

# PERFORMANCES ET APPROCHE MULTICRITERE D'ENROBES BITUMINEUX A FAIBLES IMPACTS

N. Bueche

Laboratoire des Voies de Circulation (LAVOC), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Suisse  
[nicolas.bueche@epfl.ch](mailto:nicolas.bueche@epfl.ch)

## RESUME

Différentes techniques innovantes permettant de réduire les émissions et la consommation énergétique ont fait leur apparition au cours de la dernière décennie.

La première phase de la recherche consiste en une analyse approfondie des performances d'une sélection de procédés tièdes. Dans un premier temps une étude de la maîtrise de la viscosité des enrobés a été conduite, le tout en se concentrant sur le comportement du bitume et du mastic. L'évaluation des performances a ensuite été axée sur les paramètres potentiellement critiques; un accent particulier étant mis sur le processus de montée en performance et les conditions de stockage.

Dans la seconde phase, une méthodologie d'évaluation multicritère des enrobés bitumineux est proposée. De nombreux calculateurs d'émissions et de consommation énergétique permettant de comparer les projets routiers existent. Cependant, malgré l'important effet du type d'enrobé sur la consommation énergétique et les émissions, peu de ces outils permettent d'effectuer une comparaison détaillée des technologies. Le modèle multicritère proposé ici considère les émissions, la consommation énergétique et les aspects économiques mais également les paramètres performantiels essentiels dans un processus de décision. Cette méthode offre une vue globale de la technologie et permet finalement d'affiner le processus de décision et encourager l'innovation. (198 mots)

## 1. CONTEXTE

Le souci actuel de diminution de la consommation énergétique et des émissions est également au cœur des préoccupations du domaine de la route. Il a été montré notamment par [1] que la consommation énergétique relative à la fabrication de l'enrobé n'est pas marginale, cette énergie représentant globalement un quart de l'énergie totale sur la durée de vie de la chaussée. Cette tendance est encore plus marquée si l'on considère les émissions de gaz à effet de serre (GES), plus de la moitié étant imputable à la phase de construction.

En effet, d'importantes quantités d'énergie sont nécessaires afin d'atteindre la température de production des enrobés bitumineux et ainsi garantir une viscosité suffisamment faible pour la phase de fabrication, de pose et de compactage du mélange. La route peut contribuer à une meilleure prise en compte des aspects environnementaux et énergétiques, par exemple en aidant dans le processus de décision de la technologie.

## 2. OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

L'organigramme de la recherche est présenté dans la Figure 1. Les objectifs principaux de la recherche sont :

- Identifier les performances critiques ou non évaluées des enrobés tièdes.
- Effectuer une analyse approfondie en laboratoire des performances critiques / non évaluées des enrobés tièdes.

- Proposer une méthode d'évaluation multicritère des technologies d'enrobage (pour aider dans le processus de décision des spécialistes et acteurs du domaine).
- Intégration dans la méthode multicritère des paramètres environnementaux, énergétique, économiques ainsi que performantiels.

Dans la suite de ce papier, l'étape 4 relative à l'approche performantielle en laboratoire ainsi que l'étape 5 concernant le modèle global d'évaluation seront particulièrement discutées.

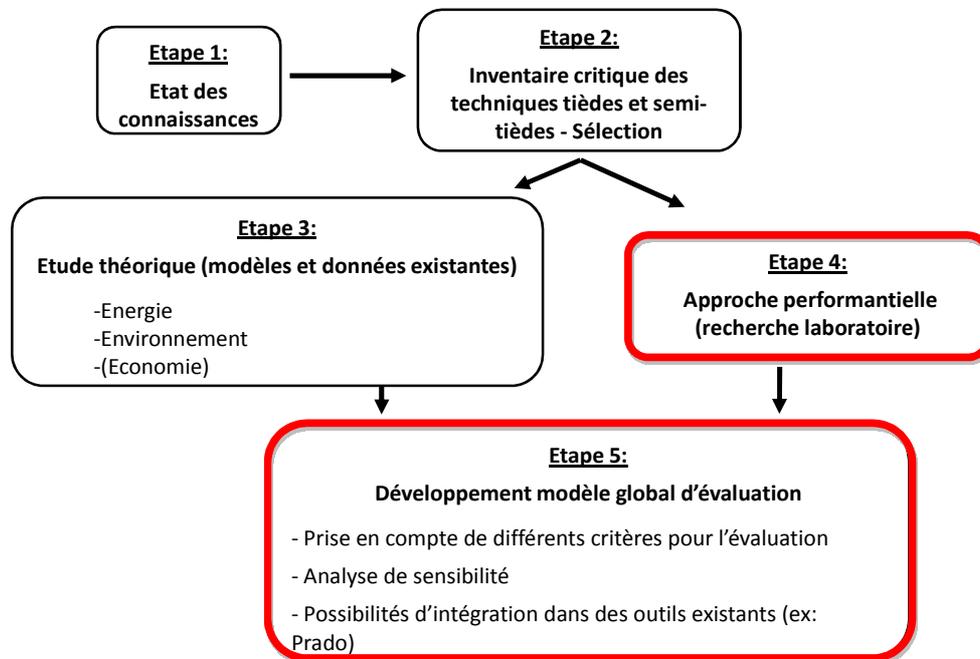


Figure 1 – Organigramme de la recherche

### 3. LES ENROBÉS A FAIBLES IMPACTS

#### 3.1. Classification

De nombreuses techniques sont apparues afin de diminuer les émissions et la consommation énergétique lors de la fabrication de l'enrobé. Pour cela, ces techniques font appel à un maintien « artificiel » de la viscosité, tout en abaissant la température de production. 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). Il s'agit donc de trouver une méthode permettant de garantir une faible viscosité du mélange durant la phase de mise en place. Les différents procédés peuvent se classer selon leur température de fabrication et nous pouvons alors distinguer [2] :

- Enrobé à chaud : 150 à 180 °C
- Enrobé tiède : 100 à 140 °C
- Enrobé semi-tiède : 60 à 100 °C
- Enrobé à froid : 20 à 60 °C

Dans la suite de ce travail, nous ne considérerons que les enrobés tièdes et semi-tièdes, les enrobés à froid correspondant à un domaine de performances et d'applications particulières.

