



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Paquet de recherche PLANET : RS-5: Modèle global d'évaluation

**Forschungspaket PLANET: EP-5: Umfassendes
Auswertungsmodell**

**Research Package PLANET : WP-5: Global evaluation
model**

**Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Laboratoire des voies de circulation (LAVOC)
N. Bueche, Dr. ès. sc EPF
A.-G. Dumont, professeur EPF**

**Projet de recherche VSS 2010/545 sur demande de l'Association suisse
des professionnels de la route et des transports (VSS)**

Décembre 2016

1595

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

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

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

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

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

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

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

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



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Paquet de recherche PLANET : RS-5: Modèle global d'évaluation

**Forschungspaket PLANET: EP-5: Umfassendes
Auswertungsmodell**

**Research Package PLANET : WP-5: Global evaluation
model**

**Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Laboratoire des voies de circulation (LAVOC)
N. Bueche, Dr. ès. sc EPF
A.-G. Dumont, professeur EPF**

**Projet de recherche VSS 2010/545 sur demande de sur demande de
l'Association suisse des professionnels de la route et des transports
(VSS)**

Impressum

Instance de recherche et équipe de projet

Direction du projet

Prof. A.-G. Dumont, EPFL-LAVOC

Membre

N. Bueche, Dr. ès sc. EPF, EPFL-LAVOC

Commission d'experts responsable

Commission d'experts FK3: Matériaux

Commission de suivi

Président

Heinz Aeschlimann

Membres

Hans-Peter Beyeler

Sandra Dünner

Martin Horat

Felix Solcà

Hansruedi Eberhard

Adrian Zippo

Direction paquet de recherche PLANET

Thomas Arn

Auteur de la demande

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

Source

Le présent document est téléchargeable gratuitement sur <http://www.mobilityplatform.ch>.

Table des matières

Impressum	4
Résumé	7
Zusammenfassung	9
Summary	11
1 Introduction	13
1.1 Contexte – paquet de recherche PLANET	13
1.2 Objectifs et contenu de la recherche	14
1.3 Les enrobés tièdes	16
2 Evaluation environnementale	19
2.1 Analyse et inventaire du cycle de vie	19
2.1.1 Définition des objectifs et du système	20
2.1.2 Inventaire des polluants et matières premières	20
2.1.3 Analyse de l'impact	20
2.1.4 Interprétation	22
2.2 Autres méthodes d'analyse environnementale	23
2.3 Normalisation et organisations internationales	24
2.4 Application aux projets routiers	25
2.4.1 Analyse du cycle de vie.....	25
2.4.2 Calculateurs de gaz à effet de serre	33
2.5 Choix d'une méthode d'analyse environnementale	36
2.6 Emissions considérées dans le modèle	37
3 Développement de la méthodologie multicritère d'évaluation	39
3.1 Principes et architecture de la méthodologie	39
3.2 Sources de données	40
3.2.1 Bases de données	41
3.2.2 Qualité et incertitude des bases de données	44
3.3 Partie 1: Inventaire du cycle de vie et indicateurs qualitatifs/quantitatifs.....	46
3.3.1 Paramètres et hypothèses de base	46
3.3.2 Objectifs et système	48
3.3.3 Inventaires des émissions et de l'énergie	51
3.3.4 Critères quantitatifs: Indices performantiels	53
3.3.5 Critères qualitatifs	56
3.3.6 Synthèse partie 1 du modèle	57
3.4 Partie 2: Evaluation multicritère	58
3.4.1 Contexte et problématique	58
3.4.2 Méthodes multicritères d'aide à la décision	60
3.4.3 Choix des méthodes	64
3.4.4 Agrégation partielle (méthode Electre III)	65
3.4.5 Agrégation complète (théorie de l'Evidence)	72
3.4.6 Synthèse de la méthodologie d'évaluation multicritère	79
4 Implémentation de la méthodologie.....	83
4.1 Partie 1: Inventaire du cycle de vie	83
4.2 Partie 2: Evaluation multicritère	85
4.2.1 Niveau 1: Analyse Pareto.....	85
4.2.2 Niveau 2: Analyse graphique	86
4.2.3 Niveau 3: Agrégation partielle	87
4.2.4 Niveau 4: Agrégation complète	90
5 Application de la méthodologie.....	93

5.1	Choix des procédés et hypothèses de base.....	93
5.2	Partie 1: Etablissement des indicateurs.....	95
5.2.1	Inventaire du cycle de vie	95
5.2.2	Indices de performance	97
5.3	Partie 2: Analyse multicritère	98
5.3.1	Niveau 1: Analyse Pareto	98
5.3.2	Niveau 2: Analyse graphique.....	99
5.3.3	Niveau 3: Agrégation partielle.....	100
5.3.4	Niveau 4: Agrégation complète.....	106
5.4	Discussion des résultats	110
6	Conclusions et recommandations	113
6.1	Conclusions	113
6.2	Recommandations et perspectives.....	114
	Annexes	117
	Glossaire.....	127
	Bibliographie	129
	Clôture du projet	133
	Index des rapports de recherche en matière de route	137

Résumé

Le projet PLANET (Potentiel et ANalyse des Enrobés Tièdes) a pour objectif principal d'améliorer les connaissances dans le domaine de ces enrobés à faibles impacts énergétiques et écologiques. Pour cela, il est nécessaire d'étudier les aspects relatifs aux performances mécaniques, au potentiel énergétique et écologique, à l'hygiène au travail ainsi qu'à la fabrication et au contrôle qualité. L'identification du potentiel et des limitations doivent finalement permettre de promouvoir la bonne pratique relative aux enrobés tièdes en Suisse.

La présente recherche « RS-5 : Modèle global d'évaluation » se situe au cœur du projet PLANET, son objectif étant le développement et l'implémentation d'un modèle d'évaluation multicritère permettant de classer différentes technologies d'enrobés bitumineux sur la base d'une série de critères qualitatifs et quantitatifs. Le modèle développé doit finalement permettre d'identifier la meilleure variante d'enrobé ainsi que quantifier la solidité de la solution proposée pour assister dans le processus décisionnel.

Dans un premier temps, une étude approfondie des méthodes d'évaluation environnementale ainsi que de l'aide à la décision a été réalisée. Cette étude constitue les fondements du modèle PLANET avec la sélection de méthodes d'aide à la décision qui n'étaient initialement pas destinées au domaine des matériaux de chaussées.

Le modèle PLANET d'aide à la décision a ensuite été développé. Pour cela, il a été choisi de combiner différentes méthodes afin de proposer une évaluation progressive 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. Ces deux premiers niveaux ne prennent en compte que les critères quantitatifs.
- L'utilisation de méthodes multicritères spécifiques est réalisée dès le troisième niveau d'analyse dans lequel des critères qualitatifs sont également intégrés. Le troisième niveau intègre également la notion de préférence et de critères flous selon une méthode d'agrégation partielle, ce qui permet notamment de proposer différentes échelles d'appréciation.
- 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.

Après avoir détaillé les aspects techniques, la méthodologie a été mise en place au format MS-Excel (VBA), l'outil final étant disponible et gratuit pour tout utilisateur intéressé. L'application de cette méthode progressive permet en tout temps à l'utilisateur d'arrêter la procédure, mais également de vérifier la solidité de la solution par l'application d'une méthode additionnelle ainsi que par différentes analyses de sensibilité. Non seulement les émissions, l'énergie et les coûts sont pris en considération sur l'ensemble du cycle de vie, mais également les performances mécaniques de l'enrobé ainsi que des critères qualitatifs tels que la complexité du processus de fabrication et le potentiel de recyclabilité.

Un exemple concret d'application de la méthodologie a également été réalisé, avec la comparaison entre un enrobé tiède avec cire, un enrobé tiède avec ajout d'additif chimique (agent tensio-actif), un enrobé tiède avec moussage du bitume, un enrobé semi-tiède et un mélange de référence à chaud. Les résultats obtenus montrent notamment la bonne performance globale de l'enrobé tiède avec additif chimique. A l'opposé, l'enrobé avec ajout de cire s'avère être fortement pénalisé par la quantité importante d'additif dont l'impact sur le cycle de vie ne peut être totalement compensé par de bonnes performances mécaniques (orniérage notamment). Outre le classement des variantes qui est propre à cet exemple traité, la mise en application de la méthodologie

démontre la pertinence et l'apport d'un tel modèle dans l'aide à la décision pour le choix d'un type d'enrobé.

Le modèle s'avère finalement être un outil flexible et pertinent qui amène un support important pour l'aide à la décision. L'utilisation de ce modèle est également un important outil de promotion et dissémination des technologies à faibles impacts énergétiques et environnementaux en fournissant une évaluation globale technique et objective.

