Déf. Horizontale	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Fact. Surface de charge	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Résultats -Diamètre 2 ! Laisser délai de minimum 20 mn entre les deux essais!						
	Pulse N°1	Pulse N°2	Pulse N°3	Pulse N°4	Pulse N°5	Moyenne
Force verticale [kN]	-3.17	-3.16	-3.16	-3.17	-3.17	-3.17
Temps montée [ms]	0.125	0.127	0.124	0.124	0.124	0.125
Déformation hor. [µm]	-6.8	-7.0	-6.8	-6.9	-6.9	-6.9
Fact. surface de charge	54%	55%	54%	53%	54%	54%
Module rigidité Sm [Mpa]						
Mesuré (Sm)	3853	3748	3852	3788	3823	3813
Ajusté (Sm')	3716	3636	3715	3648	3682	3679
Vérifications (D=150mm)						
Temps de montée	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Déf. Horizontale	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Fact. Surface de charge	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Résultats consolidés						
	Diamètre 1	Diamètre 2	ΔD1D2 [%]	Validité	Moyenne	
Sm - mesuré [Mpa]	3809	3813	100%	OUI	3811	
Sm' - ajusté [Mpa]	3674	3679	100%	OUI	3677	
Remarques:						
Annexe: Graphique des pics mesurés						

Annexe C. Considérations énergétiques et environnementales (Chapitre 6)

Copies d'écran relatives à la première partie du modèle développé (version 1.10).

C1 - Enquête de consommation énergétique et d'émissions en centrale suisse (formulaire vierge)**ENQUETE CONSOMMATION ENERGETIQUE & MESURES EMISSIONS EN CENTRALE D'ENROBAGE**

Comme discuté préalablement, merci de bien vouloir compléter le questionnaire ci-joint. N'hésitez pas à me contacter en cas de question ou si quelque chose n'est pas clair.

Les informations que vous fournissez ici sont traitées de manière confidentielle et ne seront pas publiées.

INFORMATIONS GENERALES

Localisation de la centrale:

Exploitant:

Personne de contact

 Nom, Prénom:

 Téléphone:

 Email:

INFORMATIONS SUR LA CENTRALE

Type de centrale:

.....

Enrobés fabriqués

 Enrobé à chaud: OUI / NON

 Enrobé tiède: OUI / NON

 Technologie(s) tiède(s):

 Ajout de matériaux recyclés à chaud: OUI / NON

 Ajout de matériaux recyclés à froid: OUI / NON

 Autre:

Période annuelle de production

 Début:

 Fin:

Production annuelle totale:

 Année de référence:

 Enrobé à chaud:

 Enrobé tiède:

 Autre:

Nombre approximatif de recettes:

 Enrobé à chaud:

 Enrobé tiède:

 Autre:

CONSOMMATION ENERGETIQUE

Energies utilisées

Fuel:

Gaz:

Electricité:

Autre:

Critères de passage entre les énergies:

.....

.....

Consommation énergétique annuelle / mensuelle

Fuel:

Gaz:

Electricité:

Autre:

Consommation énergétique annuelle/mensuelle par type d'enrobé (si disponible)

Enrobé à chaud:

Enrobé tiède:

Autre:

Méthode de relevé de la consommation énergétique

Lecture compteur: OUI / NON

Mesure automatisée: OUI / NON

Facturation: OUI / NON

Autre:

.....

Fréquence de relevé de la consommation:

.....

Si cela vous est possible, merci de me transmettre les données brutes relevées.

MESURES ENVIRONNEMENTALES

Des mesures d'émissions à la centrale ont-elles été effectuées: OUI / NON

Année:

Mesure ponctuelle: OUI / NON

Fréquence de mesure:

Raisons de ces mesures:

.....

Organisme effectuant les mesures:

Société privée: OUI / NON

Organisme de l'Etat OUI / NON

Éléments mesurés:

CO₂: OUI / NON

CO: OUI / NON

NO_x: OUI / NON

COT: OUI / NON

PM₁₀: OUI / NON

Autre:

Est-il possible de consulter les données relatives aux émissions mesurées: OUI / NON

COMMENTAIRES

.....

.....

.....

.....

.....

C2 - Consommation énergétique de centrales suisses (résultat d'enquête)

MESURE DE CONSOMMATION ENERGETIQUE ET EMISSIONS EN CENTRALE ET CALCUL DES COUTS

MESURES CONSOMMATION ENERGETIQUE

Données générales	Centrale N° 1			Centrale N° 2		Centrale N° 3	Centrale N° 4		Centrale N° 5		Centrale N° 6	Centrale N° 7	
	Type de centrale	Ammann, Uniglobe 200			Hotstock		Discontinue, 200 t/h	Hotstock 160 t/h		Discontinue, 200 t/h		Discontinue	Discontinue, 320 t/h
Type d'enrobé	Chaud			Chaud		Chaud	Chaud		Chaud		Chaud	Chaud, tiède	
Nombre approx. recettes	40			45		110	>100		>100		140 (chaud), 10 (tiède)	-	
Ajout RAP	Froid			Froid		Froid/Chaud	Froid		NA		Froid/Chaud	Froid/Chaud	
Production	<i>Chaud</i>	<i>Chaud</i>	<i>Chaud</i>	<i>Chaud</i>	<i>Chaud</i>	<i>Chaud</i>	<i>Chaud</i>	<i>Chaud</i>	<i>Chaud</i>	<i>Chaud</i>	<i>Chaud</i>	<i>Chaud</i>	<i>Tiède</i>
Année	2007	2008	2009	2008	2009	2010	2008	2009	2008	2009	2009	2009	2010
Durée production annuelle [mois]	10	10	10	10	10	11	11	11	10	10	12	11	11
Production annuelle [t.]	64'430	50'410	65'162	69'519	72'036	70'000	88'661	93'341	24'860	19'324	97'000	63'534	-
Energie													
Année	2007	2008	2009	2008	2009	2010							
Fioul													
Consommation [l]	-	-	-	75'704	82'841	600'000	-	-	-	-	679'000	553'527	-
l / t.	-	-	-	1.1	1.1	8.6	-	-	-	-	7	8.7	4.85
kWh / t.	-	-	-	12.1	12.8	95.4	-	-	-	-	77.9	96.9	54.0
Gaz													
Consommation [kWh]	5'344'439	4'337'682	5'308'958	5'201'674	5'358'021	-	8'893'836	8'697'591	2'685'881	1'783'050	-	-	-
kWh / t.	82.9	86.0	81.5	74.8	74.4	-	100.3	93.2	108.0	92.3	-	-	-
Electricité													
Consommation [kWh]	357'384	350'916	364'986	471'357	489'333	1'500'000	357'953	360'821	241'720	213'599	582'000	639'196	-
kWh / t.	5.5	7.0	5.6	6.8	6.8	21.4	4.04	3.87	9.72	11.05	6	10.1	10.1
Total [kWh/t.]	88.5	93.0	87.1	93.7	94.0	116.8	104.4	97.0	117.8	103.3	83.9	107.0	64.0

-- Resource pas utilisée on mesure non disponible

	kWh/t.	MJ/t.
Moyenne chaud	99	356
Moyenne tiède	64	230

CONSTANTES & HYPOTHESES

Carburant	GJ/t. carb.	GJ/l. carb.	kWh/l. carb.
Fioul	40.97	0.040	11.12

Prix du carburant			
Type de carburant	Unité	Valeur	Source
Prix moyen du fioul	cts/l	81.39	OFS, Suisse (2010)
Prix moyen diesel	cts/l	144	Hyp (Famsa 2010)
Prix moyen gaz	cts/kWh	9.6	OFEN, Suisse (2009)
Prix moyen électricité	cts/kWh	20.88	ElCom, 2011, Cat C3
Autre	cts/kWh		

CALCUL DES COUTS ENERGETIQUES MOYENS (CHF / t. enrobé)

Centrale N°	Fioul		Gaz		Electricité		Coût E total CHF/t.
	l./t.	CHF	kWh/t.	CHF/t.	kWh/t.	CHF/t.	
1 - chaud			83.5	8.02	6.0	1.26	9.3
2 - chaud	1.1	0.91	74.6	7.16	6.8	1.42	9.5
3 - chaud	8.6	6.98			21.4	4.47	11.5
4 - chaud			96.7	9.29	3.95	0.83	10.1
5 - chaud			100.2	9.61	10.39	2.17	11.8
6 - chaud	7	5.70			6	1.25	7.0
7 - chaud	8.7	7.09			10.1	2.10	9.2
7 - tiède	4.9	3.95			10.1	2.10	6.0
							Moyenne chaud [CHF/t.] 9.8
							Moyenne tiède [CHF/t.] 6.0

C3 - Emissions de centrales suisses (résultat d'enquête)

MESURES DES EMISSIONS

Données générales	Centrale N° 1			Centrale N° 2			Centrale N° 6			Centrale N° 7		
	Type de centrale	Ammann, Uniglobe 200			Hotstock			Discontinue			Discontinue, 320 t/h	
Type d'enrobé	Chaud			Chaud			Chaud, tiède			Chaud, tiède		
Nombre approx. recettes	40			45			140 (chaud), 10 (tiède)			-		
Ajout RAP	Froid			Froid			Froid/Chaud			Froid/Chaud		
Mesures	Enrobé à chaud			Enrobé à chaud			Enrobé à chaud			Enrobé à chaud		
Emissions	mg/m ³	g/h	%	mg/m ³	g/h	%	mg/m ³	g/h	%	mg/m ³	g/h	%
Année		2008			2008			2006				
NO2	97 ± 10	2200 ± 300		15	468		58	-		-	-	-
SO2	5 ± 5	100 ± 100		-	-		-	-		-	-	-
CO	173 ± 17	3900 ± 500		>1105	> 34777		339	-		-	-	-
Poussières	16 ± 2	350 ± 60		2.2	69		-	-		-	-	-
CO2			5.0 ± 0.5			3.5			5.2		4.3	
O2			13.2 ± 0.9			16.2			14.1		-	

CALCUL DES EMISSIONS DE CO2 SUR LA BASE DES MESURES EFFECTUEES EN CENTRALE

Emissions par tonne d'enrobé		
Donnée	Unités	Valeur
CO ₂	%	3.9%
Débit d'air	m ³ /h.	
Production	t./h.	
Données calculées		
Débit d'air	m ³ /t.	NA
Débit CO ₂	m ³ /t.	NA
Masse CO ₂	kg/t.	NA

C4 - Energie de chauffage des composants

Date 01.07.2011

A. CALCUL DE L'ENERGIE THERMIQUE POUR LA FABRICATION D'ENROBE (Chauffage granulats et eau)

Légende
 Données à compléter si nécessaire
 Données à insérer par l'utilisateur
 Hypothèses pour constantes
Résultats à reporter pour analyse sur cycle de vie

1) CONSTANTES

Composant	Constante	Nom	Unité	Valeur	Source
Granulats	Chaleur massique	C_{gen}	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	0.837	-
	Chaleur massique	C_{se}	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	2.093	-
Bitume	Chaleur massique eau	C_{eau}	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	4.185	-
	Chaleur latente de vaporisation	L_v	kJ/kg	2256	-
	Chaleur massique vapeur d'eau	C_{vap}	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	1.83	-
Cire	Chaleur massique cire solide	$C_{cirs,s}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	1.7	SasolWax
	Enthalpie de fusion	L_c	kJ/kg	240	SasolWax
	Chaleur massique cire liquide	$C_{cirs,l}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	2.3	SasolWax
	Additif	Chaleur massique additif	C_{add}	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	2

2) HYPOTHESES ET DONNES GENERALES

Type d'enrobé [liste] Effectuer un choix

Teneur en eau des granulats [%]

Teneur en eau du sable [%]

Teneur en eau du filler [%]

Température initiale granulats [°C]

Température initiale sable & filler [°C]

Température initiale bitume [°C]

Température finale granulats [°C]

Température finale sable & filler [°C]

Température finale bitume [°C]

Laisser vide

Laisser vide

Laisser vide

3) COMPOSITION DE L'ENROBE

Composition massique	[%]
Filler	<input type="text" value=""/>
Granulats 0/2 - Sable	<input type="text" value=""/>
Granulats 2/4	<input type="text" value=""/>
Granulats 4/8	<input type="text" value=""/>
Granulats 8/11	<input type="text" value=""/>
Granulats 11/16	<input type="text" value=""/>
Granulats 16/22	<input type="text" value=""/>
Liant / enrobé	<input type="text" value=""/>
Vérification 0	
Laisser vide	<input type="text" value=""/>
Laisser vide	<input type="text" value=""/>
Laisser vide	<input type="text" value=""/>
Laisser vide	<input type="text" value=""/>

4) CALCUL DE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE

Unité ref. UR [kg gran. secs]

	Masse sèche [kg]	Masse d'eau [kg]	T_{in} [°C]	T_{fin} [°C]	Energie thermique [MJ]			Proportion
					Mat. sèche	Eau	Total	
Filler	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00	
Granulats 0/2 - Sable "sec"	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00	
Granulats 0/2 - Sable humide	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
Granulats 2/4	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00	
Granulats 4/8	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00	
Granulats 8/11	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00	
Granulats 11/16	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00	
Granulats 16/22	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00	
Liant / enrobé	0.00	NA	0	0	0.00	NA	0.00	
Vérification unité de référence [kg]	0.00							
Cire	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
Additif	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
Masse totale d'enrobé [kg]	0.00							
Rendement	<input type="text" value=""/>							

Total corrigé avec rdt [MJ]

Total corrigé avec rdt [MJ/t. enrobé]

Température du mélange [°C]

B. CALCUL DE LA CONSOMMATION DE CARBURANT ET DES EMISSIONS

1) CONSTANTES & HYPOTHESES

Pouvoir calorifique inférieur - PCI		
Carburant	GJ/t. carb.	Source
Fioul	40.97	Defra, 2010
Diesel	42.81	Defra, 2010
Gaz	47.59	Defra, 2010
Autre		

Emissions GES [kg/t. carburant]				
Carburant	CO ₂ [CO ₂ e]	CH ₄ [CO ₂ e]	N ₂ O [CO ₂ e]	Source
Fioul	3205.5	2.6	11.6	Defra, 2010
Diesel	3164.3	1.8	35.0	Defra, 2010
Gaz	2712.2	4.0	1.6	Defra, 2010
Autre				

Masse volumique		
Carburant	l./t. carb.	Source
Fioul	1023	Defra, 2010
Diesel	1198	Defra, 2010
Gaz	1340651	Defra, 2010
Autre		

Emissions électricité à la consommation [kg CO ₂ e / kWh]	
Electricité	0.4566 Defra, 2010

2) CALCUL DE LA CONSOMMATION DE CARBURANT & DES EMISSIONS

Energie thermique	NA	NA	NA
-------------------	----	----	----

Type de carburant	Part	Consommation		Emissions GES [kg/t. enrobé]				
		t. carb.	l. carb.	CO ₂ [CO ₂ e]	CH ₄ [CO ₂ e]	N ₂ O [CO ₂ e]	Total [CO ₂ e]	
Fioul		NA	NA	NA	NA	NA	0.000	
Diesel		NA	NA	NA	NA	NA	0.000	
Gaz		NA	NA	NA	NA	NA	0.000	
Electricité							NA	
Autre		0.000	0.000	0	0	0	0.000	
Total								0.000

Allocation carburants incorrecte

C. CALCUL DES COUTS ASSOCIES

1) CONSTANTES & HYPOTHESES

Prix du carburant			
Type de carburant	Unité	Valeur	Source
Prix moyen du fioul	cts/t	81.39	OF, Suisse (2010)
Prix moyen diesel	cts/l	144.00	Hyp (Famsa 2010)
Prix moyen gaz	cts/kWh	9.60	OFEN, Suisse (2009)
Prix moyen électricité	cts/kWh	20.88	ElCom, 2011, Cat C3
Autre	cts/kWh		