### 3.2. Les enrobés tièdes

Les premiers développements d'enrobés tièdes datent de 1975 par Csanyi. A cette époque, l'objectif était alors de tirer bénéfice du moussage et de l'augmentation de volume du liant afin de l'utiliser comme liant pour les sols. Cette méthode a été adaptée et modifiée au fil des années et l'on trouve les premiers développements significatifs d'enrobés tièdes au cours des années 1990, en Europe (zéolithe, technique à la mousse et cire Fischer-Tropsch). Ces différents produits reposent sur l'application d'au moins un des principes suivants :

A. Modification de la séquence d'enrobage :

Les origines viennent de la méthode KGO (Karl Gunnar Ohlson), développée en 1976. Le principe consistait alors à enrober les éléments grossiers dans un premier temps avec l'entier du liant, avant d'ajouter dans une seconde phase le reste des granulats, le sable et le filler. Cette méthode permettait de diminuer la température de production de 20-30 °C ainsi que la teneur en bitume, pour une teneur en vides similaire. Basés sur cette technique, différents produits ont été développés en utilisant par exemple deux liants de pénétration différente.

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

Il est connu que l'eau sous forme de mousse lors de la fabrication favorise la diminution de la viscosité de l'enrobé. L'humidité contrôlée ou maîtrisée de certaines fractions granulométriques déclenche le phénomène de moussage lors du malaxage. Ce procédé, bien que demandant plus de soin dans son exécution, est celui qui va permettre d'atteindre les plus grands gains en terme d'énergie et d'émissions. La maîtrise de la teneur en eau permet en effet, selon les cas, de travailler au-dessous de 100 °C et ainsi d'économiser une quantité substantielle d'énergie mobilisée généralement pour l'évaporation de l'eau.

C. Procédés basés sur des additifs chimiques :

Les procédés basés sur l'ajout d'additifs chimiques présentent l'avantage d'une grande simplicité de fabrication. En effet, l'additif est directement ajouté en ligne ou versé dans le malaxeur. La méthode la plus ancienne consiste à utiliser des cires comme additif. La température de fusion de la cire dépend de la longueur de la chaîne de carbone (C<sub>45</sub> ou plus). Il existe différents types de cires : artificielles, partiellement artificielles et naturelles. Les plus connues sont les cires artificielles de type Fischer-Tropsch (FT). Une autre catégorie très importante d'additifs chimiques est celles des surfactants (agents tensio-actifs) dont l'effet se concentre sur l'interface liant-granat.

Le tableau ci-dessous illustre de manière non exhaustive certains produits existants sur le marché. Une liste plus complète et des détails relatifs à chacune des technologies peuvent être trouvés dans [3].

**Tableau 1 – Exemples d'enrobés tièdes**

Principe	Produit	Températures	Gains potentiels	Coûts	Expérience
A	3E-LT <sup>®</sup>	T <sub>prod</sub> =125 °C T <sub>comp</sub> =80-110 °C	GES: 20-25%	n.a.	2004-2007: 5'000 t. (3E)
B	Advera <sup>®</sup>	T <sub>comp</sub> =120 °C	NO <sub>x</sub> : 30% COV: 60% CO: 60%	Zeolite: 1.35 US\$/kg Modif centrale: 5'000 – 40'000 US\$	USA et Am. Nord. >10'000 t.
B	Aspha-min <sup>®</sup>	T <sub>prod</sub> =125-150 °C T <sub>comp</sub> =100-130 °C	Energie: 20% CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> : 18-25%	Aspha-min: 0.60\$/lb Modif centrale: 5'000 – 40'000 US\$	2004-2008: 300'000 t. (Europe)
B	LT Asphalt <sup>®</sup>	T <sub>prod</sub> =90-95 °C T <sub>comp</sub> =60 °C	Energy: 50%	n.a.	Développé depuis 2004, surtout NL
B	LEA <sup>®</sup> (EBE)	T <sub>prod</sub> =90 °C T <sub>comp</sub> =60-90 °C	GES, NO <sub>x</sub> : 50% COV: 80% Energie: 50%	Modif centrale: 75'000 – 100'000 US\$	240'000 t. (Europe) 80'000 t. (USA)
C	Sasobit <sup>®</sup>	T <sub>prod</sub> =115-130 °C T <sub>comp</sub> =80 °C	Energie: 30% Emissions: 20%	2'000 €/t	1997-2007 > 10 mio t. (surtout Europe)
C	Rediset WMX <sup>®</sup>	T <sub>prod</sub> =120 °C	Energie: 20%	n.a.	Sections test USA et Europe (No, Sw)
C	Evotherm ET <sup>®</sup>	T <sub>prod</sub> =100-130 °C T <sub>prod</sub> =60-115 °C	CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> : 40-60% NO <sub>x</sub> : 60% GES: 60% Energie: 55%	7-10% de plus que liant trad. Modif centrale: 1'000 – 5'000 US\$	>100'000 t.
A+B	WAM-Foam <sup>®</sup>	T <sub>prod</sub> =100-120 °C T <sub>comp</sub> =80-100 °C	Energie: 35% CO <sub>2</sub> : 30-40% COV : 50-60%	Modif centrale: 60'000 – 85'000 US\$	2000-2007: 100'000 t. (Europe) 2008: 15'000 t. (Australie)

Outre l'économie énergétique et la diminution des émissions, les enrobés tièdes présentent différents avantages potentiels tels qu'un vieillissement plus faible du liant, la possibilité d'augmenter la teneur en matériaux recyclés, etc. Ces aspects sont discutés notamment dans [4] et [5].

### 3.3. Matériaux sélectionnés pour la recherche

Dans le cadre de cette recherche, il a été choisi d'évaluer les familles de technologies décrites précédemment. Les technologies suivantes ont été sélectionnées, la nomenclature utilisée étant indiquée entre parenthèse :

- Enrobé de référence à chaud (REF)
- Enrobé tiède avec ajout de cire (ET-C)
- Enrobé tiède avec additif chimique (ET-P)
- Enrobé semi-tiède avec maîtrise de la teneur en eau (EST)

Pour chaque famille de technologie, un procédé a été choisi sur la base de différents critères: potentiel de gains énergétiques et environnementaux, complexité du processus de fabrication, expérience, disponibilité.

## 4. APPROCHE PERFORMANTIELLE

### 4.1. Problématique et méthodologie

Différentes recherches relatives aux performances des enrobés tièdes existent. Nous pouvons par exemple citer les travaux effectués par Hurley et Prowell [6], [7], [8] qui identifient, dans le cas de la cire Sasobit<sup>®</sup> une susceptibilité accrue à l'humidité. Par contre, les auteurs mentionnent également une meilleure résistance à l'orniérage. Des observations similaires ont été faites par Soenen et al. [9] qui analysent différents types de cires afin d'en identifier la plus performante. Sheth [10] obtient également des

performances plus faibles lors de l'utilisation d'additifs chimiques (agents tensio-actifs notamment).

Ces différentes recherches ainsi qu'une analyse bibliographique approfondie permettent de mettre en évidence des performances potentiellement critiques des enrobés tièdes.