De nombreuses perspectives et pistes de développements du modèle peuvent être envisagées. On pourra citer :

- Flexibilité dans le nombre de critères et de variantes (5 variantes dans la version actuelle du modèle).
- Mise en place d'une procédure approfondie d'analyse de sensibilité permettant de définir un indice global de robustesse de la solution proposée (*i.e.* classement).
- Création d'une base de données de calculs (cases studies) ainsi que d'une base de données relatives aux performances mécaniques d'enrobés à faibles impacts énergétiques et écologiques.

La réalisation de ce projet a également mis en évidence différents défis pour le domaine de l'évaluation environnementale des matériaux de chaussée, parmi lesquels on peut relever :

- Mise à disposition de données de processus secondaires et procédés innovants, création de bases de données spécifiques au domaine de la construction routière. Pour cela, une coopération avec les acteurs industriels est indispensable.
- Etablissement de méthodes d'évaluation de la qualité et des incertitudes des données utilisées.
- Identification de méthodes de prise en compte et valorisation des matériaux recyclés dans les enrobés bitumineux. Intégration de la problématique relative au multi-recyclage.

Les différentes considérations ci-dessus relatives à l'évaluation environnementale des chaussées ainsi que le modèle multicritère d'aide à la décision constituent également un apport potentiel pour la normalisation. Ainsi, il pourrait être envisagé d'exploiter les enseignements relatifs au développement du modèle PLANET dans la perspective de création d'un guide ou outil (comparateur) pouvant être utilisé et reconnu par l'ensemble de la profession et assistant dans la comparaison de variantes.

Zusammenfassung

Das Projekt PLANET (Potentiel et Analyse des Enrobés Tièdes; Potential und Analyse von Niedertemperatur-Asphalten) hat als Hauptzweck, die Kenntnisse über diese ökologischen (Strassen-) Beläge zu verbessern. Dies erfordert eine Qualifizierung der mechanischen Eigenschaften, des wirtschaftlichen und energetischen Potentials, der arbeitsplatzhygienischen Aspekte sowie des Fabrikationsprozesses und der Qualitätskontrolle. Die Identifikation der Möglichkeiten und Einschränkungen müssten letztlich die bestmögliche Verwendung von Niedertemperaturasphalten in der Schweiz ermöglichen.

Die hier beschriebene Forschungsarbeit «EP-5: Umfassendes Auswertungsmodell» ist das Herz des Projekts PLANET, dessen Ziel, die Entwicklung und die Implementierung eines Mehrfachkriterien-Bewertungsmodells ist. Dieses Modell soll die Zuordnung verschiedener Technologien von Mischgütern auf Basis einer Serie von qualitativen und quantitativen Kriterien erlauben. Das entwickelte Modell muss schliesslich die Bestimmung der besten Mischgutvariante sowie die Quantifizierung der Stärke der vorgeschlagenen Lösung zur Unterstützung beim Entscheidungsprozess erlauben.

In einer ersten Phase wurde eine vertiefte Studie von ökologischen Bewertungsmodellen sowie von Entscheidungshilfen durchgeführt. Diese Studie bildet die Grundlage des PLANET-Modells unter Verwendung von Methoden zur Entscheidungshilfe, die ursprünglich nicht für das Gebiet des Strassenbaus gedacht waren.

Anschliessend wurde das PLANET-Entscheidungshilfemodell entwickelt. Dafür wurde eine Kombination unterschiedlicher Methoden ausgewählt, um eine stufenweise Auswertung auf vier Analyseebenen vorzuschlagen. Die Besonderheiten und spezifischen Beiträge dieser Ebenen sind:

- In den zwei ersten Ebenen wird eine graphische Analyse nach Pareto und eine Radar-Stapeldiagramm-Methode verwendet, um einerseits dominante Einheitsverfahren zu identifizieren und andererseits die etwaige komplette Höherstufung von Varianten zum Vorschein zu bringen. Diese ersten beiden Stufen betrachten nur quantitative Kriterien.
- Ab der dritten Stufe werden spezifische Mehrfachkriterien-Methoden genutzt. In dieser Stufe sind auch qualitative Kriterien mit einbezogen. Sie integriert ebenfalls die Begriffe von Vorzug und verschwommenen Kriterien durch eine partielle Aggregationsmethode. Dies erlaubt unter anderem, verschiedene Beurteilungsskalen vorzuschlagen.
- Die vierte Analyseebene beinhaltet eine komplette Aggregationsmethode basierend auf einem Algorithmus der Evidenztheorie die durch eine innovative Art die Unsicherheit sowie die Unbekannten der Datenbank berücksichtigt.

Nach der Detaillierung der technischen Aspekte wurde die Methodik in MS-Excel Format (VBA) ausgeführt. Das entstandene Instrument ist verfügbar und kostenlos für jeden interessierten Nutzer. Die Anwendung dieser schrittweisen Methode ermöglicht nicht nur, den Prozess zu jeder Zeit anzuhalten, sondern auch die Solidität der Lösung durch die Anwendung einer weiteren Methode sowie durch verschiedenen Sensitivitätsanalysen zu überprüfen. Während des ganzen Lebenszyklus werden nicht nur Emissionen, Energie und Kosten in Betracht gezogen, sondern auch die mechanischen Leistungen der Mischgüter sowie qualitative Kriterien wie Komplexität des Fabrikationsprozesses und Rezyklierbarkeit.

Ein konkretes Beispiel der Anwendung der Methode wurde ebenfalls ausgeführt mit einem Vergleich zwischen einem Niedertemperaturasphalt mit Wachs, einem mit chemischen Zusatzstoffen (Tensiden), einem mit Schaumbitumen, einem lauwarmen Asphalt (< 100 °C) und einem heissen Referenzmischgut. Die erzielten Resultate zeigen eine global gute Leistung der Niedertemperaturasphalte mit chemischen Zusatzstoffen. Hingegen zeigt sich das Mischgut mit Wachszusatz stark pönalisiert durch die grosse erforderliche Menge von Zusatzstoffen, deren Auswirkung auf den Lebenszyklus nicht

durch eine gute mechanische Leistung ausgleichen werden kann (insbesondere Spurrinnen). Neben der Klassifikation der Varianten, die diesem Beispiel eigen ist, zeigt die Umsetzung der Methodik die Relevanz und die Vorteile einer solchen Methode bei der Entscheidungshilfe für die Wahl des Mischguttyps.

Das Modell stellt sich als flexibles, relevantes und leistungsfähiges Instrument zur Unterstützung bei der Entscheidungsfindung heraus. Der Gebrauch dieses Modelles ist ebenfalls ein wichtiges Instrument der Förderung und Wissensverbreitung von Technologien mit geringen energetischen und ökologischen Auswirkungen mittels globaler technischer und objektiver Auswertung.

Für die Weiterentwicklung des Modelles gibt es viele Perspektiven und Möglichkeiten, so z.B.:

- Flexibilität in der Anzahl an Kriterien und Varianten (5 Varianten in der aktuellen Version des Modells).
- Umsetzung eines vertieften Verfahrens der Sensibilitätsanalyse, um einen Globalindex der Robustheit der vorgeschlagenen Lösung definieren zu können (d.h. Einstufung).
- Gründung einer Datenbank aus Berechnungen (Case Studies) sowie einer Datenbank bezüglich der mechanischen Leistungen der Mischgüter mit geringen ökologischen und energetischen Auswirkungen.

Die Durchführung dieses Projekts hat auch verschiedene Herausforderungen im Bereich der ökologischen Bewertung von Strassenbaumaterialien verdeutlicht, von denen die nachfolgenden erwähnt seien:

- Bereitstellung von Daten aus sekundären und innovativen Verfahren, Schaffung von spezifischen Datenbanken im Bereich des Strassenbaus. Dafür ist eine Zusammenarbeit mit den industriellen Akteuren notwendig.
- Einrichtung von Bewertungsmethoden von Qualität und Unsicherheiten der benutzten Datenbank.
- Kennzeichnung der berücksichtigten Methoden und der Verwertung von Recyclingasphalt im Mischgut. Integrierung der Problematik in Bezug auf Mehrfach-Recycling.

Die vorstehend unterschiedlichen genannten Überlegungen betreffend ökologischer Bewertung von Mischgüter sowie die Mehrfachkriterien-Entscheidungshilfemethode bilden auch einen potentiellen Beitrag für die Normierung. So könnte die Möglichkeit in Betracht gezogen werden, die Erkenntnisse aus der PLANET-Modellentwicklung zur Schaffung eines Leitfadens oder Werkzeugs (Vergleichssystem) zu nutzen, das von der Berufswelt benutzt und anerkannt wird und als Hilfe zum Variantenvergleich dient.