Prix des additifs		
Additif	CHF/kg	Source
Cire	5.2	VSS2008/502
Chimique	6.565	Ceca, 2010
Fluxant		
Autre		

2) CALCUL DES COUTS ENERGETIQUES

Energie thermique	NA	NA	NA
-------------------	----	----	----

Type de carburant	Part	t. carb.	Prix par UR [CHF]
Fioul	0%	NA	NA
Diesel	0%	NA	NA
Gaz	0%		NA
Electricité	0%		NA
Autre	0%	0.000	NA
Total (CHF)			0.00

Allocation carburants incorrecte

3) CALCUL DES COUTS LIES AUX ADDITIFS

Additif	Dosage	Masse add.	Prix
-	%/bit.	kg / UR	CHF/UR
Faire un choix		0.000	0.000
			CHF/t _{mat.}
			0.00

4) COUTS TOTAUX

Prix par unité de référence	0.000	Note: Coût énergétique + coût additif à l'achat
Prix par tonne d'enrobé	0.000	Note: Coût énergétique + coût additif à l'achat

Hyp: Energie et additifs seuls (granulats et liant non comptés)
Note: Données relatives au développeur en colonnes masquées

340

C5 - Energie de chauffage du malaxeur

Date 01.07.2011

A. CALCUL DE L'ENERGIE DE CHAUFFAGE DE L'AIR (MALAXEUR)

1) HYPOTHESES

Débit d'air	m ³ air/h	
Production	t/h	
Humidité entrée	%	
Temp. air entrée	°C	
Temp. séchage	°C	

Hypothèse: granulats secs

Temp. air sortie	°C	0
------------------	----	---

2) CONSTANTES

Capacité thermique massique	kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	1.006
Pression atmosphérique Patm	Pa	101325
Masse molaire de l'eau	g/mol	18
Masse molaire de l'air	g/mol	28.97
Constante universelle gaz parfaits (R)	J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹	8.314
Chaleur massique vapeur d'eau	kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	1.83
Chaleur massique air sec	kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	1.007

Légende

Données à insérer par l'utilisateur
Hypothèses pour constantes
Données à compléter si nécessaire
Résultats à reporter pour analyse sur cycle de vie
Données et calculs complémentaires (non utilisés)

3) DONNEES PSYCHROMETRIQUES (MALAXEUR)

		Entrée	Sortie
Humidité	%	0	#DIV/0!
Patm	Pa	101325	101325
Psat	Pa	610.78	610.78
Concen. eau	mol _{eau} /mol _{air}	0	#DIV/0!
Concen. eau	kg _{eau} /kg _{air}	0	#DIV/0!

4) CALCUL ENERGIE NECESSAIRE AU CHAUFFAGE DE L'AIR

		Entrée	Sortie
Températures	°C	0	0
Humidité	%	0	#DIV/0!
Masse air sec	kg	#DIV/0!	#DIV/0!
Masse eau	kg	#DIV/0!	#DIV/0!
Energie ch. de l'air	kJ/t _{entr}		#DIV/0!
Energie ch. vapeur d'eau	kJ/t _{entr}		#DIV/0!
Energie chauffage totale	kJ/t _{entr}		#DIV/0!

B. CALCUL DE LA CONSOMMATION DE CARBURANT ET DES EMISSIONS

1) CONSTANTES & HYPOTHESES

Pouvoir calorifique inférieur - PCI		
Carburant	GJ/t. carb.	Source
Fioul	40.97	Defra, 2010
Diesel	42.81	Defra, 2010
Gaz	47.59	Defra, 2010
Autre		

Emissions GES [kg/t. carburant]				
Carburant	CO ₂ [CO _{2,e}]	CH ₄ [CO _{2,e}]	N ₂ O [CO _{2,e}]	Source
Fioul	3205.5	2.6	11.6	Defra, 2010
Diesel	3164.3	1.8	35.0	Defra, 2010
Gaz	2712.2	4.0	1.6	Defra, 2010
Autre				
Emissions électricité à la consommation [kg CO _{2,e} / kWh]				
Electricité	0.44566			Defra, 2010

Masse volumique		
Carburant	l./t. carb.	Source
Fioul	1023	Defra, 2010
Diesel	1198	Defra, 2010
Gaz	1340651	Defra, 2010
Autre		

2) CALCUL DE LA CONSOMMATION DE CARBURANT & DES EMISSIONS

Energie de chauffage de l'air	kJ/t _{entr}	#DIV/0!
	MJ/t _{entr}	#DIV/0!
	GJ/t _{entr}	#DIV/0!
	kWh/t _{entr}	#DIV/0!

Carburant	Part	Consommation		Emissions GES [kg/t. enrobé]			
		t. carb.	l. carb.	CO ₂ [CO _{2,e}]	CH ₄ [CO _{2,e}]	N ₂ O [CO _{2,e}]	Total [CO _{2,e}]
Fioul		#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
Diesel		#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
Gaz		#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
Electricité							#DIV/0!
Autre		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		Allocation carburants incorrecte					
						Total	#DIV/0!

C. CALCUL DES COUTS ENERGETIQUES ASSOCIES

1) CONSTANTES & HYPOTHESES

Prix du carburant			
Type de carburant	Unité	Valeur	Source
Prix moyen du fioul	cts/l	81.39	OFS, Suisse (2010)
Prix moyen diesel	cts/l	144.00	Hyp (Famsa 2010)
Prix moyen gaz	cts/kWh	9.60	OFEN, Suisse (2009)
Prix moyen électricité	cts/kWh	20.88	ElCom, 2011, Cat C3
Autre			

2) CALCUL DES COUTS ENERGETIQUES


Energie chauffage	kJ/t _{entr}	#DIV/0!
	GJ/t _{entr}	#DIV/0!
	kWh/t _{entr}	#DIV/0!

Pouvoir calorifique inférieur - PCI		
Carburant	GJ/t. carb.	Source
Fioul	40.97	Defra, 2010
Diesel	42.81	Defra, 2010
Gaz	47.59	Defra, 2010
Autre		


Masse volumique		
Carburant	l./t. carb.	Source
Fioul	1023	Defra, 2010
Diesel	1198	Defra, 2010
Gaz	1340651	Defra, 2010
Autre		


Type de carburant	Part	t. carb.	l. carb.	Prix par t _{entr} [CHF]	
Fioul	0%	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
Diesel	0%	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
Gaz	0%			#DIV/0!	
Electricité	0%			#DIV/0!	
Autre	0%			#DIV/0!	
		Allocation carburants incorrecte			
				Total	#DIV/0!

C6 - Exemple de résultat de calcul avec le logiciel ECOROOT



ASSOCIATION DE RECHERCHE
TECHNOLOGIE ET SCIENCES
BÂTI ET MÉTIERS PRIVILÉGIÉS





Direction régionale
et interdépartementale
de l'équipement
et de l'aménagement
ILE-DE-FRANCE
CETE Ile-de-France
Liberté • Égalité • Proximité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

CARACTERISTIQUES THERMO-HYDRIQUES

Température de sortie	155	°C
Eau résiduelle	0	% base enrobés secs
Eau additionnelle	0	% base enrobés secs

FORMULE


AC T 22S - Chaud

Granulométrie	% base	
	enrobés secs	base sèche
0-2	23,5	5
2-4	11,7	2
4-8	17,4	2
8-11	6,5	2
11-16	12	2
16-22	20	2
Autre	0	0
Autre	0	0
Autre	0	0
Fines	4,5	1
Agrégats d'enrobé	0	0
Emulsion bitume	0	0
Bitume d'apport	4,4	0


DEPENSE ENERGETIQUE ET EMISSION DE GES


Coût énergétique	172,3	MJ / tonne enrobés
Consommation fioul	4,3	kg fioul / tonne enrobés
Emission CO2 fioul	13,2	kg CO2 / tonne enrobés
Empreinte carbone fioul	3,6	kg C / tonne enrobés
Consommation gaz	3,5	kg gaz / tonne enrobés
Consommation gaz	4,8	Nm3 gaz / tonne enrobés
Emission CO2 gaz	9,5	kg CO2 / tonne enrobés
Empreinte carbone gaz	2,6	kg C / tonne enrobés

Données d'entrée
 Résultats



ASSOCIATION DE RECHERCHE
TECHNOLOGIE ET SCIENCES
BÂTI ET MÉTIERS PRIVILÉGIÉS





Direction régionale
et interdépartementale
de l'équipement
et de l'aménagement
ILE-DE-FRANCE
CETE Ile-de-France
Liberté • Égalité • Proximité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

DONNEES THERMOPHYSIQUES

chaleur massique éléments grossiers	837	J/(kg.K)
chaleur massique éléments fins	837	J/(kg.K)
chaleur massique recyclés	837	J/(kg.K)
chaleur massique fines	837	J/(kg.K)
chaleur massique bitume	2093	J/(kg.K)
chaleur massique eau	4185	J/(kg.K)
chaleur massique vapeur	1830	J/(kg.K)
T°C ébullition eau	100	°C
chaleur latente vaporisation eau	2,256	MJ/kg vapeur
PCI fioul	40,4	MJ/kg combustible
PCI gaz naturel (massique)	49,8	MJ/kg combustible
PCI gaz naturel (volumique)	35,6	MJ/Nm3 combustible
émission CO2 fioul	3,106	kg CO2/kg combustible
émission CO2 gaz naturel	2,75	kg CO2/kg combustible
coût énergétique émulsion	250	kJ/kg émulsion

HYPOTHESES STANDARD

Température initiale des matériaux	15	°C
Température introduction bitume	160	°C
Température émulsion	0	°C
Bitume agrégats d'enrobé	0	%

C7 - Analyse paramétrique : Cas de base

Date 01.07.2011

A. CALCUL DE L'ENERGIE THERMIQUE POUR LA FABRICATION D'ENROBE (Chauffage granulats et eau)

Légende

- Données à compléter si nécessaire
- Données à insérer par l'utilisateur
- Hypothèses pour constantes
- Résultats à reporter pour analyse sur cycle de vie

1) CONSTANTES

Composant	Constante	Nom	Unité	Valeur	Source
Granulats	Chaleur massique	C_{gran}	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	0.837	-
	Chaleur massique	C_{bit}	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	2.093	-
Eau	Chaleur massique eau	C_{eau}	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	4.185	-
	Chaleur latente de vaporisation	L_v	kJ/kg	2256	-
	Chaleur massique vapeur d'eau	C_{vap}	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	1.83	-
Cire	Chaleur massique cire solide	$C_{cires,s}$	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	1.7	SasolWax
	Enthalpie de fusion	L_f	kJ/kg	240	SasolWax
	Chaleur massique cire liquide	$C_{cires,l}$	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	2.3	SasolWax
Additif	Chaleur massique additif	C_{add}	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	2	Ceca

2) HYPOTHESES ET DONNES GENERALES

Type d'enrobé (liste) Enrobé à chaud

Teneur en eau des granulats [%]	2
Teneur en eau du sable [%]	5
Teneur en eau du filler [%]	1
Température initiale granulats [°C]	15
Température initiale sable & filler [°C]	15
Température initiale bitume [°C]	160
Température finale granulats [°C]	155
Température finale sable & filler [°C]	155
Température finale bitume [°C]	160
Laisser vide	
Laisser vide	
Laisser vide	

3) COMPOSITION DE L'ENROBE

Composition massique	[%]
Filler	4.68
Granulats 0/2 - Sable	24.61
Granulats 2/4	12.21
Granulats 4/8	18.2
Granulats 8/11	6.8
Granulats 11/16	12.5
Granulats 16/22	21
Liant / enrobé	4.4
	100
Vérification	
	100
Laisser vide	
Laisser vide	
Laisser vide	
Laisser vide	

4) CALCUL DE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE

Unité ref. UR [kg gran. secs]	1000
-------------------------------	------

	Masse sèche [kg]	Masse d'eau [kg]	T_{in} [°C]	T_{fin} [°C]	Energie thermique [MJ]			Proportion
					Mat. sèche	Eau	Total	
Filler	46.80	0.47	15	155	5.48	1.27	6.75	4%
Granulats 0/2 - Sable "sec"	246.10	12.31	15	155	28.84	33.38	62.21	33%
Granulats 0/2 - Sable humide	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
Granulats 2/4	122.10	2.44	15	155	14.31	6.62	20.93	11%
Granulats 4/8	182.00	3.64	15	155	21.33	9.87	31.20	16%
Granulats 8/11	68.00	1.36	15	155	7.97	3.69	11.66	6%
Granulats 11/16	125.00	2.50	15	155	14.65	6.78	21.43	11%
Granulats 16/22	210.00	4.20	15	155	24.61	11.39	36.00	19%
Liant / enrobé	44.00	NA	160	160	0.00	NA	0.00	0%
Vérification unité de référence [kg]	1000.00							
Cire	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
Additif	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
					Total	117.18	73.00	190.18
					Part rel.	62%	38%	100%
Masse totale d'enrobé [kg]	1044.00							
Rendement	100%							
Total corrigé avec rdt [MJ]	190.18							
Total corrigé avec rdt [MJ/t. enrobé]	182.17							
Température du mélange [°C]	155							

CONSOMMATION ENERGETIQUE PAR COMPOSANT [%]

QUANTITE D'ENERGIE NECESSAIRE POUR EAU ET LA MATIERE SECHE [%]

B. CALCUL DE LA CONSOMMATION DE CARBURANT ET DES EMISSIONS

1) CONSTANTES & HYPOTHESES

Carburant	GI/t. carb.	Source
Fioul	40.97	Defra, 2010
Diesel	42.81	Defra, 2010
Gaz	47.59	Defra, 2010
Autre		

Carburant	CO ₂ [CO _{2,e}]	CH ₄ [CO _{2,e}]	N ₂ O [CO _{2,e}]	Source
Fioul	3205.5	2.6	11.6	Defra, 2010
Diesel	3164.3	1.8	35.0	Defra, 2010
Gaz	2712.2	4.0	1.6	Defra, 2010
Autre				
Emissions électricité à la consommation [kg CO _{2,e} / kWh]				
Electricité	0.44566			Defra, 2010

Carburant	l./t. carb.	Source
Fioul	1023	Defra, 2010
Diesel	1198	Defra, 2010
Gaz	1340651	Defra, 2010
Autre		

2) CALCUL DE LA CONSOMMATION DE CARBURANT & DES EMISSIONS

Energie thermique	182.2 MJ	0.18 GI	50.6 kWh
-------------------	----------	---------	----------

Type de carburant	Part	Consommation		Emissions GES (kg/t. enrobé)				
		t. carb.	l. carb.	CO ₂ [CO _{2,e}]	CH ₄ [CO _{2,e}]	N ₂ O [CO _{2,e}]	Total [CO _{2,e}]	
Fioul	90%	0.004	4.094	12.828	0.010	0.046	12.884	
Diesel		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Gaz		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Electricité	10%						2.255	
Autre		0.000	0.000	0	0	0	0.000	
	OK						Total 15.140	

C. CALCUL DES COUTS ASSOCIES

1) CONSTANTES & HYPOTHESES

Prix du carburant		
Type de carburant	Unité	Valeur
Prix moyen du fioul	cts/l	81.39
Prix moyen diesel	cts/l	144.00
Prix moyen gaz	cts/kWh	9.60
Prix moyen électricité	cts/kWh	20.88
Autre	cts/kWh	