Nous choisissons d'analyser en particulier :

- Comportement à basse température → Essai de compression diamétrale (-10 °C)
- Comportement à haute température → Essai de compression diamétrale (40 °C)
- Sensibilité à l'eau → Essai de traction indirecte avec et sans conditionnement
- Sensibilité à l'orniérage → Simulateur de trafic
- Module complexe → Essai sur éprouvette trapézoïdale
- Fatigue → Essai sur éprouvette trapézoïdale

Au-delà des performances, il a été choisi de mettre un accent particulier sur deux aspects potentiellement critiques et peu évalués à notre connaissance :

- Processus de montée en performance (temps de cure) : En raison de la relative jeunesse des technologies, le recul sur les performances et le comportement à long terme est encore limité. C'est pourquoi, il est choisi de mettre un accent sur le processus de montée en performance des enrobés avec des essais après 0, 1, 2, 4 et 12 semaines.
- Méthode de conservation des échantillons : La méthode traditionnelle consiste à conserver les échantillons à l'air libre en laboratoire. Afin de « reproduire » le confinement de la couche de base une partie des échantillons ont été conservés dans des sacs plastiques lors de la période de cure.

La méthodologie suivie lors de l'analyse performantielle en laboratoire (Etape 4) est décrite dans la Figure 2.

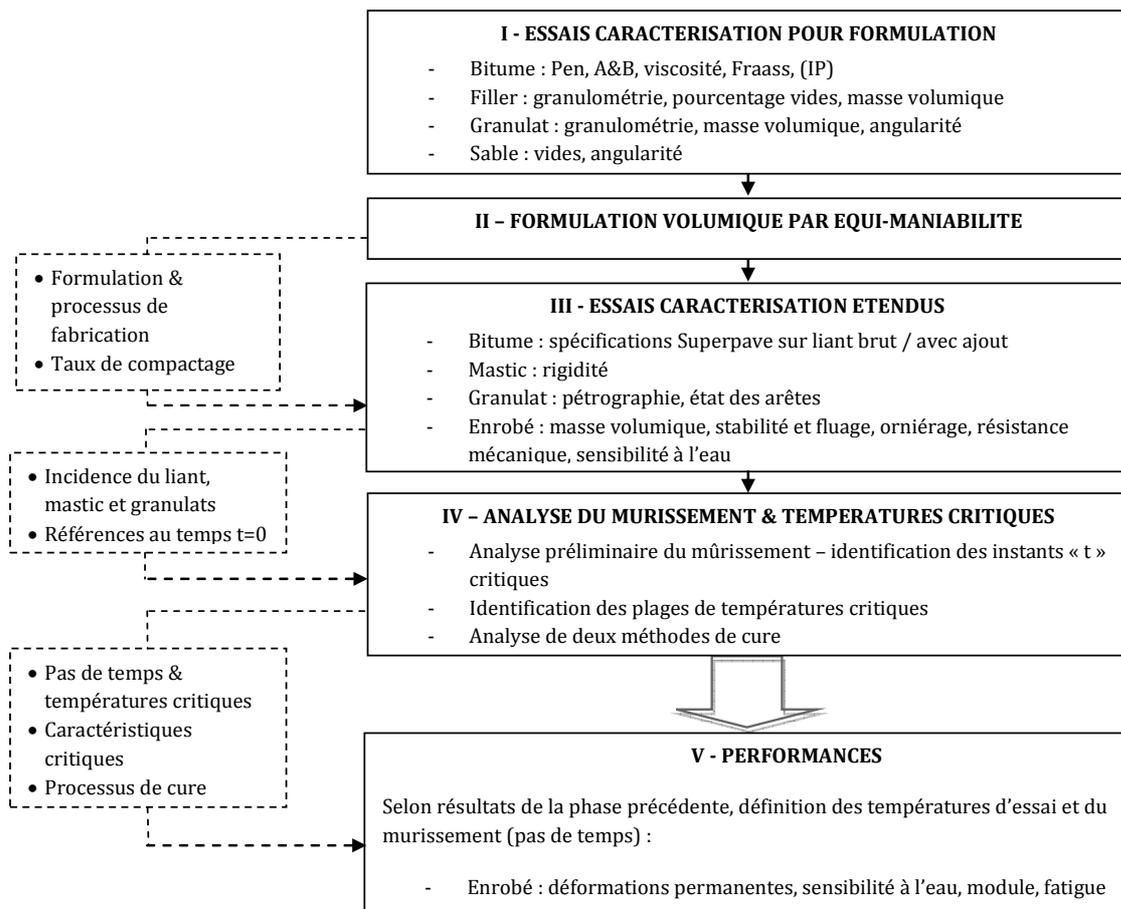


Figure 2 – Méthodologie pour l'analyse performantielle en laboratoire

#### 4.2. Formulation

Nous avons considéré les matériaux pour couche de base en raison de leur importance en volume sur l'ensemble de la chaussée. La formulation est effectuée selon l'approche volumétrique développée par le Centre Belge de Recherches Routières (C.R.R.) [11], tout en mettant un accent particulier sur le module de richesse. Le logiciel Prado-Win est utilisé pour la formulation. La formule de l'enrobé traditionnel (milieu de fuseau) pour couche de base utilisée est la suivante (diamètre maximal des grains 22 mm) :

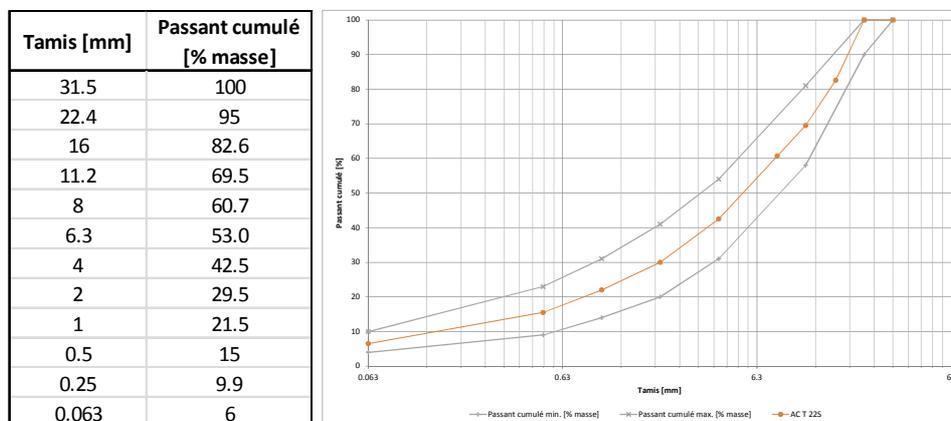


Figure 3 – Courbe granulométrique AC T 22S

Dans l'ensemble de la recherche, le même bitume brut de pénétration 50/70 ainsi que le même type de granulat sont utilisés. Pour les enrobés tièdes, une seule teneur en additif

est également utilisée, respectivement 3% de la masse de bitume pour la cire et 0.4% de la masse de bitume pour l'agent tensio-actif. Des procédures détaillées de fabrication ont été mises au point en accord avec l'expérience des fournisseurs.