Summary

The principal objective of the PLANET project (Potential and analysis of warm mix asphalts) is to provide a better understanding in the domain of asphalt mixtures with low energy and environmental impacts. In order to do this, it is necessary to quantify the different aspects regarding the mechanical performance, energetic and economical potentials, occupational hygiene as well as the production and the quality control. Identification of potentials and limitations should eventually leads to endorsement of a best practice regarding the warm mix asphalt technology in Switzerland.

The present research "WP-5: Global model of evaluation" is the main part of the PLANET project, and its objective is the development and implementation of a multi-criteria evaluation model on order to classify different technologies of bituminous mixtures based on a series of qualitative and quantitative criteria. The developed model should finally allow to identify the best variant of the mixture as well as to quantify the strength of the proposed solution for assisting in the decision making process.

Initially, a profound study of the environmental evaluation methods as well as the help to the decision making has been conducted. This study is the basis of the PLANET model with the selection of methods to help with the decisions which were not originally intended for the field of pavement materials.

The PLANET model of help in decision making has afterwards been developed. It has been chosen to combine different methods in order to propose a progressive evaluation in four level of analysis, each with its specific features and contributions:

- In the two primary levels, a graphical analysis based on the Pareto model and the establishment of radar charts allows to identify the dominant unit process while highlighting the potential outranking of the alternatives. These two primary levels take only the quantitative criteria into account.
- The utilisation of the specific multi-criteria methods has been applied on the third level of the analysis in which the qualitative criteria are equally integrated. The third level also incorporates the concept of preference and the unclear criteria in a partial aggregation method, allowing especially to propose different scales of assessment.
- In the fourth level of the analysis, a method of complete aggregation based on an algorithm derived from the Evidence theory considers the uncertainty and the unknowns of the database in an innovative manner.

After thoroughly investigating the technical aspects, the methodology has been established in a MS-Excel (VBA) format. The program is accessible and free of charge for all of the interested users. The application of this progressive method allows the user to stop the process at any time and at the same time to verify the stability of the solution by the application of an additional method and application of different sensitivity analysis. Not only the emissions, energy and the costs are taken into consideration on a life cycle point of view but also the mechanical performance of the mixture as well as the qualitative criteria such as complexity of the process of production and the recyclability potential has been taken into account.

A practical example of the application of the methodology has also been performed with a comparison between the warm mixtures with wax, a warm mixture with addition of chemical additive (surface active chemicals), a warm mixture with foamed bitumen, a semi-warm mixture and a reference hot mix asphalt. The obtained results showed especially the good global performance of the warm mix asphalt with the chemical additive. In contrast, the mixture with the addition of the wax proves to be strongly penalized by the significant amount of additives whose impacts on the life cycle cannot be well compensated by their good performances (especially rutting). In addition to the ranking of the alternatives which is specific to this example, the implementation of the methodology demonstrates the relevance and contribution of such a model in decision support for choosing a type mixture.

The model ultimately proves to be a flexible and effective tool that brings an important support for the decision making. The utilisation of this model is also an important tool for promoting and disseminate of low energy and environmental impacts technologies by providing technical and objective overall evaluation.

Different perspectives and developments tracks of the model can be considered which can be mentioned as follows:

- Flexibility in the different criteria and alternatives (5 alternatives in the actual version of the model).
- Implementation of a thorough analysis of the sensitivity in order to define a global index of robustness of the proposed solution (i.e. ranking).
- Creation of a calculation database (case studies) and also a database related to the mechanical performance of the mixtures with low energy and environmental impacts.

The implementation of this project has also identified different challenges in the domain of the environmental assessment of the pavement materials, among which we can address:

- Providing secondary process data and innovative processes, creation of a specific database in the pavement construction field. For this reason a cooperation with industry partners is essential.
- Establishment of quality evaluation methods and uncertainties of the input data.
- Identification of the method of consideration and utilizing the recycled materials in the asphalt mixtures. Integration of the problems related to multi-recycling.

Different aforementioned considerations regarding to the environmental assessment of the pavement as well as the multi-criteria model of decision support are also a potential contribution to standardization. Moreover, it might be possible to use the findings regarding to the development of the PLANET model in the perspective of creation of a guideline or a tool (comparator) which can be used and recognised by the professionals and can help in the comparison of the alternatives.

1 Introduction

1.1 Contexte – paquet de recherche PLANET

Le paquet de recherche PLANET, dont l'acronyme signifie "Potentiel et ANalyse des Enrobés Tièdes" est un vaste paquet de recherches lancé par l'Office Fédéral des Routes, sur recommandation de la VSS. Les bases du projet ont été définies et détaillées dans le cadre du projet initial relatif aux enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques [3]. Outre le descriptif détaillé du paquet de recherches, ce projet initial contient également un descriptif exhaustif des enrobés tièdes que l'on pourra consulter pour de plus amples détails relatifs à ces technologies.

L'organigramme général du paquet de recherche PLANET est présenté dans la Figure 1 où l'on peut voir les différentes interactions entre les recherches spécifiques (RS), chacune pouvant être menée de manière indépendante. Comme le montre la figure ci-dessous, la recherche RS-5 se situe au cœur du projet PLANET, ceci car la méthodologie mise en place doit permettre de prendre en compte les résultats principaux fournis par l'ensemble des recherches spécifiques du projet. Il est donc attendu l'intégration d'aspects relatifs à la consommation d'énergie, aux émissions, à la complexité de fabrication au poste d'enrobage, mais également des aspects relatifs au comportement mécanique et à la durée de vie des matériaux. Nous pouvons relever que les données fournies par les autres recherches ont pour objet d'aider dans la validation du modèle, le développement de son architecture pouvant être réalisé de manière totalement indépendante.

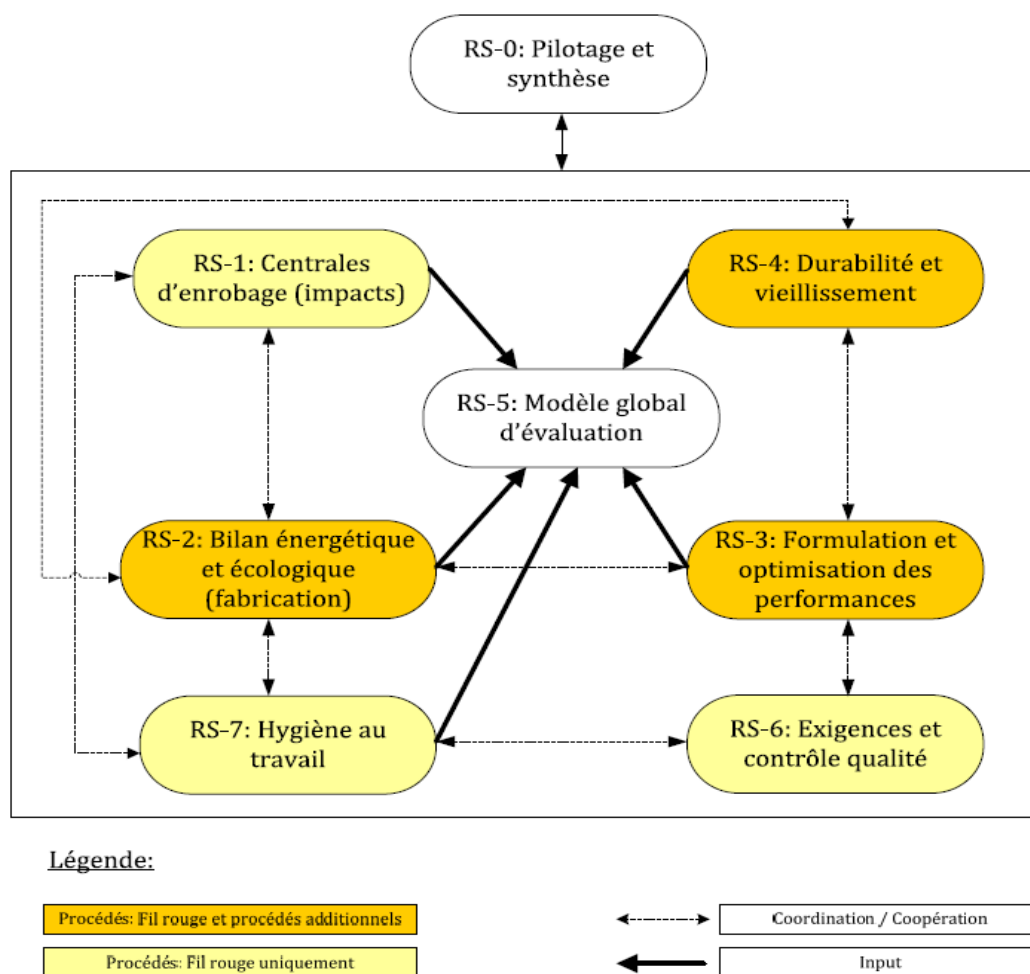


Fig. 1 Organigramme paquet de recherche PLANET [3]

La réalisation du paquet de recherche PLANET doit finalement permettre de:

- Fournir un bilan exhaustif sur l'expérience avec les enrobés tièdes et analyser de manière détaillée certains aspects jugés déterminants conformément au projet initial [3].
- Identifier les avantages et inconvénients des enrobés tièdes.
- Mettre en évidence les domaines d'utilisation recommandés pour ces enrobés.
- Fournir un apport substantiel à la normalisation, ceci afin de promouvoir la bonne pratique avec cette famille d'enrobés bitumineux.