Prix des additifs		
Additif	CHF/kg	Source
Cire	5.2	VSS2008/502
Chimique	6.565	Ceca, 2010
Fluxant		
Autre		

2) CALCUL DES COUTS ENERGETIQUES

Energie thermique	182.2 MJ	0.18 GI	50.6 kWh
-------------------	----------	---------	----------

Type de carburant	Part	t. carb.	l. carb.	Prix par UR [CHF]
Fioul	90%	0.004		3.33
Diesel	0%	0.000		0.00
Gaz	0%	0.000		0.00
Electricité	10%			1.06
Autre	0%	0.000		NA
				Total (CHF) 4.39

3) CALCUL DES COUTS LIES AUX ADDITIFS

Additif	Dosage	Masse add.	Prix
	%/bit.	kg / UR	CHF/UR
Faire un ch...		0.000	0.000
		0.000	0.000

4) COUTS TOTAUX

Prix par unité de référence	4.389	Note: Coût énergétique + coût additif à l'achat
Prix par tonne d'enrobé	4.389	Note: Coût énergétique + coût additif à l'achat

Hyp: Energie et additifs seuls (granulats et liant non comptés)
Note: Données relatives au développeur en colonnes masquées

C8 - Analyse de la consommation énergétique en centrale

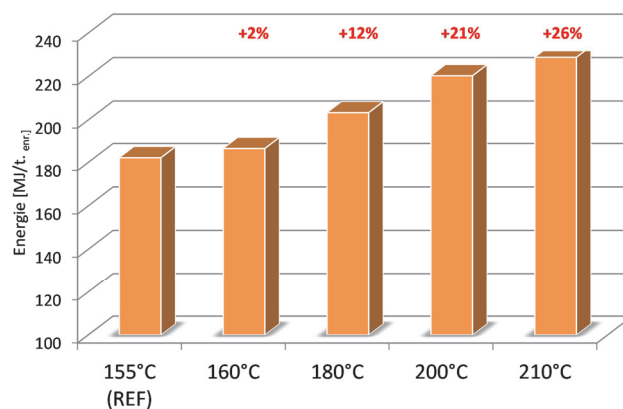
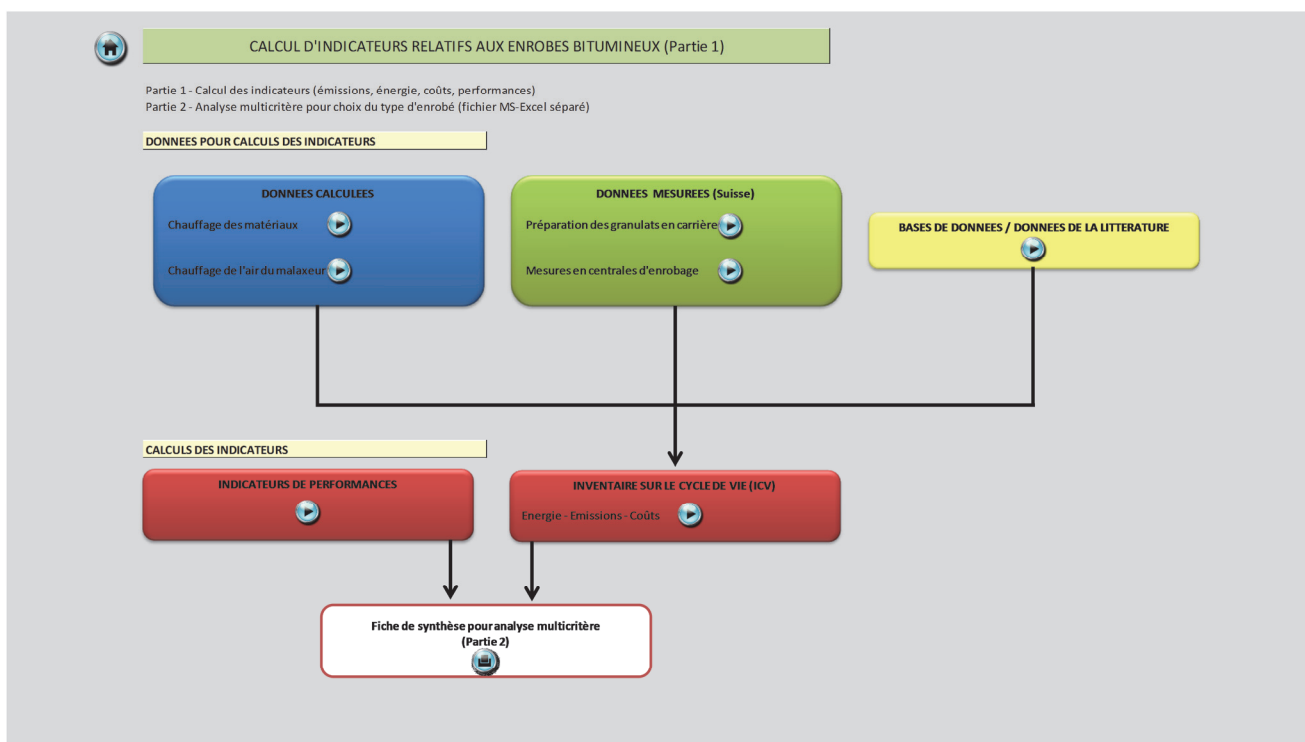


Figure 12-36 : Effet de la température initiale des granulats (enrobé à chaud AC T 22S)

Annexe D. Modèle multicritère - Partie 1 (Chapitre 7)

Copies d'écran relatives à la première partie du modèle développé (version 1.10).

D1 - Ecran d'accueil et navigation



D2 - Base de donnée pour inventaire du cycle de vie

Légende			BASE DE DONNEE POUR ICV																	
ND: Données non disponibles Données à intégrer par l'utilisateur (option) Hypothèse dans allocation énergétique Données calculées sur la base de la consommation énergétique ou des émissions Données CO ₂ eq calculées dans la base de données Données reportées de la source																				
N° étape (PL)	Processus unitaire	Enrobé	Energie (Mj)							Emissions dans l'air (ou)			Coûts énergétiques		Source	Remarques complémentaires				
			Unité	Total	Foual	Diesel	Elec.	Gas	Autre	Unités	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Unité			Valeur			
1 - Matière première: Granulats																				
1A	Extraction des granulats, sable	Tous	Donnée à compléter (1A)													Donnée à compléter				
1B	Concassage, tri, granulométrie, stockage (granulats, sable)	Tous	Donnée à compléter (1B)													Donnée à compléter				
1A/B	Production de granulats	Tous	Milage au produit fini, cas SWE (2000)	Mj/t. gra.	88.20	22.00	17.00	21.20					kg/t. gra.	3.58	3.88	Recherche	Stipplé, IVL 2000			
		Tous	Milage au produit fini, cas GBR	Mj/t. gra.	83.00	22.00	6.64	54.37						kg/t. gra.	4.80	5.20	Recherche	ICC v2.0 (Bath), 2011		
		Tous	Milage au produit fini, donnée USBRF	Mj/t. gra.	56.00	15.00	37.00							kg/t. gra.	6.07	6.07	Recherche	2005		
		Tous	Milage au produit fini, cas SWE (2003)	Mj/t. gra.	38.18	16.99	21.19							kg/t. gra.	1.42	0.00	0.00	1.43	Recherche	Stipplé, IVL 2003
		Tous	Milage au produit fini, RD Genies	Mj/t. gra.	10.84	5.04	5.80							kg/t. gra.	3.25	0.00	0.00	3.31	Recherche	ECRPO, 2010
		Tous	Matière concassé, typique CH	Mj/t. gra.	12.47		12.47							kg/t. gra.	1.78	0.00		1.78	Recherche	Ecovient 2.2
		Tous	Matière concassé, typique CH	Mj/t. gra.	3.81		3.81							kg/t. gra.	1.32	0.00		1.32	Recherche	BD Ecovient 2.2
		Tous	Donnée utilisateur (1A/B) - Granulats	Mj/t. gra.										kg/t. gra.					Recherche	
	Production de sable	Tous	Du minage au produit fini, cas SWE	Mj/t. sab.	27.00	16.00	11.00							kg/t. sab.	2.54			2.54	Recherche	Stipplé, IVL 2000
		Tous	Du minage au produit fini, cas GBR	Mj/t. sab.	8.20	2.15	5.31	0.65						kg/t. sab.	1.80	0.00	0.00	5.30	Recherche	ICC v2.0 (Bath), 2011
		Tous	Du minage au produit fini, RD Genies	Mj/t. sab.	27.00	16.00	11.00							kg/t. sab.	6.85	0.00	0.00	7.01	Recherche	ECRPO, 2010
		Tous	Donnée utilisateur (1A/B) - Sable	Mj/t. sab.										kg/t. sab.					Recherche	
	Production de sable	Tous	Du minage au produit fini, cas SWE	Mj/kg filler	0.24	0.02	0.22							g/kg filler	7.90	0.02		8.32	Recherche	Stipplé, IVL 2000
		Tous	Donnée utilisateur (1A/B) - Filler	Mj/kg filler										g/kg filler					Recherche	
1C	Stockage granulats	Tous	HYP: Consommation d'énergie nulle	Mj/t. gra.	0.00									kg/t. gra.	0.00	0.00	0.00	0.00	Recherche	NA
	Stockage granulats	Tous	Donnée utilisateur (1C)	Mj/t. gra.										kg/t. gra.					Recherche	
2 - Matière première: Bitume																				
2A	Forage et extraction pétrole brut	Tous	Bitume 50/70, distillation directe (EU)	Mj/kg bit.	2.20		2.20							g/kg bit.	109.92	109.92		0.09	Recherche	Eurobitume, rap. 99/00
		Tous	Gas SWE, pétrole Vénézuélien	Mj/kg bit.	6.78		6.78							g/kg bit.	59.60			0.67	Recherche	Stipplé, IVL 2001
		Tous	Donnée utilisateur (2A)	Mj/kg bit.										g/kg bit.					Recherche	
2B	Transport pétrole en Europe	Tous	Bitume 50/70, distillation directe (EU)	Mj/kg bit.	0.59	0.59								g/kg bit.	45.94	45.94		0.012	Recherche	Eurobitume, rap. 99/00
		Tous	Gas SWE, pétrole Vénézuélien	Mj/kg bit.	0.29	0.29								g/kg bit.	22.20	22.20		0.006	Recherche	Stipplé, IVL 2001
		Tous	Donnée utilisateur (2B)	Mj/kg bit.										g/kg bit.					Recherche	
2C	Raffinage (production/stockage/trsp interne)	Tous	Bitume 50/70, distillation directe (EU)	Mj/kg bit.	1.73	0.50	0.17	1.06						g/kg bit.	100.18	100.18		0.048	Recherche	Eurobitume, rap. 99/00
		Tous	Bitume 50/70, distillation directe (CE)	Mj/kg bit.	4.01	4.00	0.01							g/kg bit.	40.00	0.00	0.00	40.00	Recherche	ECRPO, 2010
		Tous	Raffinerie Colombes et Creaser (CE)	Mj/kg bit.	0.20			0.20						g/kg bit.	105.62	0.04		105.66	Recherche	Ecovient 2.2
		Tous	Moyenne européenne	Mj/kg bit.	0.11			0.11						g/kg bit.	176.48	0.07		177.93	Recherche	Ecovient 2.2
		Tous	Etude française (1996)	Mj/kg bit.	1.73	1.71								g/kg bit.	133.58			133.96	Recherche	Gruc & Avarez, 1996
		Tous	Donnée utilisateur (2C)	Mj/kg bit.										g/kg bit.					Recherche	
2C-1	Raffinage du pétrole	Tous	Gas SWE, pétrole Vénézuélien	Mj/kg bit.	0.66	0.57	0.09							g/kg bit.	37.00			37.00	Recherche	Stipplé, IVL 2001
		Tous	Donnée utilisateur (2C-1)	Mj/kg bit.										g/kg bit.					Recherche	
2C-2	Transport du bitume de raffinerie au dépôt	Tous	Gas SWE, pétrole Vénézuélien	Mj/kg bit.	0.15	0.15								g/kg bit.	11.30			11.30	Recherche	Stipplé, IVL 2001
		Tous	Donnée utilisateur (2C-2)	Mj/kg bit.										g/kg bit.					Recherche	
2C-3	Stockage du bitume au dépôt	Tous	Gas SWE, pétrole Vénézuélien	Mj/kg bit.	0.38	0.02	0.36							g/kg bit.	1.44			1.44	Recherche	Stipplé, IVL 2001
		Tous	Donnée utilisateur (2C-3)	Mj/kg bit.										g/kg bit.					Recherche	
2A/B/C	Extraction & raffinage du pétrole (production, stockage, trsp interne)	Tous	Bitume 50/70, cas Europe Ouest	Mj/kg bit.	4.34	1.09		3.25						g/kg bit.	280.00	280.00		0.109	Recherche	Stipplé, IVL 2000
		Tous	Donnée utilisateur (2A/B/C)	Mj/kg bit.										g/kg bit.					Recherche	
3 - Matière première: Adhésifs																				
3A	Extraction MP pour additif cire	Tous	Donnée à compléter (3A-cire)	Mj/kg add.										g/kg add.	0.00			0.00	Recherche	
	Extraction MP pour additif chimique	Tous	Donnée à compléter (3A-additif chimique)	Mj/kg add.										g/kg add.	0.00			0.00	Recherche	
	Extraction MP pour additif divers	Tous	Donnée à compléter (3A-additif divers)	Mj/kg add.										g/kg add.	0.00			0.00	Recherche	
	Extraction MP pour additif divers	Tous	Donnée utilisateur (3A)	Mj/kg add.										g/kg add.					Recherche	
3C	Fabrication cire	Tous	Donnée à compléter (3C-cire)	Mj/kg add.										g/kg add.	0.00			0.00	Recherche	
	Fabrication additif chimique	Tous	Donnée à compléter (3C-additif chimique)	Mj/kg add.										g/kg add.	0.00			0.00	Recherche	
	Fabrication émulsion	Tous	Donnée à compléter (3C-émulsion)	Mj/kg add.										g/kg add.	0.00			0.00	Recherche	
	Fabrication additif divers	Tous	Donnée à compléter (3C-additif divers)	Mj/kg add.										g/kg add.	0.00			0.00	Recherche	
	Fabrication additif divers	Tous	Donnée utilisateur (3C)	Mj/kg add.										g/kg add.					Recherche	
3A/B/C	Fabrication additif chimique	Tous	Agent tensio-actif	Mj/kg add.	79.00									g/kg add.	3000.00	3000.00		1.605	NA	Meeting et emalica Cae
		Tous	Donnée utilisateur (3A/B/C) - Surfactant	Mj/kg add.										g/kg add.					Recherche	
		Tous	Cire synthétique (Fischer-Tropsch)	Mj/kg add.	72.85	72.85								g/kg add.	5700.00			1.481	Recherche	eSPECT, 2010
		Tous	Cire brulée (paraffine)	Mj/kg add.	4.73	4.73								g/kg add.	370.00			0.096	Recherche	eSPECT, 2010
		Tous	Donnée utilisateur (3A/B/C) - Cire	Mj/kg add.										g/kg add.					Recherche	
		Tous	Fabrication cire	Mj/kg add.	1.60	1.60	0.00							g/kg add.	16.00	0.00	0.00	16.00	Recherche	ECRPO, 2010
		Tous	Emulsion 50% de bitume (CEP)	Mj/kg add.	4.92	4.92								g/kg add.	340.00			0.088	Recherche	eSPECT, 2010
		Tous	Emulsion 50% de bitume	Mj/kg add.	58.70	58.70	2.10							g/kg add.	600.00	0.10	0.00	600.20	Recherche	Stipplé, IVL 2000
		Tous	Donnée utilisateur (3A/B/C) - Emulsion/Autre	Mj/kg add.										g/kg add.					Recherche	
4-7 - Fabrication, pose et compactage																				
4	Fabrication en centrale d'enrobage	Chaud	Centrale continue Rou/Electrique (moy)	Mj/t. enr.	276.00	251.00	25.00							kg/t. enr.	19.58	19.58		6.531	Recherche	Stipplé, IVL 2000
		Chaud	Centrale discontinue, mesure ponctuelle	Mj/t. enr.	189.00		30.00	189.00						kg/t. enr.	9.02	0.00	0.00	9.04	Recherche	Ventura, TRB 2009
		Chaud	Centrale foud (hypothèse)	Mj/t. enr.	251.70	251.70								kg/t. enr.	19.69	19.69		5.115	Recherche	Crémation, 2005
		Chaud	6% de bitume, cas SWE	Mj/t. enr.	321.00	285.20	36.00							kg/t. enr.	22.50	22.50		7.880	Recherche	Stipplé, IVL 2001
		Chaud	4.7% de bitume, couche de base	Mj/t. enr.	227.18		227.18							kg/t. enr.	15.90	15.90		6.059	Papier conf.	Gonatas, Environm 2009
		Chaud	Centrale discontinue, 200 L/h	Mj/t. enr.	285.85	267.85								kg/t. enr.	18.95	0.32	0.00	19.43	Recherche	ECRPO, 2010
		Chaud	Centrale FRA, 1996	Mj/t. enr.	260.43	260.43	234.19							kg/t. enr.	16.80			16.89	Recherche	Gruc & Avarez, 1996
		Chaud	Donnée utilisateur (4) - Enrobé à chaud	Mj/t. enr.										kg/t. enr.					Recherche	
		Chaud	Enrobé 8/16	Mj/t. enr.	234.00	211.00	23.00							kg/t. enr.	20.00	20.00		5.622	Recherche	Chaput & Bria, 2004
		Tiède	Crackbase RT (0.4-0.5), couche base	Mj/t. enr.	87.60		87.60							kg/t. enr.	13.40			13.40	Papier conf.	Gonatas, Environm 2009
		Semi-tiède	Proced48 EBT, centrale discontinue	Mj/t. enr.	87.60		80.00	0.00						kg/t. enr.	3.18	0.00	0.00	3.21	Recherche	Ventura, TRB 2009
		Tiède	Donnée utilisateur (4) - Enrobé tiède	Mj/t. enr.										kg/t. enr.					Recherche	
		Semi-tiède	Donnée utilisateur (4) - Enrobé semi-tiède	Mj/t. enr.										kg/t. enr.					Recherche	
6	Pose de l'enrobé (Hissour)	Tous	Dynapac F121, vitesse 3000 m ³ /h	Mj/m ²	0.11	0.11								kg/m ²	0.01	0.01		0.004	Recherche	Stipplé, IVL 2000
		Tous	Dynapac F161, vitesse 3000 m ³ /h	Mj/m ²	0.11	0.11								kg/m						