### 4.3. Analyse de la viscosité

Afin de pouvoir effectuer des comparaisons au niveau des caractéristiques et performances mécaniques des enrobés, il a été choisi de travailler avec une teneur en vides comparable. Pour cela, une approche par équi-compacité a permis de déterminer la température optimale de compactage des différents enrobés [12]. La Figure 4 illustre que selon la technologie choisie, une température minimale de compactage peut être définie, température au-dessus de laquelle la compacité n'évolue pas de manière significative. Sur la base de cette analyse il a été choisi de compacter les enrobés à la cire (ET-C) et avec additif chimique (ET-P) à une température de 120 °C, et à une température de 100 °C dans le cas de l'enrobé EST. Des résultats identiques ont été obtenus par une analyse basée sur la teneur en vides Marshall (50 coups sur chaque face).

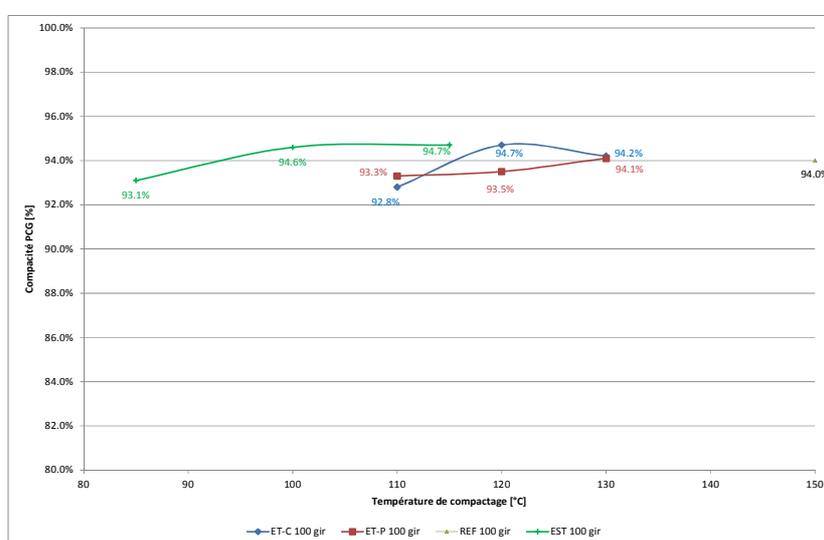


Figure 4 – Compacité PCG (100 girations) à différentes températures

En plus d'essais classiques (Pen, A&B), des analyses de viscosité sur une plage de température allant de 155 °C à 15 °C ont été effectuées sur le liant ainsi que sur le mastic. Les mesures ont été faites avec un rhéomètre AR. La composition du mastic est déterminée en se basant sur la notion du module de richesse et fixée à 57% de filler et 43% de liant.

La mesure du module de cisaillement complexe permet de mettre en évidence le mécanisme des différentes technologies tièdes. On observe l'effet de la cire qui diminue la viscosité du mastic et du liant lors de sa fusion à environ 90 °C, favorisant ainsi la maniabilité. La cire, solide à des températures inférieures à 80 °C aura par contre pour effet d'augmenter la viscosité aux températures de service ce qui améliore notamment le comportement aux déformations permanentes. L'agent tensio-actif (ET-P) n'affecte pas le module de cisaillement complexe du bitume de base (REF), son action s'effectuant au niveau de l'interface liant-granulat [13]. Ces différents essais n'ont pas pu être réalisés pour l'enrobé semi-tiède (EST) ceci en raison du moussage lié à l'humidité qui empêche une mesure stable au rhéomètre.

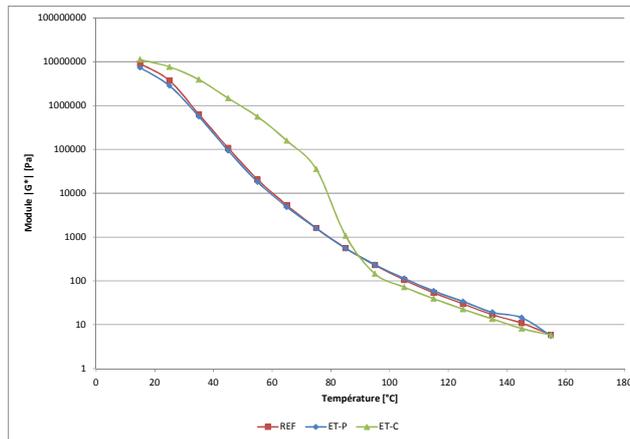


Figure 5 – Module de cisailment complexe du mastic (rhéomètre)

#### 4.4. Résultats et discussions

De manière générale, les essais effectués n'indiquent pas de différences de comportement fondamentales entre les différents types d'enrobés. Les performances des enrobés tièdes sont cependant généralement légèrement inférieures à celles de l'enrobé de référence à chaud. Le Tableau 2 illustre cette différence en exprimant les résultats de compression diamétrale des différents enrobés tièdes en pourcentage de la valeur mesurée sur l'enrobé de référence. Les essais ont été faits à trois températures (-10 °C, 15 °C et 40 °C) et l'effet du conditionnement a été également analysé.

- a) Nous pouvons observer que l'enrobé avec ajout de cire (ET-C) et l'enrobé avec agent tensio-actif (ET-P) ont un comportement très proche de celui de la référence. L'enrobé avec maîtrise de la teneur en eau (EST) est moins performant, ceci pouvant en partie être lié à un vieillissement plus faible du liant.

Tableau 2 – Résultats de compression diamétrale exprimés comparativement à la référence à chaud

Cure [sem]	Conditio. [-]	Temp CD [°C]	REF [N/mm2]	CD [% 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%

- b) Le processus de montée en performance a également été évalué par des essais à différents pas de temps (0, 1, 2, 4 et 12 semaines). Les résultats obtenus avec les différents enrobés ne permettent pas de tracer une évolution significative en laboratoire des performances au cours du temps. Les performances maximales sont en général atteintes après au maximum deux semaines et elles n'évoluent pas de manière significative par la suite. Afin de vérifier ces tendances, un test statistique (T-Test) a été effectué. Ce test permet d'analyser si des séries de données sont statistiquement différentes et ainsi d'évaluer la différence entre des valeurs mesurées à deux pas de temps. Les résultats montrent que pour les différents enrobés, la différence mesurée n'est pas significative i.e. il n'y a pas de processus significatif de montée en performance.