1.2 Objectifs et contenu de la recherche

Comme illustré dans [3] ainsi que dans les autres recherches spécifiques du présent paquet de recherches, il existe différents principes pour la fabrication des enrobés tièdes (voir rappel au chapitre 1.3); de multiples procédés ou produits d'entreprise appliquant au moins un de ces principes. Etant donné la multiplicité des alternatives existantes afin de produire des enrobés tièdes, le choix d'une technologie peut s'avérer relativement complexe. Les techniques permettant de fabriquer des enrobés tièdes ne sont en effet pas toujours comparables du point de vue des aspects énergétiques, environnementaux ou performantiels. De plus, l'expérience acquise avec cette technologie ou les éventuelles modifications à effectuer au poste d'enrobage seront autant de critères que le maître d'œuvre et/ou l'entreprise pourront vouloir considérer dans leur processus de décision. Il est donc indispensable de posséder un outil permettant d'évaluer différents produits et assister dans le processus de décision quant au choix de la technologie d'enrobé.

La recherche spécifique RS-5 a pour objectif principal le développement et la validation d'un modèle d'évaluation multicritère permettant de qualifier et classer différentes technologies d'enrobés bitumineux. Ce modèle, appelé par la suite "modèle PLANET", devra permettre de définir quel est la variante d'enrobé tiède préférée et dans quelle mesure cette variante est davantage performante que les autres alternatives proposées.

Relevons ici que le modèle sera donc focalisé sur les enrobés bitumineux, un développement avec prise en compte du béton de ciment étant réalisable sur la base de la même méthodologie

La figure 2 propose une vue générale du contenu de cette recherche, les différentes étapes étant détaillées dans la suite du présent chapitre.



Fig. 2 Vue générale RS-5

De manière globale, la démarche proposée dans cette recherche spécifique est innovante dans le sens où elle propose de combiner non seulement les aspects énergétiques et environnementaux, mais également des données économiques ainsi que les performances du produit ou autres critères qualitatifs. Pour cela, le développement d'une méthodologie d'évaluation adaptée est nécessaire.

Mise à jour des connaissances (Chap. 2)

Dans une première phase de la recherche, une analyse critique des connaissances actuelle est requise. Cette analyse comprendra en particulier les aspects liés à l'étude du cycle de vie et autres méthodes d'analyse environnementale, mais également l'expérience existante dans le domaine spécifique de la construction routière. Sur la base des enseignements de cette première partie, il est particulièrement attendu la définition de la méthode d'analyse environnementale retenue, ainsi que le choix des composants qui seront analysés dans la suite du projet.

Développement de la méthodologie (Chap. 3)

La définition de la méthodologie pour l'élaboration d'une méthode d'analyse multicritères est l'étape clé de cette recherche. C'est pourquoi, après une première phase relative aux sources de données utilisées, le choix des critères sera discuté avant de procéder à une évaluation exhaustive des méthodes multicritères permettant de mettre en place une méthodologie cohérente et consistante.

Comme mentionné, le modèle multicritère à développer considère l'ensemble du cycle de vie de la chaussée. A cet effet, des indicateurs (critères) relatifs aux émissions, consommation énergétique et aspects économiques est notamment attendue. LA prise en compte des performances mécaniques des enrobés ainsi que l'éventuel ajout de critères qualitatifs sera également étudiée. Il existe de nombreuses méthodes multicritères d'aide à la décision pour lesquelles une analyse sera menée, ceci afin de mieux comprendre l'apport de chacune de ces méthodes ainsi que leurs particularités. Il est en effet indispensable d'analyser et évaluer la compatibilité de ces différentes

méthodes avec les objectifs de la recherche, ceci afin de pouvoir finalement proposer un modèle qui soit adapté au mieux.

Réalisation du modèle (Chap. 1)

Une fois les différents indicateurs et hypothèses de base définis et la méthodologie détaillée, le modèle devra alors être réalisé de manière concrète. Différentes variantes pourrons être envisagée, le tout devant être réalisé dans un système relativement souple pouvant aisément être modifié. La méthodologie implémentée devra par ailleurs être rendue disponible à toute personne intéressée.

Validation du modèle (Chap. 5)

La phase de validation du modèle préalablement développé est indispensable avant de pouvoir envisager une mise en application à plus large échelle. Cette validation (étude de cas) nécessitera dans un premier temps la définition des cas étudiés ainsi que le recueil des données relatives, ceci avant la mise en application de la méthodologie préalablement décrite et implémentée. Une analyse de sensibilité des résultats obtenus est également attendue.

Conclusions et recommandations (Chap. 1)

Des conclusions relatives à l'utilisation du modèle d'aide à la décision dans une procédure d'évaluation des enrobés tièdes sont attendues. De même, des réflexions relatives à la prise en compte d'une évaluation multicritère de matériaux au sein d'un processus d'appel d'offre sont attendues, de même que l'identification des éventuels apports pour la normalisation.

Remarque:

Une partie des résultats présentés dans la suite de ce rapport sont issues du travail de thèse de Nicolas Bueche, thèse EPFL N° 5169 "Evaluation des performances et des impacts des enrobés bitumineux tièdes" (2011) [2]. Pour des informations davantage détaillées, on pourra suggérer le rapport de thèse, téléchargeable gratuitement sur le site <http://library.epfl.ch/theses>.

1.3 Les enrobés tièdes

Nous proposons ici un très bref descriptif relatif aux enrobés tièdes. On pourra suggérer de consulter les références [3, 4] pour davantage d'informations.

De manière générale, nous pouvons définir 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) qui se situe habituellement entre 150 et 180 °C selon le grade de bitume utilisé. La température de pose et compactage des enrobés à chaud est habituellement compris entre 130 et 160 °C.

Nous comprendrons sous la dénomination d'« enrobés à faibles impacts » les enrobés tièdes (Warm Mix Asphalt - WMA, Niedertemperaturasphalt - NTA), les enrobés 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, Kaltmischgut). Notons que d'autres dénominations peuvent être utilisées, telle que par exemple « enrobé tiédi » en lieu et place d'enrobé tiède. Ces différents enrobés (tièdes, froids) ont pour objectif d'abaisser la température d'enrobage, tout en conservant une maniabilité suffisante pour la mise en œuvre et le compactage. Le principe de base consiste donc à 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 et ceci tout en garantissant un comportement mécanique et une durée de vie satisfaisant aux exigences.

Différentes méthodes de classification des enrobés tièdes peuvent exister, par exemple selon la température de fabrication, la consommation énergétique ou encore les émissions. En Europe, il est fréquemment admis qu'un enrobé est « tiède » lorsque sa température de production est au moins 20 °C inférieure à celle d'un enrobé à chaud. Un exemple de classification des enrobés est donné dans la figure 3, cette figure indiquant les ordres de grandeur de consommation de fioul et d'émissions de CO₂ en fonction du type d'enrobé.