D3 - Résultat d'inventaire du cycle de vie (exemple)

2) TABLE DES PROCESSUS UNIVARIÉS

1) DONNÉES COMPLEMENTAIRES ET HYPOTHÈSES

Données relatives au mélange

Type d'encre: Unité fonctionnelle: 1

Teneur en ciment: 4.21%

Teneur en lait: 0.02%

Masses de granulats: 0.62%

Masses de sable: 0.23%

Masses de liant: 0.04%

Type d'additif: Cae (P1) 4.00%

Teneur en additif: 1.0%

Masses granulats: 1.0%

Données relatives au chantier

Épaisseur de couche: 6 cm

Volume: 24 m³

Surface pavée (LxL): 144 m²

Surface pavée (LxL): 6.9 m²

Données de transport

Densité: 2400 kg/m³

1D	300
2D	100
3D	300
4D	300
5	40

3) INVENTAIRE SUR LE CYCLE DE VIE

N° PU	Matériau	Type de données	PU	Choix dans la BD	Unité	Valeur	Résultats émissions		Coûts		Total	
							Émission CO2-eq	Valeur	Unité	Valeur	Émission [kg CO2-eq]	Coût [CHF]
Total Phase 1 - Matériau première Blumex												
1A, 1B	Granulats	Choix données BD - Données spécifiques par PU NE - Données moyennes	1A/B 1A 1B	Mélange au producteur (A), données usine Bonnet usine (A) Bonnet usine (B)	kg/Kg	-	-	-	-	-	-	-
1A, 1B	Sable	Choix données BD - Données spécifiques par PU NE - Données moyennes	1A/B 1A 1B	Voie d'origine (A) Bonnet usine (A) Bonnet usine (B)	kg/Kg	30.21	4.21	1.950	33.95	2.87	1.319	0.300
1A, 1B	Liant	Choix données BD - Données spécifiques par PU NE - Données moyennes	1A/B 1A/B	Carriage au producteur (A), car site Carriage au producteur (B), car site	kg/Kg	0.24	8.32	0.033	30.87	0.37	0.992	0.000
Total Phase 2 - Matériau première Blumex												
1C	6,5, F	Choix données BD	1C	Hydratation de ciment	kg/L	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.000	0.000
1D	6,5, F	Choix données BD	1D	Carbone 20-30 t, moyenne CR	kg/L	0.45	34.03	0.030	65.85	3.25	0.922	0.000
Total Phase 3 - Matériau première Blumex												
2A, 2B, 2C	Blumex	Choix des données BD - Données spécifiques BD - Données moyennes	2A/B/C 2A 2B 2C	Blumex 50/70, cat Europe Ouest Blumex 50/70, cat Europe Ouest Blumex 50/70, cat Europe Ouest	kg/Kg	2.10	109.92	0.059	92.40	4.62	2.664	0.000
2D	Blumex	Choix des données BD	2D	Carbone 20-30 t, moyenne CR	kg/Kg	0.45	34.03	0.030	65.85	3.25	0.922	0.000
Total Phase 4 - Matériau première Blumex												
3A, 3B, 3C	Additifs	Choix des données BD - Données spécifiques BD - Données moyennes	3A/B/C 3A 3B 3C	Cae synthétique (P1) Bonnet usine (A) Bonnet usine (B)	kg/Kg	72.85	5700.00	1.481	122.61	9.59	2.492	0.000
3D	Additifs	Choix des données BD	3D	Carbone 20-30 t, moyenne CR	kg/L	0.45	34.03	0.030	65.85	3.25	0.922	0.000
Total Phase 5 - Matériau première Blumex												
4	Formé	Choix des données BD NE - Données moyennes Ca - Données locales	4	Carbone 20-30 t, moyenne CR	kg/L	22.75	173.70	6.000	22.75	22.75	6.000	0.000
5	Formé	Choix des données Bases données	5	Carbone 20-30 t, moyenne CR	kg/L	0.48	34.03	0.030	65.85	3.25	0.922	0.000
Total Phase 6 - Matériau première Blumex												
6, 7	Formé	Choix des données BD - Données spécifiques BD - Données moyennes	6/7	Carbone 20-30 t, moyenne CR	kg/m²	0.11	0.81	0.004	0.76	0.05	0.001	0.000
TOTAL												

D4 - Etablissement des indices de performances (exemple)

1) DONNEES COMPLEMENTAIRES ET HYPOTHESES

Type d'essai:
 Type de corrélation considérée:
 Temps de cure (sem):

Échelle d'évaluation pour Essai indicateur normalisé à l'eau (essai stat. -ce):
 Très mauvais: 1, Mauvais: 2, Moyens: 3, Bon: 4, Très bon: 5

DETERMINATION DES INDICATEURS DE PERFORMANCES (INDICE BRUT & INDICE NORMALISE)

Données à insérer par l'utilisateur
 Résultats (indice brut ou normalisé)
 Hypothèses

Source des données:
 Essai sur mélange laboratoire:
 Base de donnée:

Valeurs seuils d'acceptabilité: (laisser vide)
 Résistance aux déformations permanentes: (laisser vide)
 Résistance à la fatigue: (Entrer valeur [10-6])

Indicateurs normalisés - Résistance à l'eau: Valeurs limites, Expérience lanc, Valeurs utilisateur

Indicateurs normalisés - Résistance à la fatigue: Valeurs limites, Expérience lanc, Valeurs utilisateur

2) ETABLISSEMENT DES INDICATEURS DE PERFORMANCE

Performances de l'ennoble bitumineux	Paramètre	Unité	Référence	Valeurs limites	Remarque
Sensibilité à l'eau	Ratio TSR	%	SN 60-431-3b-NA Autre norme (1)	70%	-
	Prof. omnire 30000 cycles	%	SN 60-431-3b-NA Autre norme (2)	10%	Classe 5
Résistance à la fatigue	Deformation [10-6]		SN 60-431-3b-NA Autre norme (3)		EME seuls

Note: 1) Sommes indicatives au développement en données insérées

CALCUL & REPRESENTATION DES INDICATEURS NORMALISES

Performance: Sensibilité à l'eau (TSR)	Calcul valeurs des graphiques	Indice brut	Calcul de l'indice normalisé
Seuil acceptable: 70%	Seuil: 70%	Résultat: 87%	Définition des limites (note): 1
Indicateur: 2.4	Indice brut: 87%	Indice normalisé: 3.1	Indicateur: 3.1

Performance: Résistance aux déformations permanentes	Calcul valeurs des graphiques	Indice brut	Calcul de l'indice normalisé
Seuil acceptable: 10%	Seuil: 10%	Résultat: 7%	Définition des limites (note): 3
Indicateur: 3.6	Indice brut: 7%	Indice normalisé: 4.5	Indicateur: 4.5

Performance: Résistance à la fatigue	Calcul valeurs des graphiques	Indice brut	Calcul de l'indice normalisé
Seuil acceptable: 70	Seuil: 70	Résultat: 10%	Définition des limites (note): 5
Indicateur: 4.3	Indice brut: 10%	Indice normalisé: 4.3	Indicateur: 4.3

Graph 1: Ratio TSR [%] vs Note [-]. Y-axis: 70.0% to 100.0%. X-axis: 1 to 5. Linear: 70.0% to 100.0%. Paliers linéaires: 70.0% to 100.0%.

Graph 2: Déformation permanente [%] vs Note [-]. Y-axis: 0.0% to 12.0%. X-axis: 1 to 5. Linear: 10.0% to 12.0%. Paliers lin. (solid blue): 10.0% to 12.0%. Paliers lin. (dashed red): 10.0% to 12.0%.

Graph 3: [10-6] vs Note [-]. Y-axis: 70 to 140. X-axis: 1 to 5. Linear: 70 to 140. Paliers lin. (solid blue): 70 to 140. Paliers lin. (dashed red): 70 to 140.

Date: 01.06.2011

Retour au menu général

Allez aux résultats des PU

D5 - Fiche de synthèse de l'ICV et des indicateurs de performances (exemple)

FICHE DE SYNTHESE

CALCUL D'INDICATEURS RELATIFS AUX ENROBES BITUMINEUX (Partie 1)

Date: 01.06.2011

Auteur: NB

Projet: Exemple de calcul

Type d'enrobé: Enrobé tiède - Cire

Additif: Cire (FT)

Résultats des calculs

Chauffage des granulats et vaporisation de l'eau

Onglet: CA-FAb1

Commentaire:

Energie	MJ/t _{enr.}	161.43
Rendement	%	100%
Température du mélange	°C	130
Emissions	kg CO _{2,eq} /t _{enr.}	13.42
Coûts	CHF/t _{enr.}	13.041

Chauffage de l'air du malaxeur

Onglet: CA-FAb2

Commentaire:

Energie	MJ/t _{enr.}	16.5
Emissions	kg CO _{2,eq} /t _{enr.}	1.4
Coûts	CHF/t _{enr.}	0.397

Etablissement des indicateurs

Inventaire sur le cycle de vie - Indicateurs énergie, émissions, coûts

Onglet: PU-Res

Processus unitaire (PU)	Energie [MJ]	Emissions [kg CO _{2,eq}]	Coûts [CHF]	Source des données
1 - Matière première: Granulats	97.04	7.09	3.144	Données mesurées et bases de données
2 - Matière première: Bitume	195.68	11.19	5.119	Bases de données
3 - Matière première: Additifs	122.84	9.61	2.496	Bases de données
4 - Centrale d'enrobage	273.70	22.75	6.600	Données calculées
5 - Transport centrale - chantier	19.18	1.36	0.390	Base de données
6 & 7 - Pose et compactage	3.47	0.27	0.086	Base de données
Total	711.91	52.27	17.835	

Indicateurs de performance

Onglet: PERF

Performances de l'enrobé bitumineux	Paramètre	Indice brut		Indice normalisé
		Unité	Valeur	
Sensibilité à l'eau	Ratio ITSr	%	87%	3.1
Résistance aux déformations permanentes	Ornière 30'000 cy.	%	5.0%	3.6
Résistance à la fatigue	Déf. ε6	[10-6]	120	4.5

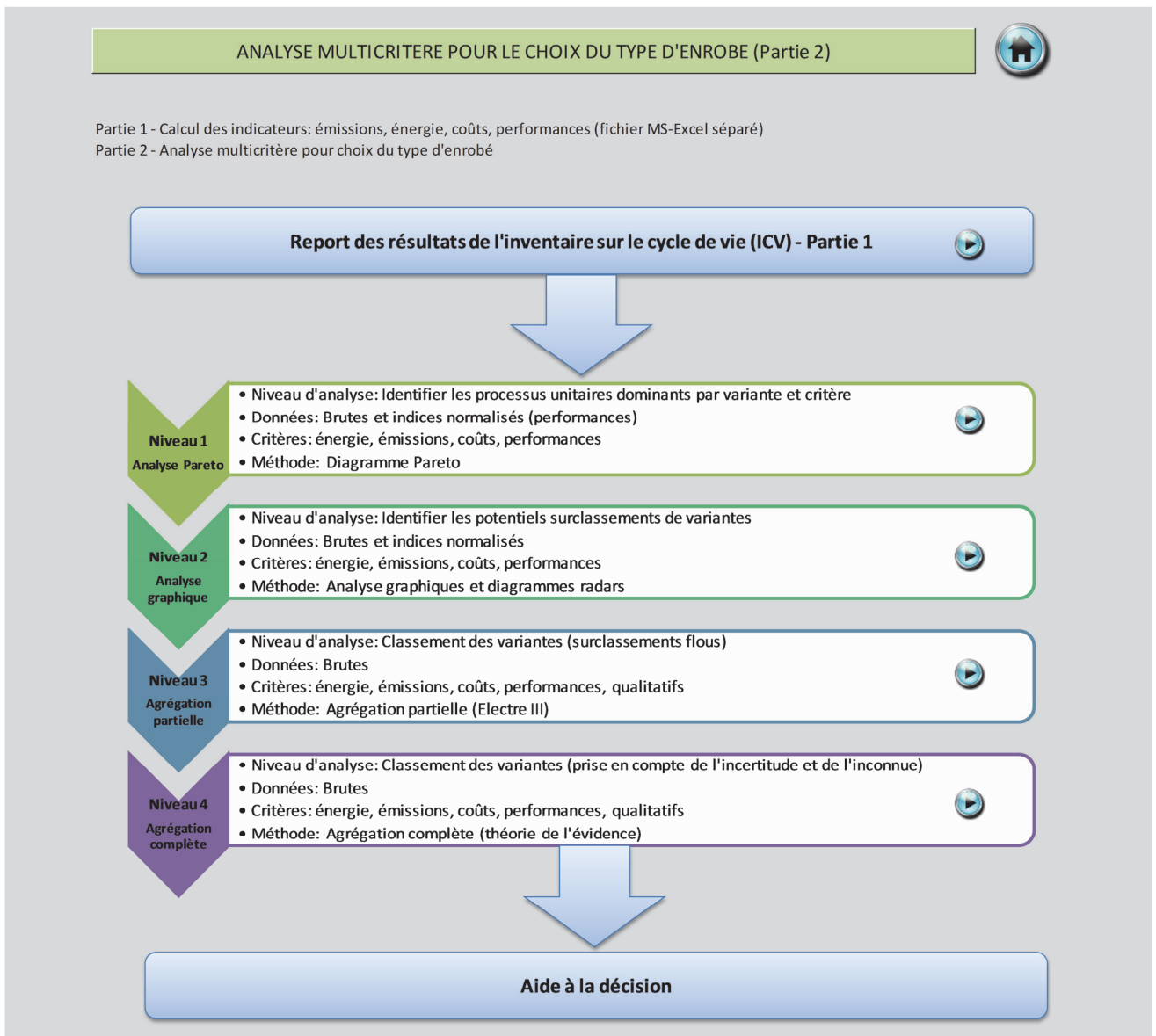
Commentaires

Note: Insérer les données dans la "Partie 2" afin de procéder à l'analyse multicritère