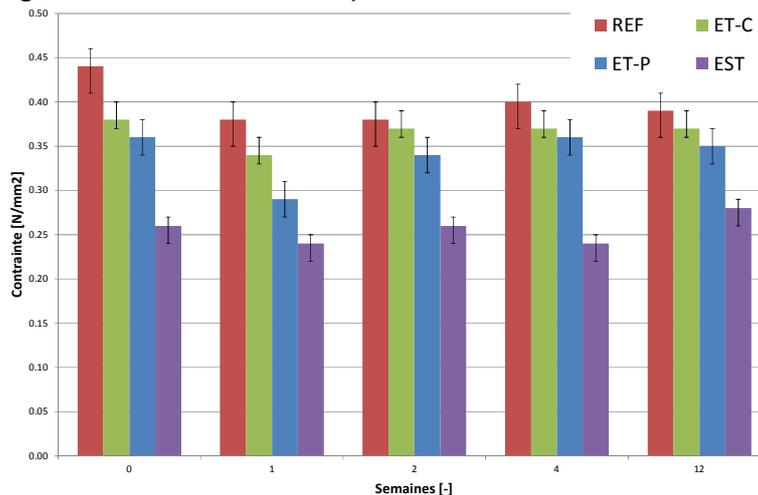


Figure 6 – Résultats de compression diamétrale à 40 °C à différents pas de temps (sans conditionnement dans sac plastique)

- c) Les différents essais ne mettent également pas en évidence un effet significatif de la méthode de conditionnement (dans un sac plastique). Ces résultats sont confirmés par le test statistique T-Test.

## 5. METHODOLOGIE D'EVALUATION MULTICRITERE

### 5.1. Contexte

De nombreuses méthodes et outils existent afin d'évaluer les impacts de projets de tracés routiers. Nous pouvons par exemple citer CHANGER<sup>®</sup> de la Fédération Routière Internationale [14], Gaïa<sup>®</sup> (Eurovia) ou encore asPECT<sup>®</sup> (Asphalt Pavement Embodied Carbon Tool) développé entre autre par TRL. Cependant, peu de méthodes permettent de comparer les procédés (technologies d'enrobage) dans le détail. Le premier objectif consiste donc à se situer au niveau de l'analyse des procédés afin d'aider la personne responsable dans le choix du type d'enrobé.

Les calculateurs couramment utilisés prennent en considération les émissions de gaz à effet de serre (bien souvent rapportées en CO<sub>2</sub>-équivalent), les aspects énergétiques et parfois également les aspects économiques. Ceci est lié d'une part à une problématique de segmentation des compétences, mais également à une hypothèse de base qui consiste à supposer des performances équivalentes des différents enrobés. C'est justement cette notion de performance, importante dans le processus décisionnel, qu'il est proposé d'intégrer dans le développement d'un outil global. En effet, quelle sera la meilleure alternative entre un procédé « écologique » à la sensibilité à l'eau accrue et un

procédé traditionnel aux performances mécaniques supérieures ? Il est donc choisi de considérer les aspects suivants :

- Consommation énergétique
- Emissions
- Aspects économiques
- Performances de l'enrobé

Une méthodologie d'évaluation multicritère est proposée et implémentée dans l'outil développé.

## 5.2. Energie, émissions, coûts : définition du système

Les différents critères considérés s'inscrivent dans un domaine spatial et temporel différent. L'énergie, les émissions et les coûts s'évaluent sur l'ensemble du cycle de vie de l'enrobé bitumineux. Pour ces critères, les limites du système sont primordiales (Figure 7). Le système est constitué d'un ensemble d'éléments en interaction dynamique et ses limites permettent de le distinguer du milieu environnant. Les inputs sont les ressources extraites, l'énergie et les surfaces utilisés. Les outputs du système sont les produits (système offert) pour ce qui est du monde économique et les émissions pour l'environnement (air, eau, sol et bruit). Différentes hypothèses ou simplifications sont effectuées dans l'élaboration du système et sa définition, dont voici les principales:

- La production des machines (finisseur, compacteur), véhicules et usines (raffinerie, centrale d'enrobage) n'est pas traitée dans le système défini, seule l'opération est prise en considération.
- Energie et émissions liées à la production de l'énergie utilisée pour les processus unitaires ne sont pas considérées.
- Les opérations d'entretien ne sont pas considérées, l'étude se focalise sur l'enrobé au cours de sa durée de vie. La nécessité de ces opérations sera cependant indirectement prise en compte au-travers des performances.
- Transport identique pour les enrobés tièdes et chaud. Ceci sous-entend que les enrobés ont la même distance de transport et un coefficient de foisonnement similaire.
- Pas de matériaux recyclés lors de la fabrication des enrobés.
- Compactage et pose à la machine uniquement.

Dans la Figure 7, les limites du système sont indiquées par un trait discontinu orange. Les processus indiqués en bleus correspondent aux processus unitaires déterminants. Ceux-ci représentent une différence plus ou moins significative entre les enrobés tièdes et les enrobés à chaud. Les processus indiqués en rouge 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 cette analyse du cycle de vie (limites des bornes), mais une valeur intrinsèque traduisant le potentiel de « recyclabilité » sera affectée lors de l'analyse.