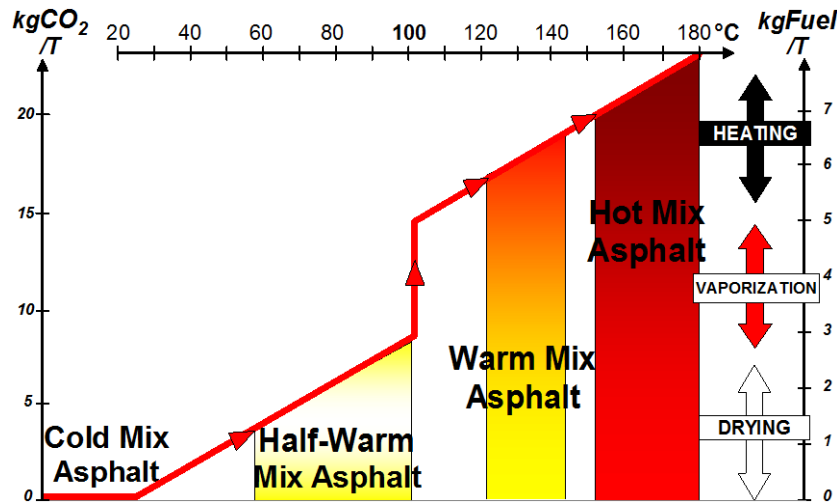


Fig. 3 Classification des différents types d'enrobés tièdes (Source : LEA-Co, Eiffage T. P.)

Sur la base de la température de fabrication, nous pouvons proposer la classification suivante :

- 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

Nous pouvons également observer l'importante différence de consommation énergétique (et des émissions) entre les enrobés tièdes et semi-tièdes. Le passage du palier de température de 100 °C est en effet crucial d'un point de vue énergétique, la chaleur latente de vaporisation de l'eau étant très élevée comparativement à la chaleur massique de l'eau.

Le postulat de base des enrobés tièdes consiste à abaisser la température de fabrication ceci afin de diminuer la consommation d'énergie et (si possible) la charge environnementale. La température étant moins élevée, il est cependant indispensable de garantir une faible viscosité pour une bonne diffusion du bitume (enrobage suffisant) et une bonne maniabilité du mélange. Différents procédés permettent 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 une classification issue de [3, 4] :

- 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. Pour chaque procédé mentionné, différents produits existent. Une liste non-exhaustive de produits peut être trouvée dans [4] ainsi que dans [6].

De manière générale, les enrobés tièdes ont pour objectif de proposer une alternative aux enrobés à chaud, ce qui demande alors des performances au moins équivalentes à celles des mélanges à chaud.

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 cependant un domaine d'application différent, les enrobés à froid présentant des caractéristiques et performances mécaniques généralement moins élevées que celles d'un enrobé à chaud traditionnel.

2 Evaluation environnementale

Comme mentionné en introduction, la méthodologie globale d'évaluation devra prendre en compte de manière prioritaire les aspects énergétiques et environnementaux. Pour cela, avant le développement de la méthodologie, il est nécessaire de proposer un survol des aspects déterminants relatifs à l'évaluation environnementale. Il sera discuté:

- Définitions et concepts de base de l'analyse et inventaire du cycle de vie (chapitre 2.1).
- Survol d'autres méthodes d'analyse environnementale pouvant également être utilisées (chapitre 2.2).
- Aspects normatifs et références internationales (chapitre 2.3).
- Exemples de mises en application des évaluations environnementales dans le contexte de la construction routière (chapitre 2.4).
- Eléments relatifs au choix d'une méthode d'analyse environnementale dans le cadre du projet PLANET (chapitre 2.5).
- Choix des émissions considérées pour le modèle PLANET (chapitre 2.6).

Ainsi, les différents éléments discutés dans ce chapitre permettront de constituer les bases en vue du développement de la méthodologie multicritère d'évaluation qui sera discutée au chapitre suivant.

2.1 Analyse et inventaire du cycle de vie

L'analyse du cycle de vie ACV (appelée également 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 car plus facile à quantifier, 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 la procédure d'inventaire du cycle de vie (ICV ou Life Cycle Inventory LCI) [5].

Trois organisations œuvrent principalement dans le développement des ACV soit l'Organisation Internationale de la Normalisation (ISO), la Société de Toxicologie et de Chimie Environnementale (SETAC) ainsi que le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE). Le SETAC est une association regroupant des universitaires et des industriels et 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 finalement 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 [6].

De manière générale, une analyse du cycle de vie peut avoir différents objectifs, l'aide à la décision constituant l'objectif dans le cadre de la présente étude:

- 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.
- ...

De manière plus détaillée, l'analyse du cycle de vie (ACV) qui est 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 d'une ACV est itératif, ceci car chaque étape peut amener à revoir les résultats de l'étape précédente. Il est utile de relever que l'analyse du cycle de vie ne comprend pas seulement une liste et analyse des émissions, mais également une évaluation complète des impacts environnementaux. Les quatre phases principales d'une ACV sont détaillées dans la figure 4, les différentes phases étant détaillées dans la suite du chapitre.

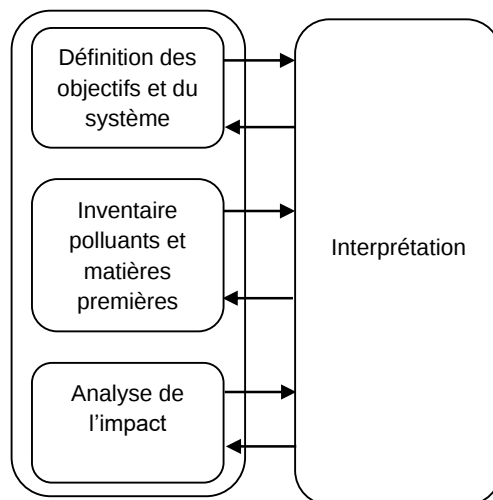


Fig. 4 Définition des phases d'une Analyse du cycle de vie (selon ISO et SETAC)

2.1.1 Définition des objectifs et du système

La phase de "définition des objectifs et du système" doit fixer les bases de l'analyse. Dans cette phase, on définira notamment l'unité fonctionnelle (unité de référence) ainsi que les limites du système, deux paramètres pouvant sensiblement influencer les résultats finaux de l'analyse.

2.1.2 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 [5], un inventaire complet peut prendre en compte plusieurs centaines de substances et le recueil des données peut dans ce cas s'avérer fastidieux. Pour cela, le recours à des bases de données est souvent indispensable. Cette phase d'inventaire est, sur le principe, totalement objective.

2.1.3 Analyse de l'impact

L'analyse de l'impact environnemental consiste à interpréter les données d'inventaire pour les relier à leur(s) impact(s) 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'impacts (par exemple le NO_x qui a un effet sur l'acidification ainsi que l'eutrophisation).

Des méthodes d'analyse de l'impact doivent donc être utilisées afin de dériver des indicateurs environnementaux (catégories de dommage). 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, dommages qui concernent alors les 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 ci-dessous. Comme nous le verrons dans la suite, ces structures peuvent différer quelque peu selon les méthodes appliquées.

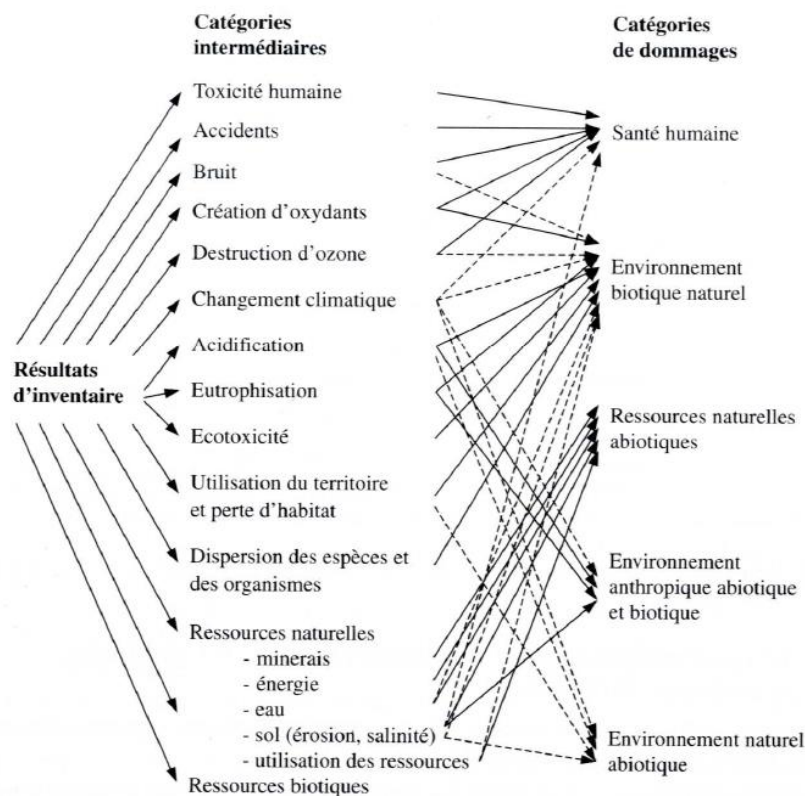


Fig. 5 Exemple de structure pour l'établissement des catégories de dommages [5]

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. Ainsi, on pourra globalement distinguer deux types d'approches:

- 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 multiples méthodes d'analyse d'impacts, aucune ne faisant office de référence universelle à ce jour. Pour cela, il peut être recommandé d'appliquer différentes méthodes en parallèle. De manière non-exhaustive, nous pouvons citer les méthodes ci-dessous, le livre [5] pouvant être consulté pour davantage de détails:

- TRACI (Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts): Développée pour une application dans un contexte américain par l'Agence pour la Protection de l'Environnement américaine, cette méthode s'arrête aux catégories intermédiaires.
- Méthode des volumes critiques: cette méthode 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 cependant de

différents défauts (persistance, dégradation, dilution des polluants pas pris en compte, on suppose un seul polluant par volume,...) selon [5].