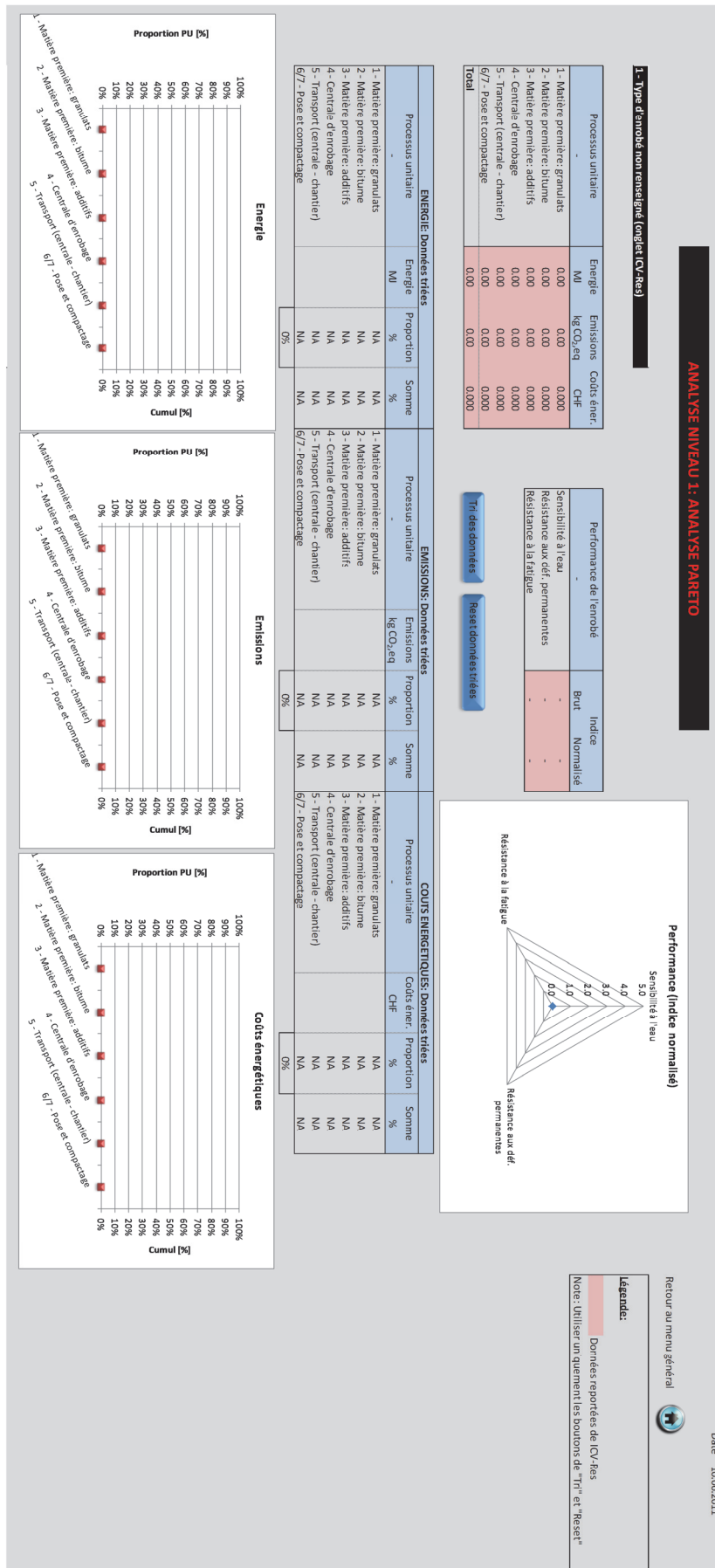
Annexe E. Modèle multicritère – Partie 2 (Chapitre 8)

Les copies d'écran relatives à la seconde partie du modèle développé sont issues de la version 1.17.

E1 - Ecran d'accueil et navigation



E2 - Niveau 1 : Analyse Pareto



E3 - Niveau 2 : Analyse graphique

ANALYSE NIVEAU 2: ANALYSE GRAPHIQUE

1) RESULTATS BRUTS

Mélange	Détails	Energie MJ	Emissions kg CO ₂ e/q	Coûts éner. CHF
Enrobé 1	Non renseigné (onglet ICV-Res)	0.00	0.00	0.000
Enrobé 2	Non renseigné (onglet ICV-Res)	0.00	0.00	0.000
Enrobé 3	Non renseigné (onglet ICV-Res)	0.00	0.00	0.000
Enrobé 4	Non renseigné (onglet ICV-Res)	0.00	0.00	0.000
Enrobé 5	Non renseigné (onglet ICV-Res)	0.00	0.00	0.000

Mélange	Détails	Sensibilité eau		Déformations perman.		Résistance fatigue	
		Brut	Normalisé	Brut	Normalisé	Brut	Normalisé
Enrobé 1	Non renseigné (onglet ICV-Res)	0.0%	0.0	0.0%	0.00	0	0.0
Enrobé 2	Non renseigné (onglet ICV-Res)	0.0%	0.0	0.0%	0.00	0	0.0
Enrobé 3	Non renseigné (onglet ICV-Res)	0.0%	0.0	0.0%	0.00	0	0.0
Enrobé 4	Non renseigné (onglet ICV-Res)	0.0%	0.0	0.0%	0.00	0	0.0
Enrobé 5	Non renseigné (onglet ICV-Res)	0.0%	0.0	0.0%	0.00	0	0.0

Légende:
Données reportées de ICV-Res
Utiliser les cellules de choix

Retour au menu général

2) COMPARATIF PAR CRITERES

Paramètre de comparaison

Energie

Emissions

Coûts énergétiques

Données du graphique

Mélange	NA
Enrobé 1	NA
Enrobé 2	NA
Enrobé 3	NA
Enrobé 4	NA
Enrobé 5	NA

Comparatif indice normalisé performances

Sensibilité à l'eau

Déformations permanentes

Résistance fatigue

Données du graphique

Mélange	Indice norm
Enrobé 1	0.0
Enrobé 2	0.0
Enrobé 3	0.0
Enrobé 4	0.0
Enrobé 5	0.0

3) COMPARATIF GLOBAL

Sélection facteurs pour normalisation (0 ... 1)

Valeurs du projet en cours (max)

Valeurs par défaut

Sélection des performances

Choix de (des) performance(s) à comparer

Facteurs pour calcul des données normalisées (0 ... 1)

Energie	Emissions	Coûts	Sens. eau	Def. perm.	Fatigue
0.00	0.00	0.00	0.0%	0.0%	0

Note: les valeurs par défaut peuvent être modifiées (colonnes cachées)

Mélange	Détails	Note énergie	Note émissions	Note coûts éner.	Note perf.
Enrobé 1	Non renseigné (onglet ICV-Res)	NA	NA	NA	NA
Enrobé 2	Non renseigné (onglet ICV-Res)	NA	NA	NA	NA
Enrobé 3	Non renseigné (onglet ICV-Res)	NA	NA	NA	NA
Enrobé 4	Non renseigné (onglet ICV-Res)	NA	NA	NA	NA
Enrobé 5	Non renseigné (onglet ICV-Res)	NA	NA	NA	NA

E4 - Niveau 3 : Agrégation partielle

Date 10.06.2011

Retour au menu général

ANALYSE NIVEAU 3: AGRÉGATION PARTIELLE

1) CRITÈRES, PONDERATION & ACTIONS

Poids-Utilisateur

Poids-Equilibré

Poids-Défaut

N°	Critère	w	Ponderation w [0...1]				
C1	Energie	u ₁					
C2	Emissions	u ₂					
C3	Coûts énergétiques	u ₃					
C4	Critères performantiel	u ₄					
C5	Critères qualitatifs	u ₅					
C4.1	Performance - Sensibilité à l'eau	u _{4.1}					
C4.2	Performance - Résistance aux déformations permanentes	u _{4.2}					
C4.3	Performance - Résistance à la fatigue	u _{4.3}					
C5.1	Complexité du processus de fabrication	u _{5.1}					
C5.2	Potentiel de recyclabilité	u _{5.2}					
Somme w		0,00					
Vérification		Compléter					

Critère	Min	Max
u ₁	0,10	0,40
u ₂	0,10	0,40
u ₃	0,20	0,50
u ₄	0,10	0,40
u ₅	0,00	0,20
u _{4.1}	0,20	0,50
u _{4.2}	0,20	0,50
u _{4.3}	0,20	0,50
u _{5.1}	0,30	0,70
u _{5.2}	0,30	0,70

Légende

- A compléter par utilisateur
- Hypothèses, recommandations

Légende des actions

- a₁ 1- Type d'ennobé non renseigné (onglet (CV-Res))
- a₂ 2- Type d'ennobé non renseigné (onglet (CV-Res))
- a₃ 3- Type d'ennobé non renseigné (onglet (CV-Res))
- a₄ 4- Type d'ennobé non renseigné (onglet (CV-Res))
- a₅ 5- Type d'ennobé non renseigné (onglet (CV-Res))

2) NOTES DES CRITÈRES QUALITATIFS

Notes pour critère qualitatif CS.1 - Complexité du processus de fabrication		Note [1...6]					
Arguments	Ponderation w _{CS.1} [0...1]		a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅
	Min	Max					
Séquence d'ennobage	0,20	0,50					
Mode d'insertion de l'additif	0,20	0,50					
Alour/maîtrise teneur en eau	0,20	0,50					
Somme w _{CS.1}		0,00					
Vérification		Compléter					

3) DEFINITION DES SEUILS POUR AGRÉGATION PARTIELLE

Critère	C1	C2	C3	C4.1		C4.2		C4.3		CS.1		CS.2	
				Min	Max	%	%	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	Qualitatif	Qualitatif		
Unités	MJ	kg CO ₂ eq	GWh	8,00	0,40	2,1	0,5	0,5	0,50	0	0,00	0,00	0,00
q _i	10	0,70	0,3	12,00	0,60	3,1	1,00	1,00	1,00	0	0,00	0,00	0,00
p _i	25	1,70	0,75	25,00	3,00	16	5,00	5,00	5,00	0	0,00	0,00	0,00
v _i	125	8,5	3,75	25,00	3,00	16	5,00	5,00	5,00	0	0,00	0,00	0,00
Vérification	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

seuil d'in différence
 seuil de préférence stricte
 seuil de veto

4) TABLEAU DES PERFORMANCES

Arguments	Ponderation w _{CS.2} [0...1]		Note [1...6]				
	Min	Max	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅
Aditifs utilisés	0,20	0,50					
Vieillessement du liant à la fabrication	0,20	0,50					
Cycles de retournement subs	0,20	0,50					
Somme w _{CS.2}		0,00					
Vérification		Compléter					

0,00

E5 - Niveau 4 : Agrégation complète

Date 10.06.2011
 Retour au menu général

ANALYSE NIVEAU 4: AGRÉGATION COMPLÈTE

1) TABLEAU DE PERFORMANCES BRUTES

C. Numérateurs	Critère Niveau 1	Critère Niveau 2	Critère Niveau 3	Unités	Niveaux					
					1	2	3	4	5	
C1	Energie	Emissions	Coûts éner.	Non renseigné	Non renseigné	Non renseigné	Non renseigné	Non renseigné	Non renseigné	
				MJ	NA	NA	NA	NA	NA	
				kg CO2/eq	NA	NA	NA	NA	NA	
C4	Performance	CS.1 Sensibilité eau	CS.2 Conform. perm.	CS.3 Resist. fatigue	Non renseigné	Non renseigné	Non renseigné	Non renseigné	Non renseigné	
					%	NA	NA	NA	NA	NA
					[10-6]	NA	NA	NA	NA	NA
C5	Qualitatifs	CS.1 Complexité	CS.1.1 Séquence	CS.1.2 Insertion additif	Non renseigné	Non renseigné	Non renseigné	Non renseigné	Non renseigné	
					Non renseigné	Non renseigné	Non renseigné	Non renseigné	Non renseigné	
					Non renseigné	Non renseigné	Non renseigné	Non renseigné	Non renseigné	

2) MATRICE DE TRANSFORMATION

Matrice de transformation - critères quantitatifs

	CA.1	CA.2	CA.3
Mauvais	700	40	20
Faible	695	50	17
Moyen	695	45	16
Bon	625	40	15
Excellent	560	30	13

Matrice de transformation - critères qualitatifs

	A	B	C	D	E	F	G
Mauvais						0.1	0.8
Faible				0.2	0.9	0.2	0.1
Moyen	0.1	0.8	0.7				
Bon							
Excellent	0.8	0.1					
Somme	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9

3) MATRICE DES DECISIONS (DONNEES TRAITÉES POUR EQ)

Critère	Critère	Critère	1 - Type d'emboî non renseigné (onglet ICV-Res)					2 - Type d'emboî non renseigné (onglet ICV-Res)					3 - Type d'emboî non renseigné (onglet ICV-Res)					4 - Type d'emboî non renseigné (onglet ICV-Res)					5 - Type d'emboî non renseigné (onglet ICV-Res)				
			Mauvais	Faible	Moyen	Bon	Excellent	Mauvais	Faible	Moyen	Bon	Excellent	Mauvais	Faible	Moyen	Bon	Excellent	Mauvais	Faible	Moyen	Bon	Excellent	Mauvais	Faible	Moyen	Bon	Excellent
C1	Energie																										
C2	Emissions																										
C3	Coûts éner.																										
C4	Performance	CS.1 Sensibilité eau																									
		CS.2 Conform. perm.																									
		CS.3 Resist. fatigue																									
C5	Qualitatifs	CS.1 Complexité																									
		CS.1.1 Séquence																									
		CS.1.2 Insertion additif																									
		CS.1.3 Feu																									
		CS.2 Vieillessement																									
		CS.2.1 Additifs utilisés																									
		CS.2.2 Vieillessement																									
		CS.2.3 Retraitement																									

4) PONÉRATION DES CRITÈRES

Podis-Utilisateur

Podis-Equilibre

Podis-Défaut

Critères niveau 1

Critère	Podis	Min	Max
u1	0.50	0.40	
u2	0.30	0.40	
u3	0.20	0.50	
u4	0.20	0.40	
u5	0.00	0.20	
Somme	0.00	pondération équilibrée (défaut)	

Critères niveau 2 (C1)

Critère	Podis	Min	Max
u11	0.20	0.50	
u12	0.20	0.50	
u13	0.20	0.50	
Somme	0.00	pondération équilibrée (défaut)	