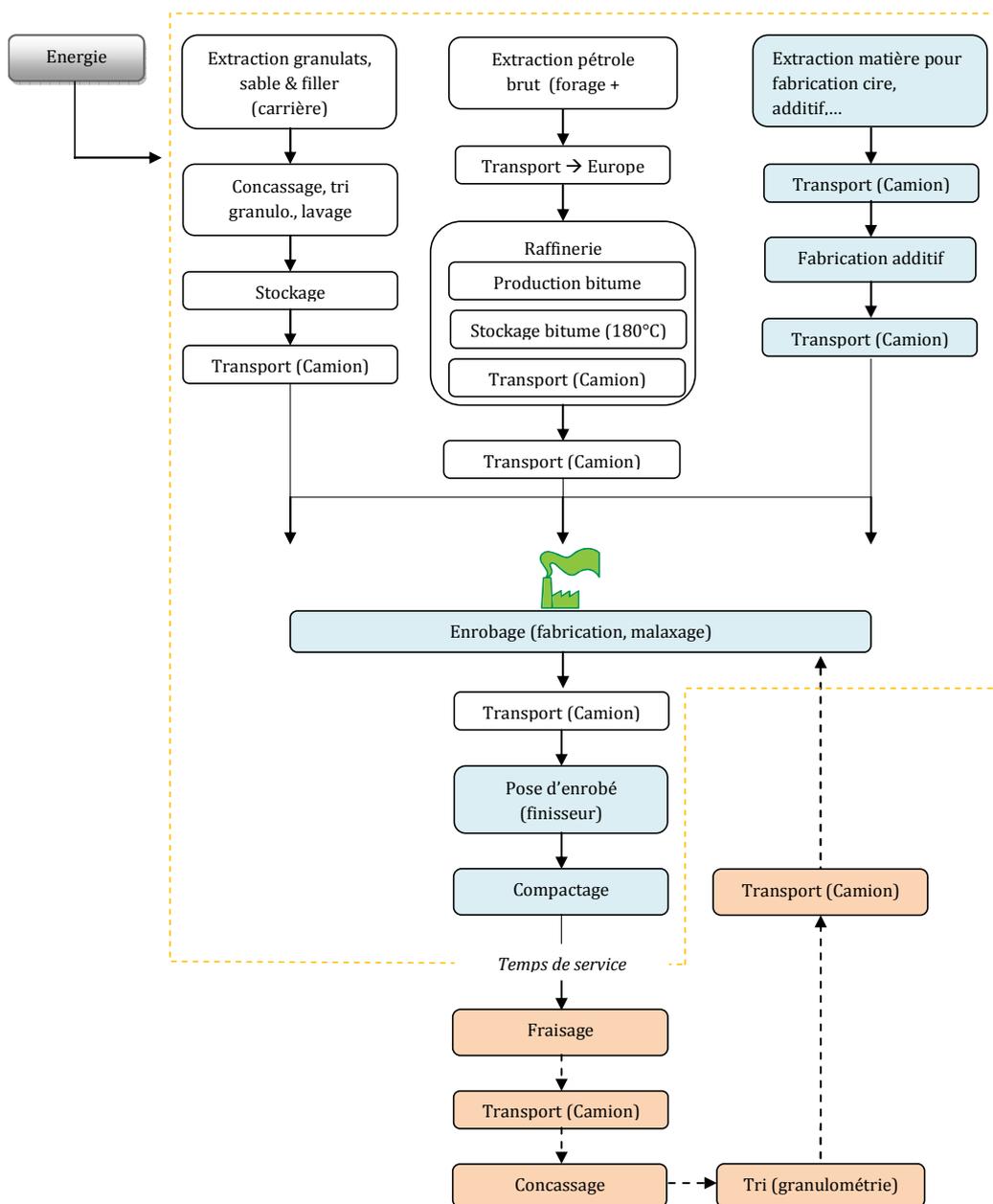


Figure 7 – Limites du système pour critères énergie, émissions, coûts

Nous pouvons relever ici que pour les critères énergie, émissions et environnement, un inventaire sur le cycle de vie (ICV, life cycle inventory – LCI) est établi. Cet inventaire se distingue des analyses du cycle de vie (ACV) puisque l'analyse des impacts et leur interprétation n'est pas effectuée.

### 5.3. Indicateurs de performances

Contrairement aux autres critères, la performance correspond à un état ponctuel sur le cycle de vie de l'enrobé. Il s'agit de la performance juste après la pose ou après un temps donné d'exploitation. Les caractéristiques du mélange sont également comprises sous le vocable de performance et nous considérons les éléments suivants, évalués notamment lors de l'analyse performantielle :

- Sensibilité à l'eau
- Comportement à basse température et haute température
- Sensibilité à l'orniérage

- Fatigue
- Module complexe (ou module sécant)

Afin de pouvoir procéder par la suite à une analyse multicritère, il est nécessaire de développer des indicateurs de performance. Etant donné une technologie  $i$  et une performance  $j$ , nous définissons les deux indicateurs suivants :

- $S_{ij}$  : score de la performance  $j$  normalisée de la technologie  $i$

- $S_i$  : indicateur agrégé de la technologie  $i$

$$S_i = \sum a_j b_j S_{ij}$$

$a_j$  : coefficient de pondération de la performance  $j$ , défini tel que  $\sum a_j = 1$  afin d'éviter le risque de compensation

$b_j$  : coefficient de confiance selon le type de données (essais laboratoire, in-situ, estimation,...)

Un seuil de veto sur  $S_{ij}$  est également utilisé afin d'éviter la prise en compte de performances insuffisantes.

#### 5.4. Sources des données

La source des données utilisées est de première importance dans le cadre d'une évaluation multicritère puisqu'elle conditionne l'ensemble des résultats. Dans le cas idéal, les différentes données sont connues par l'utilisateur. Cependant, ceci n'est bien souvent pas le cas et c'est pourquoi il est nécessaire d'avoir recours à différentes sources. La base de données « Lavoc » consiste en l'expérience acquise en laboratoire avec les différents essais de produits. Le tableau ci-dessous indique les différentes sources de données utilisées.

Tableau 3 – Données utilisées pour le modèle multicritère

	Energie	Emissions	Coûts	Performances
Théorique (calcul)	X	X		
Mesures (centrales, labo)	X	X		X
Littérature	X	X	X	X
BD (Ecoinvent <sup>®</sup> , Lavoc)	X	X		X
Autres (enquête, ...)			X	

Un accent particulier est mis ici sur les données théoriques et le recueil de données provenant de centrales. Le calcul théorique permet d'effectuer des analyses de sensibilité mais également d'identifier les constituants prépondérants pour ce qui est de la consommation énergétique et des émissions. Par exemple, la teneur en eau du sable joue un rôle primordial ; une humidité de 1% permet de diminuer la consommation énergétique de 14% par rapport à une humidité de 5% dans le cas d'un enrobé pour couche de base [15]. Un exemple de résultats est présenté dans la Figure 8. Cette figure illustre les gains théoriques avec différentes technologies tièdes et semi-tièdes.

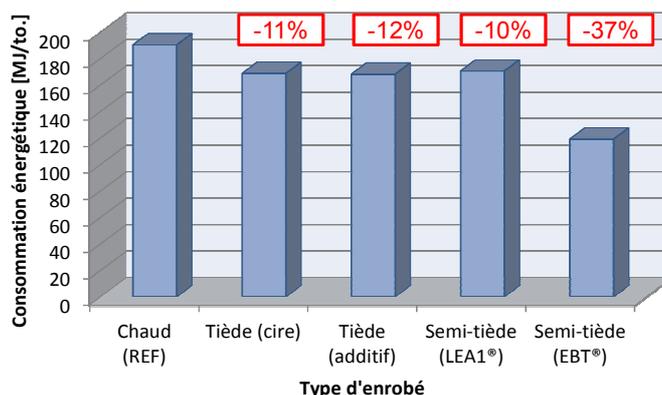


Figure 8 – Consommation énergétique calculée de différents enrobés [15]

Afin de caler les résultats théoriques, des données mesurées sont utilisées. Le Tableau 4 présente les résultats de consommation énergétique pour différentes centrales représentatives du parc suisse. Des données similaires relatives aux émissions sont également utilisées.