- Ecofacteurs 97 et '06 : Méthode consistant à comparer 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 dans l'unité UBP (Umweltbelastungspunkte), où 1012 UBP représentent le flux critique d'un polluant pendant une année.
- Méthode EPS (Environmental Priority Strategies in Product Design) : Méthode développée initialement en 1989 lors d'une collaboration entre Volvo et l'Institut de Recherche Environnementale suédois (IVL). Elle utilise une approche de monétarisation (willingness to pay – volonté de payer) des 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) [7].
- 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 est dite "top-down" car elle consiste à partir des dommages pour remonter aux émissions de l'inventaire.
- IMPACT2002+ est l'une des méthodes les plus couramment appliquées. Cette méthode a été développée sous la supervision du Professeur O. Joliet (EPFL puis Université de Michigan) et elle 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). Cette 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 propose également des concepts pour l'évaluation de la toxicité humaine et de l'écotoxicité et suggère une adaptation des méthodes existantes pour les autres catégories [8].

Devant la complexité de cette troisième phase relative à l'analyse de l'impact environnemental, certains auteurs proposent de comparer les résultats des différents scénarios sur la base du seul inventaire des polluants.

2.1.4 Interprétation

La phase d'interprétation se fait à chaque niveau de l'analyse du cycle de vie et elle rend donc l'ensemble du processus itératif. Cette phase 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 menées.

Une première approximation de l'interprétation de l'analyse du cycle de vie peut généralement 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. Pour des informations davantage détaillées, on pourra notamment recommander la plateforme de la Commission Européenne sur l'analyse du cycle de vie (<http://eplca.jrc.ec.europa.eu/>) qui contient de multiples informations relatives à l'ACV et documents/guides de référence ainsi que des sites spécialisés parmi lesquels on peut mentionner la plateforme pour l'analyse du cycle de vie (<http://www.avnir.org>). Dans [7], les auteurs proposent également de nombreux logiciels ACV contenant des bases de données d'inventaire du cycle de vie. Nous pouvons finalement relever, de manière non exhaustive, les outils suivants utilisés pour les ACV dans différents domaines:

- **BEES®** : BEES (Building for Environmental and Economic Sustainability) est un logiciel ACV/ACC largement utilisé dans le domaine des produits de construction. Il a été développé par le NIST (National Institute of Standards and Technology) aux États-Unis et contient plus de 200 produits dans sa version 3.0. Le logiciel applique 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,...).

On parlera finalement d'empreinte carbone (carbon footprint) pour représenter la quantité de CO₂ et autres gaz à effet de serre (GES) associés à un produit, un bien ou un service. Cette empreinte est déterminée en effectuant un inventaire du cycle de vie limité aux émissions ayant un impact sur le changement climatique.

Par définition, une analyse du cycle de vie se concentre sur les aspects environnementaux. 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 que pour le 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. Une analyse coûts-bénéfices sera souvent menée pour un des processus unitaires du cycle de vie, par exemple la fabrication des enrobés au poste d'enrobage comme discuté dans le rapport [10] relatif à la RS-1 du présent projet PLANET.

La comparaison des coûts et des impacts environnementaux peut finalement se faire selon différentes méthodes. Par exemple, 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.

2.2 Autres méthodes d'analyse environnementale

L'analyse (ou inventaire) du cycle de vie (est un des instruments à disposition pour une évaluation environnementale; les principaux principes ayant été exposés précédemment. En plus de l'ACV/ICV, de nombreux instruments permettant de réaliser une analyse environnementale peuvent être utilisés dans le cadre d'un processus de décision parmi lesquels on pourra citer les méthodes conceptuelles (eco-conception, métabolisme industriel) ainsi que les procédures (système de management environnemental, ecolabel, audit environnemental, etc).

Le Tab. 1 illustre différentes méthodes d'analyse environnementale à disposition soit 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.) avec pour chacun ses principales caractéristiques.

Tab. 1 Comparatifs de quelques outils d'analyse environnementale

Outil	Objet traité	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
GEScalc	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 (autre que ACV/ICV) 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 (voir [11] pour plus d'informations).

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. On pourra citer:

- Les méthodes hybrides se focalisant sur certains processus unitaires spécifiques.
- La méthode "Economic Input-Output model (EIO-LCA)" qui est basée sur des transactions monétaires inter-industries ou des données économiques (input-output). Dans cette méthode, les différentes relations industrielles sont modélisées sous la forme de matrice. Dans [12], les auteurs proposent une comparaison détaillée entre la méthode EIO-LCA et la méthode traditionnelle (ISO). Ils effectuent également un exemple de calcul dans lequel les méthodes aboutissent à des résultats finaux comparables, mais avec cependant des différences conséquentes entre les méthodes empêchant une comparaison directe.

2.3 Normalisation et organisations internationales

La prise en compte des notions environnementales et plus spécifiquement de l'analyse du cycle de vie est traitée dans au niveau de la législation que de la normalisation (internationale, nationale). Nous proposons ici une vue de quelques aspects jugés pertinents.

L'ISO (organisation internationale de normalisation) a publié (à ce jour) plus de 350 normes traitant des aspects environnementaux. Parmi ces publications, les normes 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 réglementée 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 relativement générale et peut alors servir de base à des documents plus détaillés (normes nationales). Les différentes méthodes d'évaluation des impacts proposées respectent généralement ces exigences et lignes directrices ISO.

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 Etats 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). Comme discuté précédemment dans ce rapport, la Commission Européenne a par ailleurs 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.

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 notamment 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 vulgarisés dans [11].

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. Nous pouvons par exemple mentionner la série de normes SN 641 800 [4] relative à "l'évaluation des projets d'infrastructure routière du point de vue du développement durable". Par ailleurs, des commissions d'experts spécifiques traitent de la problématique de l'énergie, des écobilans et des impacts du changement climatiques.

Nous pouvons finalement relever que de nombreuses conférences et projets sont actuellement consacrés à l'analyse du cycle de vie. Dans le domaine des chaussées routières, on peut citer un workshop de l'Université de Californie (2010), spécialement dédié au cycle de vie des chaussées lors duquel des lignes directrices pour une réalisation harmonisée d'analyses du cycle de vie ont été esquissées et les lacunes en termes de connaissances spécifiques à la route discutées [13].

2.4 Application aux projets routiers

Après avoir discuté des différents outils permettant de réaliser une analyse environnementale ainsi que leurs principes généraux, nous proposons maintenant d'étudier les expériences spécifiques relatives au domaine des infrastructures routières. Après une vue synthétique générale, quelques exemples particuliers sont discutés afin de mieux évaluer les méthodes et outils généralement appliqués.

2.4.1 Analyse du cycle de vie

Les premières ACV étaient initialement concentrées 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 [14]. 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 Tab. 2, repris des travaux de Bueche [4], contient une liste non –exhaustive d'études

jugées comme représentatives au sujet de l'évaluation environnementale des infrastructures routières.