Critères niveau 2 (C2)

Critère	Podis	Min	Max
u21	0.30	0.70	
u22	0.30	0.70	
u23	0.30	0.50	
Somme	0.00	pondération équilibrée (défaut)	

5) MATRICE DES DEGRES DE CREDIBILITE (BELIEF DEGRES)

Critère	1 - Type d'emboî non renseigné (onglet ICV-Res)					2 - Type d'emboî non renseigné (onglet ICV-Res)					3 - Type d'emboî non renseigné (onglet ICV-Res)					4 - Type d'emboî non renseigné (onglet ICV-Res)					5 - Type d'emboî non renseigné (onglet ICV-Res)				
	Mauvais	Faible	Moyen	Bon	Excellent	Mauvais	Faible	Moyen	Bon	Excellent	Mauvais	Faible	Moyen	Bon	Excellent	Mauvais	Faible	Moyen	Bon	Excellent	Mauvais	Faible	Moyen	Bon	Excellent
C1	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
C2	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
C3	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
C4	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
C5	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

6) CALCUL D'UTILITE

Degré d'utilité

	Mauvais	Faible	Moyen	Bon	Excellent
U _{critère}	0.00	0.35	0.55	0.85	1.00

Utilité (U)

Utilité	Emboî 1	Emboî 2	Emboî 3	Emboî 4	Emboî 5
U _{critère}	0.00	0.35	0.55	0.85	1.00
U _{critère}	0.00	0.35	0.55	0.85	1.00
U _{critère}	0.00	0.35	0.55	0.85	1.00
U _{critère}	0.00	0.35	0.55	0.85	1.00
U _{critère}	0.00	0.35	0.55	0.85	1.00

7) DIAGRAMME DE Degré de confiance

8) DIAGRAMME DE Utilité (U)

E6 - Agrégation complète : Calcul de la matrice de décision pour critère quantitatif (VBA)

```
Function QuantDT(value, H)
    Dim tmp
    ReDim tmp(1 To H.Rows.Count, 1 To H.Columns.Count)
    For i = 1 To H.Rows.Count - 1
        v1 = H.Cells(i, 1).value
        v2 = H.Cells(i + 1, 1).value
        If (value - v1) * (value - v2) <= 0 Then
            tmp(i, 1) = (v2 - value) / (v2 - v1)
            tmp(i + 1, 1) = 1 - tmp(i, 1)
        End If
    Next i
    QuantDT = tmp
End Function
```

E7 - Agrégation complète : Calcul de la matrice de décision pour critère qualitatifs (VBA)

```
Function QualDT(value, H, mat)
    Dim tmp
    ReDim tmp(1 To mat.Rows.Count, 1 To 1)
    For i = 1 To H.Columns.Count
        If value = H(1, i).value Then Exit For
    Next i
    For j = 1 To mat.Rows.Count
        tmp(j, 1) = mat(j, i)
    Next j
    QualDT = tmp
End Function
```

E8 - Agrégation complète : Algorithme de la théorie de l'Evidence (VBA)

Function AggBeta(beta, Optional w)

n_attr = beta.Rows.Count

n_eval = beta.Columns.Count

If IsMissing(w) Then

'Same weight for all attributes

ReDim w(1 To n_attr, 1 To 1)

For i = 1 To n_attr

w(i, 1) = 1 / n_attr

Next i

End If

Dim m

ReDim m(1 To n_attr, 1 To n_eval + 3)

For i = 1 To n_attr

s = 0

For j = 1 To n_eval

m(i, j) = beta(i, j) * w(i, 1)

s = s + beta(i, j)

Next j

m(i, n_eval + 1) = 1 - w(i, 1)

m(i, n_eval + 2) = w(i, 1) * (1 - s)

m(i, n_eval + 3) = m(i, n_eval + 1) + m(i, n_eval + 2)

Next i

For k = 1 To n_attr - 1

s = 0

For i = 1 To n_eval

For j = 1 To n_eval

If i <> j Then s = s + m(k, i) * m(k + 1, j)

Next j

Next i

s = 1 / (1 - s)

For i = 1 To n_eval

m(k + 1, i) = s * (m(k, i) * m(k + 1, i) + m(k, i) * m(k + 1, n_eval + 3) + m(k + 1, i) * m(k, n_eval + 3))

Next i

m(k + 1, n_eval + 2) = s * (m(k, n_eval + 2) * m(k + 1, n_eval + 2) + m(k, n_eval + 1) * m(k + 1, n_eval + 2) + m(k, n_eval + 2) * m(k + 1, n_eval + 1))

m(k + 1, n_eval + 1) = s * m(k, n_eval + 1) * m(k + 1, n_eval + 1)

m(k + 1, n_eval + 3) = m(k + 1, n_eval + 1) + m(k + 1, n_eval + 2)

Next k

```
Dim result
ReDim result(1 To 1, 1 To n_eval)
For i = 1 To n_eval
    result(1, i) = m(n_attr, i) / (1 - m(n_attr, n_eval + 1))
Next i
AggBeta = result
End Function
```

Annexe F. Exemple d'application de la méthodologie d'analyse multicritère (Chapitre 9)

Les différents résultats sont issus de la version 1.10 du modèle pour l'établissement des indicateurs (partie 1) et de la version 1.17 pour l'analyse multicritère (partie 2).

F1 - Inventaire du cycle de vie (enrobé REF)

Légende

Données relatives au mélange

Type d'enrobé	Unité	Indicateur
Unité: épaisseur	cm	1
Unité: masse	kg	1000

Données relatives au chantier

Épaisseur de couche	cm	6
Masse d'enrobé	kg/cm ²	24
Masse d'enrobé	kg/m ²	144
Surface par lit (L1)	m ² /L	6.9

Données de référence

1D	100
2D	100
3D	300
4D	300

2) INVENTAIRE SUR LE CYCLE DE VIE

Rechercher au menu général

Consulter la base de données

3) AMBIE DES PROCESSUS UNITAIRES

```

    graph TD
      A[4- Centrale d'enrobage (Chauffage, mélange)] --> B[24- Enrobé primaire]
      A --> C[20- Transport]
      A --> D[30- Enrobé secondaire]
      B --> B1[24- Concrètement]
      B --> B2[24- Concrètement, bit.]
      B --> B3[24- Concrètement, bit. granulométrique, 0/10]
      B --> B4[24- Concrètement, bit. 0/10]
      C --> C1[2C-1 Production bitume]
      C --> C2[2C-2 Transport]
      C --> C3[2C-3 Stockage bitume]
      D --> D1[3D-1 Production adhésif]
      D --> D2[3D-2 Transport]
      
```

4) INVENTAIRE SUR LE CYCLE DE VIE

N° PU	Matériau	Type de données	PU	Chaix dans la BD	Energie		Résultats unitaires		Coûts unitaires		Total	
					Unité	Valeur	Unité	Valeur	Unité	Valeur	Unité	Valeur
1A, 1B	Granulats	<input type="radio"/> Coûs exocent. <input type="radio"/> 1D - Données éprouvés <input type="radio"/> 1D - Données éprouvés par PU <input type="radio"/> 1E - Données normales	1A/B	Méga joules par tonne, données exocent.	kg/t	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			1A	Données exocent. (JA)	kg/t	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			1B	Données exocent. (JB)	kg/t	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1A, 1B	Sables	<input type="radio"/> Coûs exocent. <input type="radio"/> 1D - Données éprouvés <input type="radio"/> 1D - Données éprouvés par PU <input type="radio"/> 1E - Données normales	1A/B	Méga joules par tonne, données exocent.	kg/t	0.24	8.32	0.13	10.89	0.37	0.95	1.31
			1A	Données exocent. (JA)	kg/t	0.24	8.32	0.13	10.89	0.37	0.95	1.31
			1B	Données exocent. (JB)	kg/t	0.24	8.32	0.13	10.89	0.37	0.95	1.31
1A, 1B	Filler	<input type="radio"/> Coûs exocent. <input type="radio"/> 1D - Données éprouvés <input type="radio"/> 1E - Données normales	1A/B	Données exocent. (JA)	kg/t	0.24	8.32	0.13	10.89	0.37	0.95	
1C	G.S.F	<input type="radio"/> Coûs exocent. <input type="radio"/> 1D - Données éprouvés <input type="radio"/> 1E - Données normales	1A/B	Données exocent. (JA)	kg/t	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
1D	G.S.F	<input type="radio"/> Coûs exocent. <input type="radio"/> 1D - Données éprouvés <input type="radio"/> 1E - Données normales	1D	Données exocent. (JA)	kg/t	0.48	34.03	0.10	45.53	3.26	0.93	
<p>Total Phase 1 - Médiante première Granulats: 97.20 1.00 1.50</p>												
2A, 2B, 2C	Bitume	<input type="radio"/> Coûs des données <input type="radio"/> 1D - Données éprouvés <input type="radio"/> 1D - Données éprouvés par PU <input type="radio"/> 1E - Données normales	2A/B/C	Données exocent. (JA, JB, JC) - Surfactant	kg/t	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
			2A	Données exocent. (JA)	kg/t	2.20	109.92	0.69	92.55	4.83	2.48	
			2B	Données exocent. (JB)	kg/t	1.73	100.35	0.68	72.87	4.22	2.08	
2D	Bitume	<input type="radio"/> Coûs des données <input type="radio"/> 1D - Données éprouvés <input type="radio"/> 1E - Données normales	2D	Données exocent. (JA)	kg/t	0.46	32.78	0.00	5.81	0.41	0.11	
<p>Total Phase 2 - Médiante première Bitume: 106.60 1.71 3.12</p>												
3A, 3B, 3C	Adhésif	<input type="radio"/> Coûs des données <input type="radio"/> 1D - Données éprouvés <input type="radio"/> 1E - Données normales	3A/B/C	Données exocent. (JA, JB, JC) - Surfactant	kg/t	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
			3A	Données exocent. (JA)	kg/t	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
			3B	Données exocent. (JB)	kg/t	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
3D	Adhésif	<input type="radio"/> Coûs des données <input type="radio"/> 1D - Données éprouvés <input type="radio"/> 1E - Données normales	3D	Données exocent. (JA)	kg/t	0.46	33.02	0.00	5.81	0.41	0.11	
<p>Total Phase 3 - Médiante première Adhésif: 0.00 0.00 0.00</p>												
4	Enrobé	<input type="radio"/> Coûs des données <input type="radio"/> 1D - Données éprouvés <input type="radio"/> 1E - Données normales	4	Données exocent. (JA)	kg/t	311.30	75.07	7.02	311.30	15.87	15.00	
<p>Total Phase 4 - Médiante première Enrobé: 311.30 15.87 15.00</p>												
5	Enrobé	<input type="radio"/> Coûs des données <input type="radio"/> 1D - Données éprouvés <input type="radio"/> 1E - Données normales	5	Données exocent. (JA)	kg/t	0.48	34.03	0.10	45.53	3.26	0.93	
<p>Total Phase 5 - Médiante première Enrobé: 0.48 34.03 0.10</p>												
6, 7	Enrobé	<input type="radio"/> Coûs des données <input type="radio"/> 1D - Données éprouvés <input type="radio"/> 1E - Données normales	6/7	Données exocent. (JA)	kg/t	0.11	0.00	0.00	0.11	0.00	0.00	
<p>Total Phase 6 & 7 - Médiante première Enrobé: 0.11 0.00 0.00</p>												
<p>TOTAL: 627 46 86</p>												

F2 - Indices de performance (enrobé REF)

DETERMINATION DES INDICATEURS DE PERFORMANCES (INDICE BRUT & INDICE NORMALISÉ)

1) DONNÉES COMPLÉMENTAIRES ET HYPOTHÈSES

Type d'enrobé:
 Type de couche considérée:
 Temps de cure (sem):
 Echelle d'évaluation pour l'indice normalisé:
 Enrobé sensible Egal, Chiffres: 5
 Très bon: 4
 Bon: 3
 Moyen: 2
 Mauvais: 1
 Très mauvais: 1

Légende
 Données à insérer par l'utilisateur
 Résultats (indice brut ou normalisé)
 Hypothèses

Valeurs seuils d'acceptabilité
 Sensibilité à l'eau:
 Résistance aux déformations permanentes:
 Résistance à la fatigue:
 Source des données:
 Essai sur mélange laboratoire
 Essai sur mélange laboratoire
 Essai sur mélange laboratoire

Indicateurs normalisés - Sensibilité à l'eau
 Valeurs limites: Expérience Lavoç Valeurs Utilisateur
 Type de relation: Linéaire Paliers linéaires
Indicateurs normalisés - Résistance def. perm.
 Valeurs limites: Expérience Lavoç Valeurs Utilisateur
 Type de relation: Linéaire Paliers linéaires
Indicateurs normalisés - Résistance à la fatigue
 Valeurs limites: Expérience Lavoç Valeurs Utilisateur
 Type de relation: Linéaire Paliers linéaires

2) ÉTABLISSEMENT DES INDICATEURS DE PERFORMANCE

Performances de l'enrobé bitumineux	Paramètre	Unité	Référence	Valeurs limites	Remarque	Indice brut	Calcul de l'indice normalisé	Indicateur	Commentaires
Sensibilité à l'eau	Ratio TSR	%	SN 60-43I-3b-NA autre norme (1)	70%		90%	1	3	3,6
Résistance aux déformations permanentes	Prof. ombré 30000 cycles	%	SN 60-43I-3b-NA autre norme (2)	10%	Classe 5	5,6%	10%	7%	3,4
Résistance à la fatigue	Déformation [10-6]		SN 60-43I-3b-NA autre norme (3)		EME seuils	120	70	90	4,5

Note: Données relatives au développement en données moyennées

CALCUL & REPRÉSENTATION DES INDICATEURS NORMALISÉS

Performance: Sensibilité à l'eau (TSR)

Note	Y (Valeur)	X (Valeur)
5	100%	0,05
1	80%	0,05
5	100%	0,07
3	86%	0,03
1	80%	0,03

Calcul valeurs des graphiques:
 Calcul indicateur normalisé: **3,0**

Performance: Résistance aux déformations permanentes

Note	Y (Valeur)	X (Valeur)
5	0%	-0,025
4,5	1,8%	1,3%
4	3,5%	2,5%
3,5	5,3%	3,8%
3	7,0%	5,0%
3	7,0%	5,0%
2,59	7,0%	6,3%
2	8,5%	7,5%
1,5	8,5%	8,8%
1	10,0%	10,0%

Calcul valeurs des graphiques:
 Calcul indicateur normalisé: **2,8**

Performance: Résistance à la fatigue

Note	Y (Valeur)	X (Valeur)
5	130	15
1	70	15
5	130	15
3	90	10
1	70	10
5	130	20
3	90	10
2,59	90	10
2	85	8
1,5	75	7
1	70	7

Calcul valeurs des graphiques:
 Calcul indicateur normalisé: **4,3**

F3 - Fiche de synthèse des indicateurs : Enrobé REF (Partie 1 du modèle)