Tableau 4 – Consommation énergétique pour différentes centrales d'enrobage

	Centrale N° 1			Centrale N° 2		Centrale N° 3	Centrale N° 4		Centrale N° 5		Centrale N° 6		Centrale N° 7	
<b>Données générales</b>														
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				Froid/Chaud		Froid/Chaud	
<b>Production</b>														
Année	2007	2008	2009	2008	2009	2010	2008	2009	2008	2009	2009	2009	2009	2010
Durée production annuelle [mois]	10	10	10	10	10	11	11	11	10	10	12	11	11	11
Production annuelle [to.]	64'430	50'410	65'162	69'519	72'036	70'000	88'661	93'341	24'860	19'324	97'000	63'534	63'534	
<b>Energie</b>														
Année	2007	2008	2009	2008	2009	2010								
<b>Fuel</b>														
Consommation [l]	-	-	-	75'704	82'841	600'000	-	-	-	-	679'000	553'527	308'139	
l / to.	-	-	-	1.1	1.1	8.6	-	-	-	-	7	8.7	4.85	
kWh / to.	-	-	-	10.8	11.4	85.2	-	-	-	-	69.58	86.6	48.2	
<b>Gaz</b>														
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 / to.	82.9	86.0	81.5	74.8	74.4	-	100.3	93.2	108.0	92.3	-	-	-	
<b>Electricité</b>														
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	639'196	
kWh / to.	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	
<b>Total [kWh/to]</b>	88.5	93.0	87.1	92.4	92.6	106.6	104.4	97.0	117.8	103.3	75.6	96.7	58.3	

## 5.5. Méthodologie d'évaluation multicritère

L'objectif consiste à fournir un outil pour l'aide à la décision dans le choix de la technologie d'enrobé, cette décision étant prise selon des critères de consommation énergétique, émissions, économiques et performantiels. Différents familles de méthodes multicritères existent. Nous pouvons distinguer [16]:

- Les méthodes d'agrégation partielle

Ces méthodes ont été développées par les tenants de « l'école européenne ». La méthode consiste à comparer les variantes deux par deux, critère par critère dans une première phase pour ensuite en déduire des relations de surclassement entre les variantes. Finalement, une synthèse des relations entre les variantes est proposée ce qui permet de faire un tri. Ces méthodes ne nécessitent pas de calculer une fonction d'utilité, mais elles peuvent parfois être peu claires, la synthèse des résultats étant basée sur une analyse de graphiques. Le nombre de comparaisons à effectuer va dépendre du nombre de variantes (pour n variantes, n(n-1) comparaisons) et la méthode peut donc être difficile à appliquer dans le cas de nombreuses variantes. Un exemple de méthode d'agrégation partielle, couramment utilisée, est la méthode Electre (élimination et choix traduisant la réalité).

- Les méthodes d'agrégation complète  
Ces méthodes, développées par les tenants de « l'école nord-américaine », consistent à attribuer une fonction d'utilité partielle à chaque critère. Ensuite, pour chacune des variantes, une fonction mathématique agrège les différentes utilités partielles propres à chaque critère. Cette méthode permet de fournir un classement précis et une réponse unique ; mais la fonction d'utilité partielle est parfois complexe à établir et la méthode peut donner l'impression d'un certain manque de transparence. De nombreuses méthodes d'agrégation complète existent comme par exemple la MAUT (multi-attribute utility theory) qui est l'une des méthodes les plus appliquées.
- Les méthodes d'agrégation locale itérative  
L'agrégation locale itérative est particulièrement intéressante dans le cas d'un grand nombre de variantes. La méthode consiste à effectuer une exploration locale en fixant tout d'abord une solution de départ (variante initiale) aussi bonne que possible. Ensuite, on regarde dans l'ensemble des variantes proches de la variante initiale s'il existe une meilleure variante, cette dernière devenant la variante initiale d'un nouveau processus. On procède ensuite par itérations successives.

Le choix de la méthode multicritère est dépendant de l'objectif et du type d'analyse. Dans le cas d'analyse multicritère pour le choix de variantes d'infrastructures routières, [16] indique qu'il n'y a « *pas de méthode multicritère parfaite et idéale... Méthode d'agrégation partielle est la plus adaptée au projet routier* ». Dans son travail relatif à l'utilisation de matériaux alternatifs dans les chaussées [17] utilise quant à lui une agrégation complète par pondération technique d'indicateurs partiels.

Prenant en considération les différents types de méthodes et leurs caractéristiques, une démarche en quatre niveaux est proposée pour l'évaluation multicritère de technologies d'enrobés bitumineux. Les deux premiers niveaux proposent une analyse avec les données brutes, alors que les deux derniers recourent à des méthodes d'agrégation introduisant la notion de subjectivité au-travers de facteurs de pondération. L'outil appliquant cette méthodologie est actuellement en cours d'élaboration, des résultats d'applications seront disponibles très prochainement.