Tab. 2 Exemples d'études environnementales dans le domaine routier

Auteur [Ref]	Objectif recherche	Unité fonctionnelle	Limites système	Type données	Impacts-résultats	Commentaires
Stripple [15]	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 [16]	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. [17]	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 [18]	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 [19]	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. [20]	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 [21]	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. [22]	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. [23]	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 [13]	Energie, émissions (air-eau), ressources nat., déchets solides	Cas spécifique avec mesure à la centrale et lors de la pose

Meil [24]	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 [25]	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 [26]	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. [27]	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, Hendrickson [28]	ICV pour comparaison entre chaussée rigide et souple	1 km de route, autoroute USA	Extraction matériaux, construction	Données littérature et agence gouv. (USA)	Emission réparties en catégories de dommages	Prise en compte des coûts, méthode EIO-LCA
Weiland et Muench [29]	Comparaison de 3 options de reconstruction (Washington)	1 voie, 1 mile, 12 ft largeur, 50 ans	Enlèvement chaussée existante et reconstruction	Agence gouv. (USA), littérature, modèles	Impacts selon TRACI (5 cat.)	Pas d'évaluation des coûts, trafic pas considéré
Blomberg, Boussad et al. [30]	Eco-profile 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 [13]	Energie et émissions (air-eau-sol) par kg de bitume	Hypothèses distillation directe, provenance du pétrole, localisation et taille raffinerie
Nikkonen [31]	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 représentatives de chaussées routières ont été effectuées dans la seconde moitié des années '90. On peut par exemple trouver des publications intéressantes lors du congrès Eurasphalt & Eurobitume de 1996. Par exemple, [17] effectue 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 d'évaluation. Les auteurs ne proposent pas d'analyse écologique étant donné le manque d'éléments et d'expérience.

La recherche [16], financée par l'industrie du ciment nordique, propose une analyse du cycle de vie et quantification des impacts environnementaux de chaussées en béton et bitumineuses. Les résultats obtenus pour les deux types de chaussées sont proches, la principale différence se situant au niveau des substances nocives dominantes. L'auteur relève 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. Toujours selon les mêmes auteurs, ces impacts restent cependant faibles 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 [32], sur 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 relativement exhaustive et pouvant encore aujourd'hui être considérée comme une source de référence. Dans [15], le même auteur effectue une analyse complète d'une route sur l'ensemble de son cycle de vie, étude qui fait suite au premier projet [32]. Ce projet exhaustif 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 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 [32]. 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) soit une différence de 17%. La majeure partie de cette énergie consommée provient de l'exploitation (énergie électrique pour lumières et panneaux) comme repris dans la figure 6. 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 selon la figure 7 (trafic non considéré).

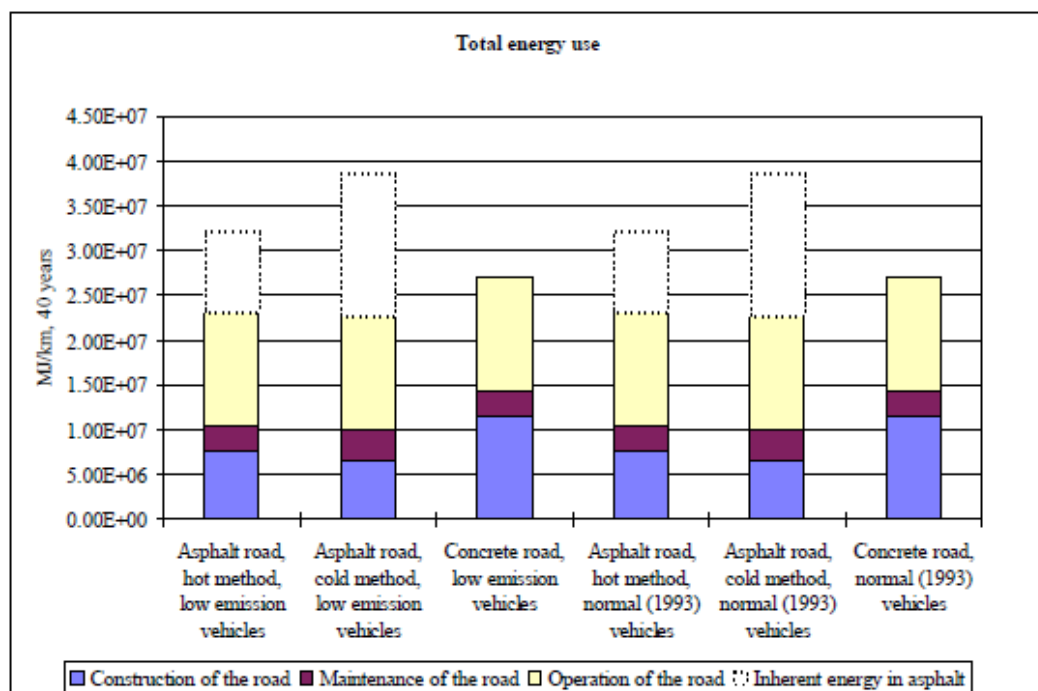


Fig. 6 Consommation totale d'énergie pour différents types de chaussées et engins de construction (1 km, 40 ans) [15]

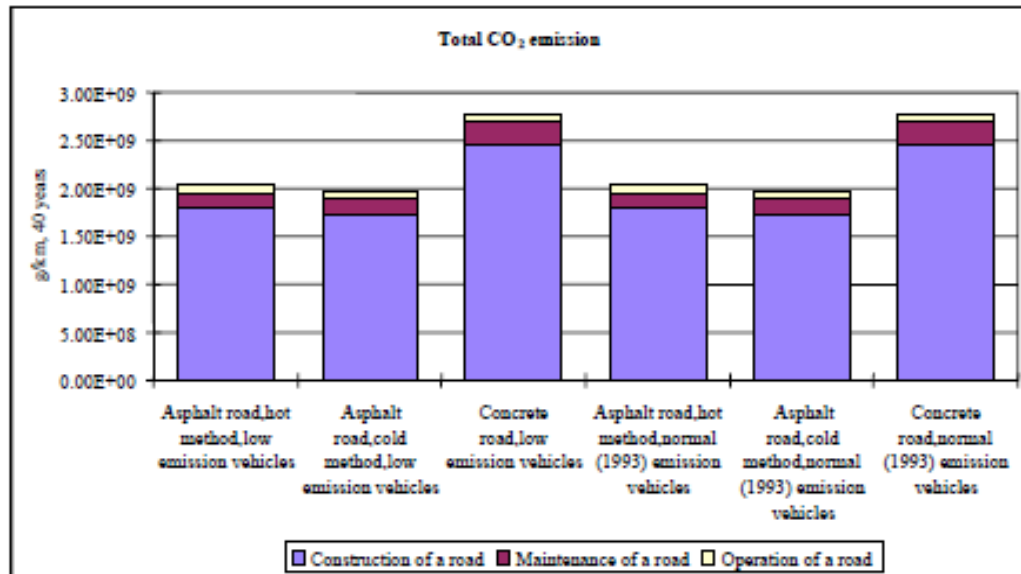


Fig. 7 Emissions de CO₂ pour différents types de chaussées et engins de construction (1 km, 40 ans) [15]

En plus des études détaillées ci-dessus et pour lesquelles les données utilisées revêtent un intérêt particulier, différents auteurs proposent les résultats d'analyse environnementale de chaussées routières. Nous pouvons relever les travaux suivants:

- 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 [21]. 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 représentant environ 5.7 – 6.3% de l'énergie et le reste peut être attribué à la pose des enrobés.
- Dans la recherche [22], les auteurs proposent une méthode pour l'inventaire sur le cycle de vie dans un cas spécifique finlandais. 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 également la précision des calculs ainsi que la différenciation entre les produits.
- Dans les travaux de Bilal et Chappat ([19], repris dans [33]), les auteurs proposent 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 gaz à effet de serre. Sur la durée de vie de 30 ans, la consommation d'énergie et les 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 a par ailleurs constitué une des bases à l'origine de l'Ecologiciel® Colas.
- Le rapport [20], réalisé par CIMBéton (Centre d'information sur le ciment et ses applications), propose une analyse comparative entre différents types de chaussées (béton et bitumineuses). Les impacts sont évalués sous la forme de douze indicateurs environnementaux. Un comparatif entre les indicateurs pour structures en béton et bitumineuses montre, selon ses auteurs, 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 8). Cette recherche illustre également que les impacts sur le cycle de vie complet liés aux phases de construction, entretien et fin de vie sont relativement faibles comparativement aux impacts de la circulation.