FICHE DE SYNTHÈSE				
CALCUL D'INDICATEURS RELATIFS AUX ENROBES BITUMINEUX (Partie 1)				
Date:	13.07.2011			
Auteur:	NB			
Projet:	Calcul thèse			
Type d'enrobé:	Enrobé à chaud			
Additif:	Aucun			
Résultats des calculs				
Chauffage des granulats et vaporisation de l'eau				
Onglet:	CA-FAb1			
Commentaire:				
Energie	MJ/t _{enr.}	182.17		
Rendement	%	100%		
Température du mélange	°C	155		
Emissions	kg CO ₂ ,eq/t _{enr.}	15.14		
Coûts énergétiques	CHF/t _{enr.}	4.389		
Chauffage de l'air du malaxeur				
Onglet:	CA-FAb2			
Commentaire:				
Energie	MJ/t _{enr.}	20.18		
Emissions	kg CO ₂ ,eq/t _{enr.}	1.68		
Coûts éner.	CHF/t _{enr.}	0.486		
Etablissement des indicateurs				
Inventaire sur le cycle de vie - Indicateurs énergie, émissions, coûts				
Onglet:	PU-Res			
Processus unitaire (PU)	Energie [MJ]	Emissions [kg CO ₂ ,eq]	Coûts éner. [CHF]	Source des données
1 - Matière première: Granulats	97.20	7.10	3.150	Données mesurées et bases de données
2 - Matière première: Bitume	196.01	11.21	5.128	Bases de données
3 - Matière première: Additifs	0.00	0.00	0.000	Bases de données
4 - Centrale d'enrobage	311.30	25.87	7.510	Données calculées
5 - Transport centrale - chantier	19.18	1.36	0.390	Base de données
6 & 7 - Pose et compactage	3.47	0.27	0.086	Base de données
Total	627.16	45.81	16.263	
Indicateurs de performance				
Onglet:	PERF			
Temps de cure [sem]:	2			
Performances de l'enrobé bitumineux	Paramètre	Indice brut		Indice normalisé
		Unité	Valeur	
Sensibilité à l'eau	Ratio ITSR	%	90%	3.6
Résistance aux déformations permanentes	Ornière 30'000 cy.	%	5.6%	3.4
Résistance à la fatigue	Déf. ε6	[10-6]	120	4.5
Commentaires				
Note: Insérer les données dans la "Partie 2" afin de procéder à l'analyse multicritère C:\Users\bueche.ENAC\Desktop\Calcul cas complet pour rapport\Partie 1 - Calcul des indicateurs_v1.10 REF.xlsx\Synthèse				

F4 - Résultats niveau 1 : Analyse Pareto

Date 13.07.2011

ANALYSE NIVEAU 1: ANALYSE PARETO

ENROBE REF			
Processus unitaire	Energie MJ	Emissions kg CO ₂ eq	Coûts éner. CHF
1- Matière première: granulats	97.20	7.10	3.150
2- Matière première: bitume	196.01	11.21	5.128
3- Matière première: additifs	0.00	0.00	0.000
4- Centrale d'enrobage	311.30	25.87	7.510
5- Transport (centrale - chantier)	19.18	1.36	0.390
6/7- Pose et compactage	3.47	0.27	0.086
Total	627.16	45.81	16.263

Performance de l'enrobé		Indice	
	Brut	Normalisé	
Sensibilité à l'eau	90%	3.6	
Résistance aux déf. permanentes	5.6%	3.4	
Résistance à la fatigue	L20 [10-6]	4.5	

Performance (indice normalisé)

Retour au menu général

Légende: Données reportées de ICV-Res
Note: Utiliser uniquement les boutons de "Tri" et "Reset"

ENERGIE: Données triées			
Processus unitaire	Energie MJ	Proportion %	Somme %
4- Centrale d'enrobage	311.30	50%	50%
2- Matière première: bitume	196.01	31%	81%
1- Matière première: granulats	97.20	15%	96%
5- Transport (centrale - chantier)	19.18	3%	99%
6/7- Pose et compactage	3.47	1%	100%
3- Matière première: additifs	0.00	0%	100%

EMISSIONS: Données triées			
Processus unitaire	Emissions kg CO ₂ eq	Proportion %	Somme %
4- Centrale d'enrobage	25.87	56%	56%
2- Matière première: bitume	11.21	24%	81%
1- Matière première: granulats	7.10	16%	96%
5- Transport (centrale - chantier)	1.36	3%	99%
6/7- Pose et compactage	0.27	1%	100%
3- Matière première: additifs	0.00	0%	100%

COÛTS ENERGETIQUES: Données triées			
Processus unitaire	Coûts éner. CHF	Proportion %	Somme %
4- Centrale d'enrobage	7.510	46%	46%
2- Matière première: bitume	5.128	32%	78%
1- Matière première: granulats	3.150	19%	97%
5- Transport (centrale - chantier)	0.390	2%	99%
6/7- Pose et compactage	0.086	1%	100%
3- Matière première: additifs	0.000	0%	100%

Energie

Emissions

Coûts énergétiques

ENROBE ET-C			
Processus unitaire	Energie MJ	Emissions kg CO ₂ eq	Coûts éner. CHF
1- Matière première: granulats	97.08	7.10	3.146
2- Matière première: bitume	195.76	11.19	5.121
3- Matière première: additifs	92.17	7.21	1.873
4- Centrale d'enrobage	273.52	22.73	6.600
5- Transport (centrale - chantier)	19.18	1.36	0.390
6/7- Pose et compactage	3.47	0.27	0.086
Total	681.18	49.86	17.216

Performance de l'enrobé		Indice	
	Brut	Normalisé	
Sensibilité à l'eau	87%	3.1	
Résistance aux déf. permanentes	5.0%	3.6	
Résistance à la fatigue	117 [10-6]	4.4	

Performance (indice normalisé)

ENERGIE: Données triées			
Processus unitaire	Energie MJ	Proportion %	Somme %
4- Centrale d'enrobage	273.52	40%	40%
2- Matière première: bitume	195.76	29%	69%
1- Matière première: granulats	97.08	14%	83%
3- Matière première: additifs	92.17	14%	97%
5- Transport (centrale - chantier)	19.18	3%	99%
6/7- Pose et compactage	3.47	1%	100%

EMISSIONS: Données triées			
Processus unitaire	Emissions kg CO ₂ eq	Proportion %	Somme %
4- Centrale d'enrobage	22.73	46%	46%
2- Matière première: bitume	11.19	22%	68%
3- Matière première: additifs	7.21	14%	82%
1- Matière première: granulats	7.10	14%	97%
5- Transport (centrale - chantier)	1.36	3%	99%
6/7- Pose et compactage	0.27	1%	100%

COÛTS ENERGETIQUES: Données triées			
Processus unitaire	Coûts éner. CHF	Proportion %	Somme %
4- Centrale d'enrobage	6.600	38%	38%
2- Matière première: bitume	5.121	30%	68%
1- Matière première: granulats	3.146	18%	86%
3- Matière première: additifs	1.873	11%	97%
5- Transport (centrale - chantier)	0.390	2%	100%
6/7- Pose et compactage	0.086	0%	100%

Energie

Emissions

Coûts énergétiques

ENROBE ET-P			
Processus unitaire	Energie MJ	Emissions kg CO ₂ eq	Coûts éner. CHF
1- Matière première: granulats	97.18	7.10	3.149
2- Matière première: bitume	195.98	11.20	5.127
3- Matière première: additifs	13.34	0.51	0.271
4- Centrale d'enrobage	272.98	22.69	6.580
5- Transport (centrale - chantier)	19.18	1.36	0.390
6/7- Pose et compactage	3.47	0.27	0.086
Total	602.13	43.13	15.603

Performance de l'enrobé		Indice	
	Brut	Normalisé	
Sensibilité à l'eau	96%	4.4	
Résistance aux déf. permanentes	5.8%	3.3	
Résistance à la fatigue	113 [10-6]	4.2	

Performance (indice normalisé)

ENERGIE: Données triées			
Processus unitaire	Energie MJ	Proportion %	Somme %
4- Centrale d'enrobage	272.98	45%	45%
2- Matière première: bitume	195.98	33%	78%
1- Matière première: granulats	97.18	16%	94%
5- Transport (centrale - chantier)	19.18	3%	97%
3- Matière première: additifs	13.34	2%	99%
6/7- Pose et compactage	3.47	1%	100%

EMISSIONS: Données triées			
Processus unitaire	Emissions kg CO ₂ eq	Proportion %	Somme %
4- Centrale d'enrobage	22.69	53%	53%
2- Matière première: bitume	11.20	26%	79%
1- Matière première: granulats	7.10	16%	95%
5- Transport (centrale - chantier)	1.36	3%	98%
3- Matière première: additifs	0.51	1%	99%
6/7- Pose et compactage	0.27	1%	100%

COÛTS ENERGETIQUES: Données triées			
Processus unitaire	Coûts éner. CHF	Proportion %	Somme %
4- Centrale d'enrobage	6.580	42%	42%
2- Matière première: bitume	5.127	33%	75%
1- Matière première: granulats	3.149	20%	95%
5- Transport (centrale - chantier)	0.390	2%	98%
3- Matière première: additifs	0.271	2%	99%
6/7- Pose et compactage	0.086	1%	100%

Energie

Emissions

Coûts énergétiques

ENROBE EST

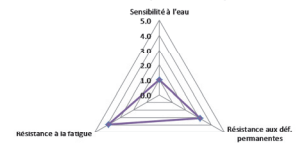
Processus unitaire	Energie MJ	Emissions kg CO ₂ e	Coûts éner. CHF
-	-	-	-
1- Matière première: granulats	97.18	7.10	3.149
2- Matière première: bitume	195.98	11.20	5.127
3- Matière première: additifs	13.34	0.51	0.271
4- Centrale d'enrobage	270.43	22.47	6.510
5- Transport (centrale - chantier)	15.18	1.36	0.390
6/7- Pose et compactage	3.47	0.27	0.086
Total	599.58	42.91	15.533

Performance de l'enrobé	Indice	
	Brut	Normalisé
Sensibilité à l'eau	78%	1.0
Résistance aux déf. permanentes	6.7%	3.1
Résistance à la fatigue	108 [10-6]	3.9

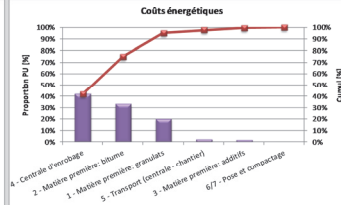
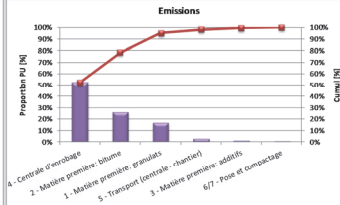
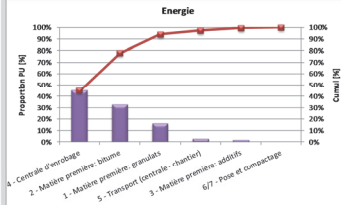
Tri des données

Reset données triées

Performance (indice normalisé)



ENERGIE: Données triées				EMISSIONS: Données triées				COÛTS ENERGETIQUES: Données triées			
Processus unitaire	Energie MJ	Proportion %	Somme %	Processus unitaire	Emissions kg CO ₂ e	Proportion %	Somme %	Processus unitaire	Coûts éner. CHF	Proportion %	Somme %
4- Centrale d'enrobage	270.43	45%	45%	4- Centrale d'enrobage	22.47	52%	52%	4- Centrale d'enrobage	6.510	42%	42%
2- Matière première: bitume	195.98	33%	78%	2- Matière première: bitume	11.20	26%	78%	2- Matière première: bitume	5.127	33%	75%
1- Matière première: granulats	97.18	16%	94%	1- Matière première: granulats	7.10	17%	95%	1- Matière première: granulats	3.149	20%	95%
5- Transport (centrale - chantier)	15.18	3%	97%	5- Transport (centrale - chantier)	1.36	3%	98%	5- Transport (centrale - chantier)	0.390	3%	98%
3- Matière première: additifs	13.34	2%	99%	3- Matière première: additifs	0.51	1%	99%	3- Matière première: additifs	0.271	2%	99%
6/7- Pose et compactage	3.47	1%	100%	6/7- Pose et compactage	0.27	1%	100%	6/7- Pose et compactage	0.086	1%	100%
		100%				100%				100%	



ENROBE EBT

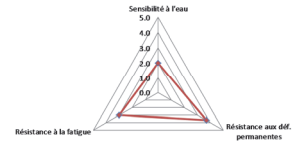
Processus unitaire	Energie MJ	Emissions kg CO ₂ e	Coûts éner. CHF
-	-	-	-
1- Matière première: granulats	99.20	7.08	3.308
2- Matière première: bitume	182.96	10.46	4.786
3- Matière première: additifs	93.40	3.55	1.808
4- Centrale d'enrobage	177.87	14.78	4.290
5- Transport (centrale - chantier)	15.18	1.36	0.390
6/7- Pose et compactage	3.47	0.27	0.086
Total	576.07	37.50	14.758

Performance de l'enrobé	Indice	
	Brut	Normalisé
Sensibilité à l'eau	83%	2.0
Résistance aux déf. permanentes	4.7%	3.7
Résistance à la fatigue	90 [10-6]	3.0

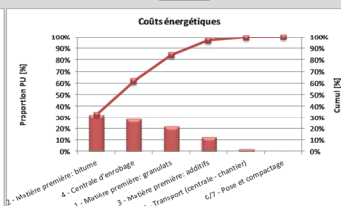
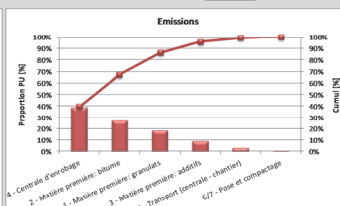
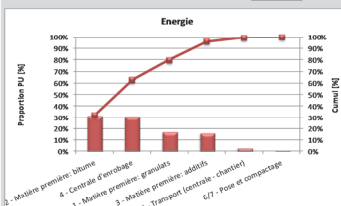
Tri des données

Reset données triées

Performance (indice normalisé)



ENERGIE: Données triées				EMISSIONS: Données triées				COÛTS ENERGETIQUES: Données triées			
Processus unitaire	Energie MJ	Proportion %	Somme %	Processus unitaire	Emissions kg CO ₂ e	Proportion %	Somme %	Processus unitaire	Coûts éner. CHF	Proportion %	Somme %
2- Matière première: bitume	182.96	32%	32%	4- Centrale d'enrobage	14.78	39%	39%	2- Matière première: bitume	4.786	32%	32%
4- Centrale d'enrobage	177.87	31%	63%	2- Matière première: bitume	10.46	28%	67%	4- Centrale d'enrobage	4.290	29%	62%
1- Matière première: granulats	99.20	17%	80%	1- Matière première: granulats	7.08	19%	86%	1- Matière première: granulats	3.308	22%	84%
3- Matière première: additifs	93.40	16%	96%	3- Matière première: additifs	3.55	9%	96%	3- Matière première: additifs	1.808	13%	97%
5- Transport (centrale - chantier)	15.18	3%	99%	5- Transport (centrale - chantier)	1.36	4%	99%	5- Transport (centrale - chantier)	0.390	3%	99%
6/7- Pose et compactage	3.47	1%	100%	6/7- Pose et compactage	0.27	1%	100%	6/7- Pose et compactage	0.086	1%	100%
		100%				100%				100%	



F5 - Résultats niveau 2 : Analyse graphique

ANALYSE NIVEAU 2: ANALYSE GRAPHIQUE

Date: 13.07.2011

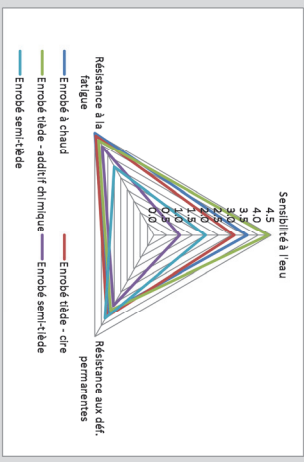
1) RESULTATS BRUTS

Mélange	Détails	Energie MJ	Emissions kg CO ₂ eq	Coûts ener. CHF
Enrobé 1	Enrobé à chaud	627,16	45,81	16,263
Enrobé 2	Enrobé tiède - cire	681,18	49,88	17,216
Enrobé 3	Enrobé tiède - additif chimique	602,13	43,13	15,603
Enrobé 4	Enrobé semi-tiède	599,58	42,91	15,533
Enrobé 5	Enrobé semi-tiède	576,07	37,50	14,758