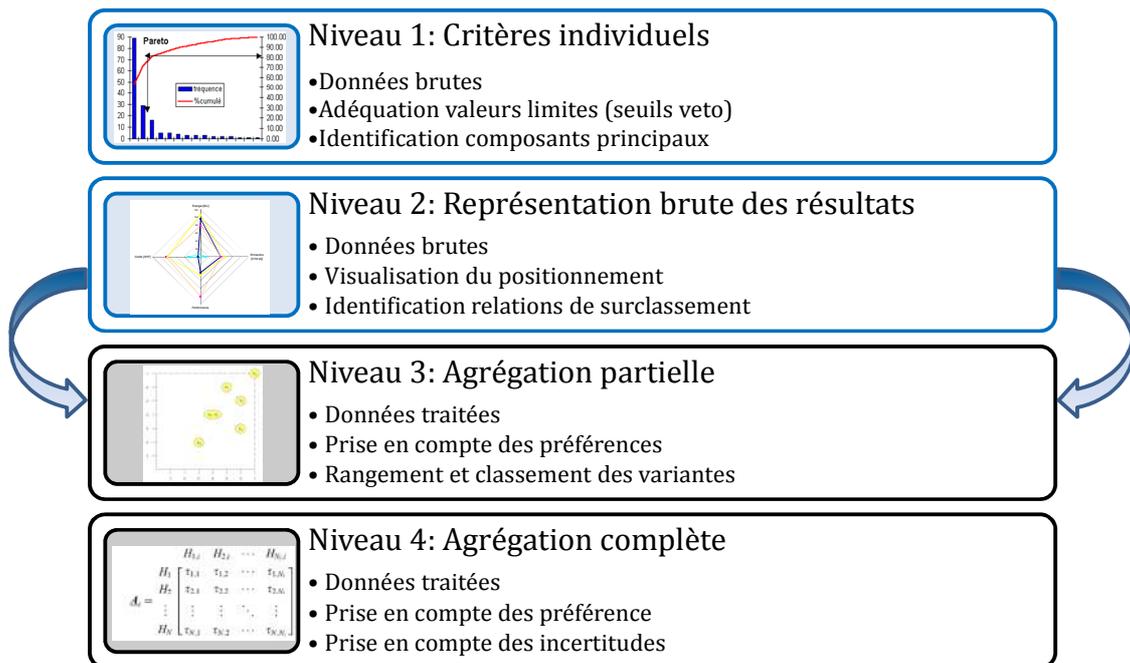


Figure 9 – Démarche pour l'évaluation multicritère

#### Niveau 1 : Représentation des critères individuels

Dans cette étape, l'utilisation de représentations de Pareto est utilisée. La loi de Pareto (également appelée loi 20/80 en référence au fait que 20% des causes sont en général responsables de 80% des conséquences) permet de classer les éléments par ordre d'importance et également d'identifier les relations de surclassement. L'objectif de ce premier niveau est de trier les éléments par ordre d'importance et ainsi identifier les processus unitaires dominants. Cette analyse est faite pour chaque critère individuellement.

#### Niveau 2 : Représentation brute des résultats

Cette seconde représentation s'effectue également avec les données brutes, sans aucune agrégation, à l'exception de la performance pour laquelle l'indicateur agrégé est utilisé. La représentation des données brutes sous la forme d'un espace à quatre axes (diagramme radar) permet d'identifier les relations de surclassement et de représenter de manière très visuelle les différents seuils. Cette méthode ne permet cependant pas de donner une importance propre à chacun des critères et « l'effet d'échelle » peut induire en erreur. Afin de prendre en compte ces aspects, des méthodes d'agrégations sont utilisées par la suite.

#### Niveau 3 : Agrégation partielle

Afin de prendre en considération la notion de préférence et de pondération des différents critères, une méthode d'agrégation partielle est utilisée. La méthode Electre III est choisie. Cette méthode permet de ranger et classer les variantes, tout en prenant en compte des critères qualitatifs et quantitatifs. Electre III utilise également la notion de critères francs et flous (transition progressive entre l'indifférence et la préférence) qui est particulièrement adaptée.

#### Niveau 4 : Agrégation complète

Afin de prendre en compte des notions probabilistes ainsi que d'incertitude relative aux données, l'utilisation d'une méthode d'agrégation complète est proposée dans une dernière étape. La méthode appliquée ici est celle proposée par Yang et al [18] qui utilise la théorie de l'évidence (Dempster-Shafer) dans le cadre d'évaluation multicritère. Cette méthode utilise une matrice de décision dans laquelle les attributs sont évalués selon une structure traduisant l'espérance des valeurs. Elle permet de représenter à la fois l'imprécision et l'incertitude sur les données, tout en représentant parfaitement ce qui est déjà connu.

## 6. CONCLUSIONS

Les performances des enrobés tièdes sélectionnés (cire FT, agent tensio-actif, maîtrise de la teneur en eau) sont légèrement inférieures à la référence à chaud en ce qui concerne le comportement à basses et hautes températures. Cette différence est plus élevée pour l'enrobé avec maîtrise de la teneur en eau. La sensibilité à l'eau fournit des résultats similaires alors que la résistance aux déformations permanentes s'avère meilleure pour la cire par rapport à la référence. Aucun effet de cure significatif (montée en performance) n'a été mis en évidence en laboratoire.

La méthodologie d'évaluation multicritère proposée prend en considération les aspects énergétiques, environnementaux, économiques, mais également performantiels. Elle permet de quantifier les gains ou déficits de chaque technique par rapport à un matériau de référence. L'outil développé doit encore être validé avant d'être mis au service des administrations, bureau d'étude et entreprises. Cette prise en considération des performances de l'enrobé dans le cadre d'une analyse multicritère offre ainsi une vue

globale de la technologie et permet finalement d'affiner le processus de décision et ainsi encourager l'innovation.

## REFERENCES

1. Stripple, H. (2001). Life Cycle Assessment of Road: A Pilot Study for Inventory Analysis. Swedish Environmental Research Institute IVL. Gothenburg
2. Olard, F. and C. Le Noan (2007). EBT®: Les Enrobés à Basse Température, 2ème prix de la sélection française du prix AIPCR 2007, Catégorie développement durable. Paris
3. Bueche, N., Dumont A.-G., and Angst C. (2009). Projet initial – Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques. Rapport N° 1299. OFROU
4. Prowell, B.D. and G.C. Hurley, Warm-Mix Asphalt: Best Practices, N.A.P.A. (NAPA), Editor. 2007, NAPA. p. 44
5. Bueche N. (2009). Warm asphalt bituminous mixtures with regards to energy, emissions and performance. Young Researchers Seminar. Turin
6. Prowell, B. D. and G. C. Hurley (2005a). Evaluation of Aspha-min® zeolite for use in Warm Mix Asphalt, National Center for Asphalt Technology, NCAT Report 05-04. Auburn University
7. Prowell, B. D. and G. C. Hurley (2005b). Evaluation of Sasobit® for use in Warm Mix Asphalt, National Center for Asphalt Technology, NCAT Report 05-06. Auburn University
8. Prowell, B. D. and G. C. Hurley (2006). Evaluation of Evotherm® for use in Warm Mix Asphalt, National Center for Asphalt Technology, NCAT Report 06-02. Auburn University
9. Soenen, H. et al (2008). A laboratory study on the use of waxes to reduce paving temperatures, In: 4th Eurasphalt and Eurobitume Congress. Copenhagen
10. Sheth N. M. (2010). Evaluation of selected warm mix asphalt additives. These de l'université d'Iowa,
11. Steuperaert, J. et al. (1997). Code de bonne pratique pour la formulation des enrobés bitumineux. Centre de Recherches Routières (C.R.R.), Belgique.
12. Radenberg et al. (2006). Merkblatt für Temperaturabsenkung von Asphalt M TA. Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen. Germany
13. Gonzalez J.A., Ligier S. et al. (2009). Warm Mix Asphalts with Chemical Additives: Properties and Advantages. Enviroad 2009. Varsovie
14. Bueche N. and Dumont A.-G. (2010). IRF Greenhouse Gas calculator - Analysis and validation. Lausanne
15. Bueche N. (2010). Gains en énergie avec les enrobés tièdes. Journée Technique 2010 : L'énergie en technique routière. Lausanne
16. Tille M. (2000). Choix de variants d'infrastructures routières: méthodes multicritères. Thèse EPFL N°2294. Lausanne
17. Sayagh S. (2007). Approche multicritère de l'utilisation de matériaux alternatifs dans les chaussées. Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Nantes
18. Yang J..B. (2001). Rule and utility based evidential reasoning approach for multiattribute decision analysis under uncertainties. European Journal of Operational Research, Vol. 131