Mélange	Détails	Sensibilité eau		Déformations perman.		Résistance fatigue	
		Brut	Normalisé	Brut	Normalisé	Brut	Normalisé
Enrobé 1	Enrobé à chaud	90,0%	3,6	5,6%	3,40	120	4,5
Enrobé 2	Enrobé tiède - cire	87,0%	3,1	5,0%	3,60	117	4,4
Enrobé 3	Enrobé tiède - additif chimique	96,0%	4,4	5,8%	3,30	113	4,2
Enrobé 4	Enrobé semi-tiède	78,0%	1,0	6,7%	3,10	108	3,9
Enrobé 5	Enrobé semi-tiède	83,0%	2,0	4,7%	3,70	90	3,0

Légende:
 Données reportées de CV-Res
 Utiliser les cellules de choix

[Retour au menu général](#)



2) COMPARATIF PAR CRITERES

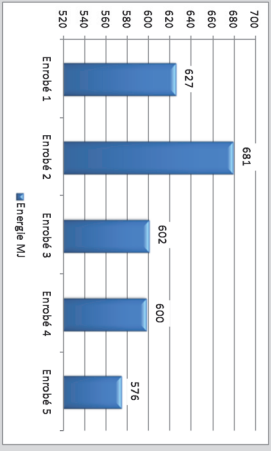
Paramètre de comparaison

Energie

Emissions

Coûts énergétiques

Mélange	Energie MJ
Enrobé 1	627
Enrobé 2	681
Enrobé 3	602
Enrobé 4	600
Enrobé 5	576



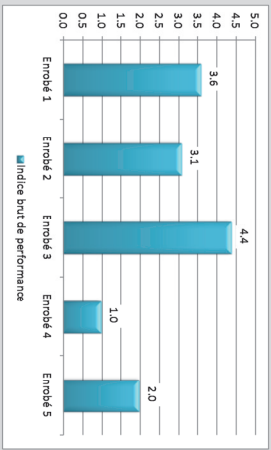
Comparatif indice normalisé performance

Sensibilité à l'eau

Déformations permanentes

Résistance fatigue

Mélange	Indice norm.
Enrobé 1	3,6
Enrobé 2	3,1
Enrobé 3	4,4
Enrobé 4	1,0
Enrobé 5	2,0



3) COMPARATIF GLOBAL

Sélection facteurs pour normalisation (0...1)

Valeurs du projet en cours (max)

Valeurs par défaut

Facteurs pour calcul des données normalisées (0...1)

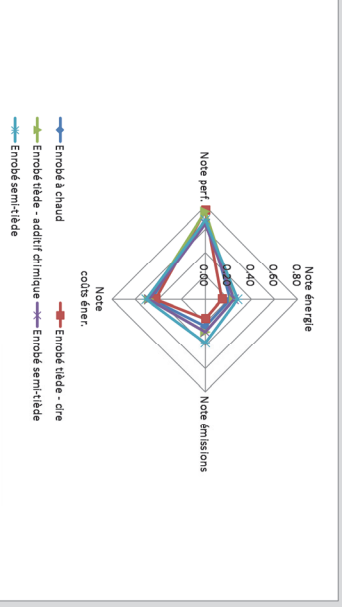
Energie	Emissions	Coûts	Sens. eau	Def perm.	Fatigue
800,00	60,00	30,00	100,0%	10,0%	1,50

Note: les valeurs par défaut peuvent être modifiées (colonnes cochées)

Sélection des performances

Toutes les performances (indus bruts)

Mélange	Détails	Note énergie	Note émissions	Note coûts éner.	Note perf.
Enrobé 1	Enrobé à chaud	0,22	0,24	0,46	0,75
Enrobé 2	Enrobé tiède - cire	0,15	0,17	0,43	0,76
Enrobé 3	Enrobé tiède - additif chimique	0,25	0,28	0,48	0,75
Enrobé 4	Enrobé semi-tiède	0,25	0,28	0,48	0,65
Enrobé 5	Enrobé semi-tiède	0,28	0,38	0,51	0,68



F6 - Résultats niveau 3 : Agrégation partielle

Tableau 12-6 : Agrégation partielle – Analyse de sensibilité du seuil de préférence stricte du critère C3 (coût énergétique)

Classement des variantes		BASE 0.75	Seuil de préférence stricte p_i [CHF]					
			0.40	0.90	1.30	1.70	2.50	3.60
Classement des variantes	REF	3	3	3	2	2	2	2
	ET-C	4	4	4	4	4	3	3
	ET-P	1	1	1	1	1	1	1
	EST	4	4	4	5	5	5	5
	EBT	2	2	2	3	3	4	4

Tableau 12-7 : Agrégation partielle – Analyse de sensibilité du seuil de préférence stricte du critère C1 (énergie)

Classement des variantes		BASE 25	Seuil de préférence stricte p_i [MJ]					
			15	30	45	60	90	120
Classement des variantes	REF	3	3	3	2	2	2	2
	ET-C	4	5	4	4	4	4	4
	ET-P	1	1	1	1	1	1	1
	EST	4	4	5	5	5	5	5
	EBT	2	2	2	3	3	3	3

Tableau 12-8 : Agrégation partielle – Analyse de sensibilité du seuil de veto du critère C3 (coût énergétique)

Classement des variantes		BASE 3.75	Seuil de veto v_i [CHF]					
			1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	50.00
Classement des variantes	REF	3	3	3	3	3	3	3
	ET-C	4	5	4	4	4	4	4
	ET-P	1	1	1	1	1	1	1
	EST	4	4	4	4	4	4	4
	EBT	2	2	2	2	2	2	2

Tableau 12-9 : Agrégation partielle – Analyse de sensibilité du seuil de veto du critère C1 (énergie)

Classement des variantes		BASE 125	Seuil de veto v_i [MJ]					
			30	60	90	120	150	180
Classement des variantes	REF	3	3	3	3	3	3	3
	ET-C	4	5	5	5	4	4	4
	ET-P	1	1	1	1	1	1	1
	EST	4	4	4	4	4	5	5
	EBT	2	2	2	2	2	2	2

Tableau 12-10 : Agrégation partielle – Analyse de sensibilité du seuil de veto du critère C4.3 (performance en fatigue)

Classement des variantes		BASE 16	Seuil de veto v_i [μm]			
			5	9	13	17
Classement des variantes	REF	3	1	3	3	3
	ET-C	4	4	4	4	4
	ET-P	1	3	1	1	1
	EST	4	5	4	4	4
	EBT	2	2	2	2	2

F7 - Résultats niveau 4 : Agrégation complète

Tableau 12-11 : Agrégation complète - Matrices de transformation des critères qualitatifs pour analyse de sensibilité (inconnue nulle)

CAS 1	A	B	C	D	E	F	G
Mauvais						0.1	0.9
Faible					0.8	0.9	0.1
Moyen			0.2	1	0.2		
Bon	0.1	0.9	0.8				
Excellent	0.9	0.1					
<i>Somme</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>

CAS 2	A	B	C	D	E	F	G
Mauvais						0.2	0.8
Faible					0.7	0.8	0.2
Moyen			0.3	1	0.3		
Bon	0.2	0.8	0.7				
Excellent	0.8	0.2					
<i>Somme</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>

Curriculum Vitae

BUECHE Nicolas
Rue Numa-Droz 37
CH - 2300 La Chaux-de-Fonds

Nationalité : Suisse
Age : 29 ans
Marié, 1 enfant (Roman)

Téléphone : +41 79 602 16 32
nicolas.bueche@epfl.ch

Activités récentes

Depuis septembre 2005 :

Chercheur – Assistant au Laboratoire des Voies de Circulation (LAVOC) (2005-2007) et doctorant sous la supervision du Prof. A.-G. Dumont (depuis 2007).

Matériaux

- Formulation des enrobés
- Comportement mécanique des enrobés
- Enrobés tièdes
- Utilisation de matériaux recyclés
- Implication dans des études et expertises du laboratoire

Structures routières

- Instrumentation des chaussées routières
- Chaussées à longue durée de vie
- Dimensionnement et renforcement
- Effets des conditions climatiques sur la chaussée
- Analyse du cycle de vie

Structures d'aéroports

- Dimensionnement et renforcement
- Vérifications de conformité à l'Annexe 14 de l'OACI

Enseignement

- Participation à la rédaction des polycopiés "Réalisation des infrastructures de transport" et "Dimensionnement des infrastructures de transports" du Prof. A.-G. Dumont.
- Assistanat pour les exercices des cours de "Réalisation des infrastructures de transport" et "Dimensionnement des infrastructures de transports" et enseignement de la partie aéroports.

Autres activités professionnelles

- Depuis 2011 Commission de suivi du projet VSS 2010/402 « Einfluss biogener Öle auf die Ökobilanz von Strassenbaubindemittel »
- Depuis 2009 Coordinateur de Recherche auprès du FEHRL (Forum of National European Highway Research Laboratories)
- Depuis 2008 Représentant dans le projet COST TU0702 – "Real-time monitoring, surveillance and control of road networks under adverse weather conditions"

- 2007-2008 Expert à l'Association Suisse des Professionnels de la route (VSS) – Commission ad-hoc 5.041: Fondations
- Depuis 2007 Expert à l'Association Suisse des Professionnels de la route (VSS) – Commission 5.03: Dimensionnement

Formations complémentaires

- 2008 Straightforward English, Mind Manager Pro 6
- 2007 FP7 Project Management training course
- 2006 Labview Basics I
- 2006 Stage au BRRC (Belgian Road Research Center) dans le domaine des matériaux de chaussées (3 semaines)

Etudes et formation

- 2005 Travail pratique de Master: "Superstructures d'aéroports – Cas des aéroports de Genève et Sion"
- 2000-2005 Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), département Génie Civil
5^{ème} et 6^{ème} semestres à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich (ETHZ)
- 1997-2000 Gymnase Cantonal de Neuchâtel (Lycée Denis-de-Rougemont), Maturité scientifique (type C), mention bien

Compétences informatiques

- Général Microsoft Office, Micrographix Designer, Microsoft Visual Basic, Mathematica, Labview (spécialisation DAQ), Mind Manager
- Génie civil Autocad, Autoturn 5.1, NOAH, ELMOD 5.0, ALIZE, RIDO, Z-Soil, CHANGER (logiciel ICV), ECOROOT

Langues

- Français Langue maternelle
- Allemand Bonnes connaissances écrites et orales
- Anglais Bonnes connaissances écrites et orales

Hobbies

Voyages, manifestations culturelles, tennis, ski (moniteur J+S), snowboard (moniteur J+S), football, volleyball

Publications

- Bueche, N., et Dumont, A.-G. Methodology for low impacts asphalt mixture best choice. Transport Research Arena TRA. Athènes. 2012. (résumé accepté).
- Bueche, N., et Dumont, A.-G. Energy in warm mix asphalt. Eurasphalt & Eurobitume Congress. Istanbul. 2012. (résumé accepté).
- Bueche, N. Performances et approche multicritère d'enrobés bitumineux à faibles impacts. Congrès Mondial de la Route. Mexico. 2011. (papier soumis).
- Bueche, N., et Dumont, A.-G. Evaluation of WMA key performances with regards to curing time and conditioning method. 2nd International Conference on Warm Mix Asphalt, St. Louis (USA). 2011.
- Bueche, N. SARPS (Standards and recommended practices) - Analyse de conformité à l'Annexe 14 de l'OACI, Volume II: Hélistations et Volume I: Conception et exploitation technique des aérodromes. Lausanne. 2010.

- Bueche, N., El Faouzi, N.-E. et al. Cost TU0702 : Real-time monitoring, surveillance and control of road networks under adverse weather conditions – Effects of weather on traffic and pavement: State of the art and best practices. INRETS, 2010.
- Bueche, N., et Dumont, A.-G. Gains en énergie avec les enrobés tièdes. Journée technique LAVOC. Lausanne. 2010.
- Bueche, N., et Dumont, A.-G. Potentiel des enrobés tièdes. TransINFRA: Journée de la recherche et de l'innovation. Fribourg. 2010.
- Bueche, N., Dumont, A.-G., et Angst, C. Projet initial - Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques. VSS-OFROU 2008/502. Lausanne. 2009.
- Bueche, N., et Dumont, A.-G. IRF Greenhouse Gas calculator - Analysis and validation. Lausanne. 2009.
- Bueche, N. Warm asphalt bituminous mixtures with regards to energy, emissions and performance. Young Researchers Seminar (YRS). Torino. 2009.
- Bueche, N., Rychen, P., et Dumont, A.-G. Optical fiber feasibility study in Accelerated Pavement Testing facility. The sixth international conference on maintenance and rehabilitation of pavement and technological control (MAIREPAV). Torino. 2009.
- Bueche, N., et Dumont, A.-G. Aéroport de Sion - Analyse de conformité à l'Annexe 14 - Volume I de l'OACI, 2008.
- Bueche, N., Vanelstraete, A., et al. ALT-evaluation of high stiffness base layers with high percentages of reclaimed asphalt. 3rd Accelerated Pavement Testing (APT) International Conference. Madrid. 2008.
- Bueche, N., Kalman, B., et al. High Stiffness underlayers with high percentage of re-use as developed in the NR2C-project. International Symposium on Asphalt Pavements and Environment (ISAP Symposium). Zürich. 2008.
- Bueche, N., Gaspar, L., et al. Laboratory and ALT-evaluation of high stiffness underlayers with high percentages of re-use as developed in the NR2C-project. 4th Eurasphalt & Eurobitume Congress. Copenhagen. 2008.
- Bueche, N., Vos, E., et al. Measurement of Pavement Condition with current and novel in situ sensors. Intelligent Roads (INTRO). 2008.
- Bueche, N., Chung, E., et al. Deliverable 3.3: Use of Combined Probe Vehicle and In Situ Measurements. Proposals for Best Practice Implementation. Intelligent Roads (INTRO). 2008.
- Bueche, N., et Ferne, B. Economics of Long-Life pavements. Long Life Pavements Workshop - Firmes de larga duraciòn. CEDEX-ELLPAG. Madrid. 2008.
- Bueche, N., Thogersen, F., et al. Deliverable 2.3: Concept and research programme for future interurban infrastructure. New Road Construction Concept (NR2C). 2007.
- Bueche, N., Vanelstraete, A., et al. Deliverable 2.2: Concept and design of selected innovations for interurban infrastructure – Development of high performance underlayers with low cost materials and high percentage of re-use. New Road Construction Concept (NR2C). 2007.
- Bueche, N., Dumont A.-G., et Mahut, B. Pavement underlayers with a high percentage of re-used materials. CERTAIN-NR2C Final Seminar. Brussels. 2007.
- Bueche, N., Ferne, B., et al. Phase 2: A Guide to the use of Long-Life Semi-Rigid Pavements. European Long-Life Pavements Group (ELLPAG). 2007.
- Bueche, N., et Ould-Henia, M. Planches d'essais in-situ sur l'autoroute A2/BL. Projet Unterhalt 2000. 2006.
- Bueche, N., et Dumont, A.-G. Performances des enrobés à module élevé comportant du recyclé. Journée technique LAVOC. Lausanne. 2006.
- Bueche, N., Ould-Henia, M., et Dumont, A.-G. Elaboration d'un plan des classes de trafic pondéral du réseau routier de la ville de Lausanne. Lausanne. 2005.