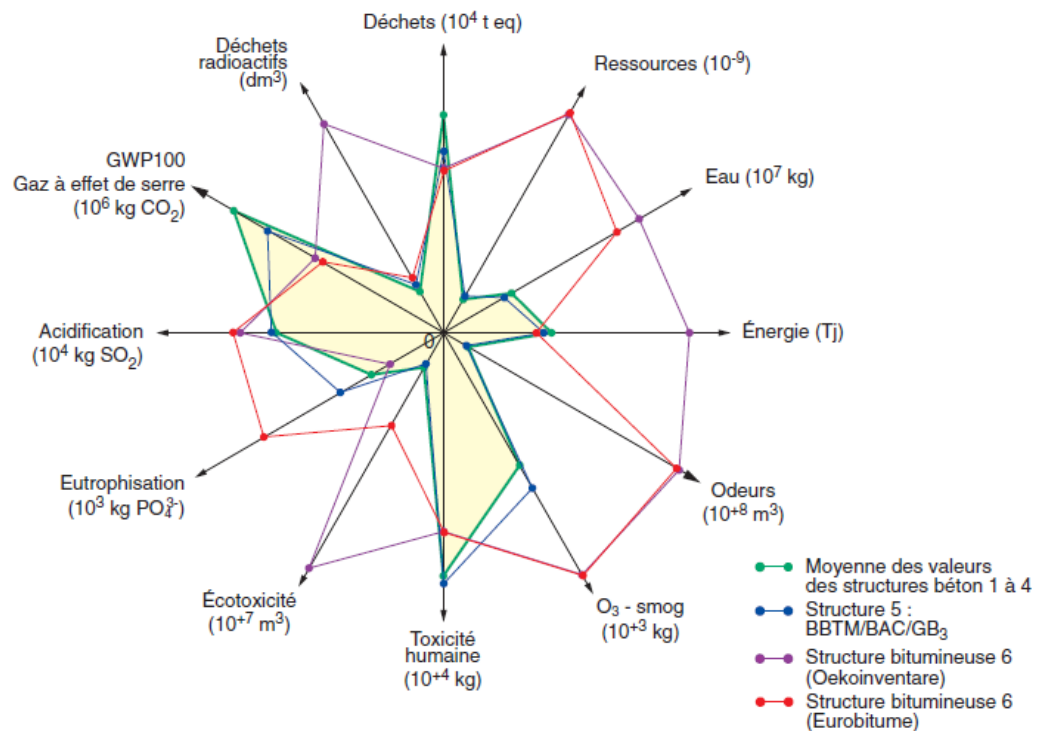


Fig. 8 Comparaison des impacts environnementaux entre chaussée béton et bitumineuse [20]

- Dans [23], les auteurs proposent un inventaire du cycle de vie d'un chantier avec différents taux de matériaux recyclés (0 à 30%) pour un cas concret, 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. 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. Par exemple [24], est un projet réalisé 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 que les chaussées en béton de ciment. 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 situées entre 1% et 7% avec l'utilisation de matériaux bitumineux. 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 dans le présent rapport ; 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 proposée par l'étude [26], qui, par l'intermédiaire d'une analyse bibliographique, illustre que la différence peut être favorable aux chaussées souples ou rigides ceci selon les auteurs et leurs hypothèses de base associées. Il mentionne également 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 en effet moins d'énergie que la production du ciment.
- L'étude [27] est intéressante par sa prise en compte du 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 à ceux de [15] qui indique 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.
 - Un inventaire du cycle de vie comparatif entre un enrobé tiède et un enrobé à chaud est proposé par [18]. Sur la base de cet inventaire, une analyse environnementale et économique est ensuite réalisée. 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). Les auteurs arrivent à la conclusion qu'une réduction de 24% de l'impact sur la pollution de l'air et 18% sur la consommation de combustible fossile peut être obtenue avec le recours aux enrobés tièdes. L'auteur met également en évidence le nombre limité de données prises en compte lors de l'analyse des résultats.
 - Le projet CEDR appelé EGDAR (Evaluation and Decision process for Greener Asphalt Roads), dont la finalisation est prévue en 2016. Ce projet, effectue notamment une vue globale de matériaux dits à faibles impacts environnementaux [35] et propose une méthodologie d'évaluation de ces techniques [36, 37], basée notamment sur la méthode proposée par Bueche dans [4].
 - On pourra encore citer d'autres études qui se sont alors intéressées à un seul processus unitaire comme par exemple [30, 31] qui s'intéressent à la production d'un bitume 50/70 dans le contexte Européen.

De manière générale, nous pouvons relever la diversité dans les résultats, ceci selon les auteurs, bases de données, limites du système, méthodes d'évaluation des impacts, etc. Cela est illustré par [34] où les auteurs comparent la consommation énergétique (figure 9) et les émissions de CO₂ (figure 10), ceci pour différents cas issus de la littérature. Sur cette base, nous pouvons estimer de manière réaliste que la consommation énergétique se situe entre 2 et 4 TJ/km selon le type de chaussée et matériau de construction ce qui correspond approximativement à la consommation annuelle d'électricité de 70 à 140 personnes en Suisse (environ 8'000 KWh/hab_{CH}/an selon banque mondiale).

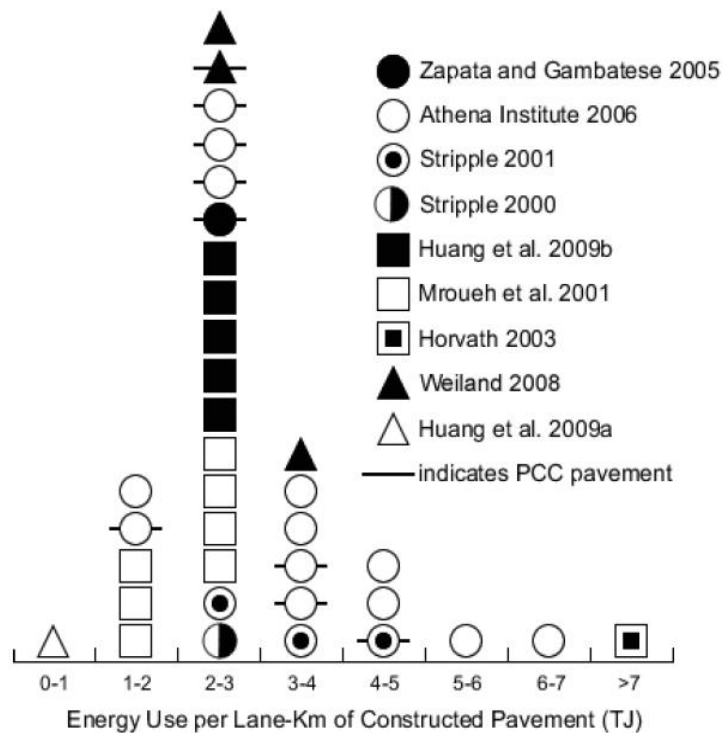


Fig. 9 Energie par km de route selon différentes études ACV/ICV [34]

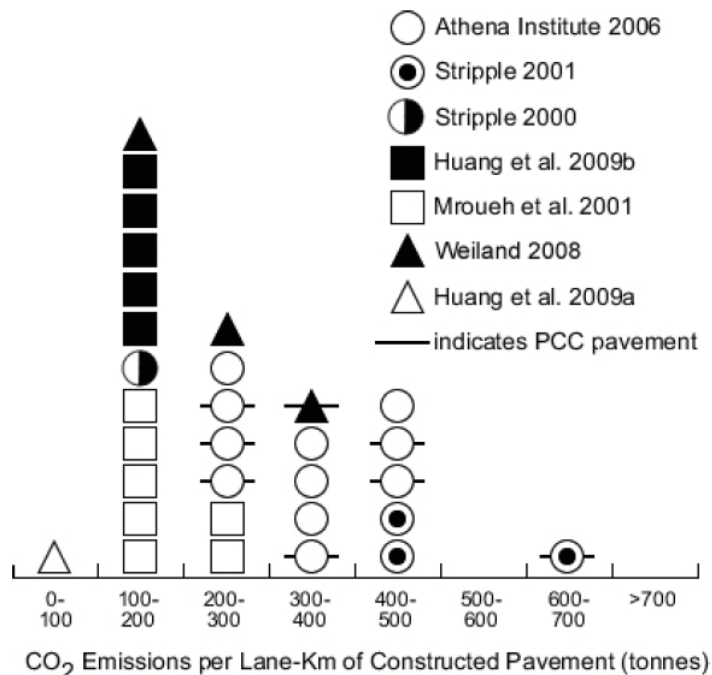


Fig. 10 Emissions de CO₂ par km de route selon différentes études ACV/ICV [34]

Comme brièvement illustré précédemment, la comparaison entre chaussées souples et rigides a intéressé de nombreux auteurs avec des conclusions parfois contradictoires entre les études. Cela est illustré dans [28] repris dans la figure 11 où l'on observe une consommation énergétique pour la construction d'une route en béton allant de 70 MJ/t à 6000 MJ/t selon les auteurs. La comparaison de familles de chaussées ne peut donc être faite que si les hypothèses et limites du système sont strictement identiques et une attention particulière doit être portée à la qualité des données de base utilisées pour l'inventaire. Ces barrières pour la transposition des résultats de différentes études sont notamment discutées par [39].

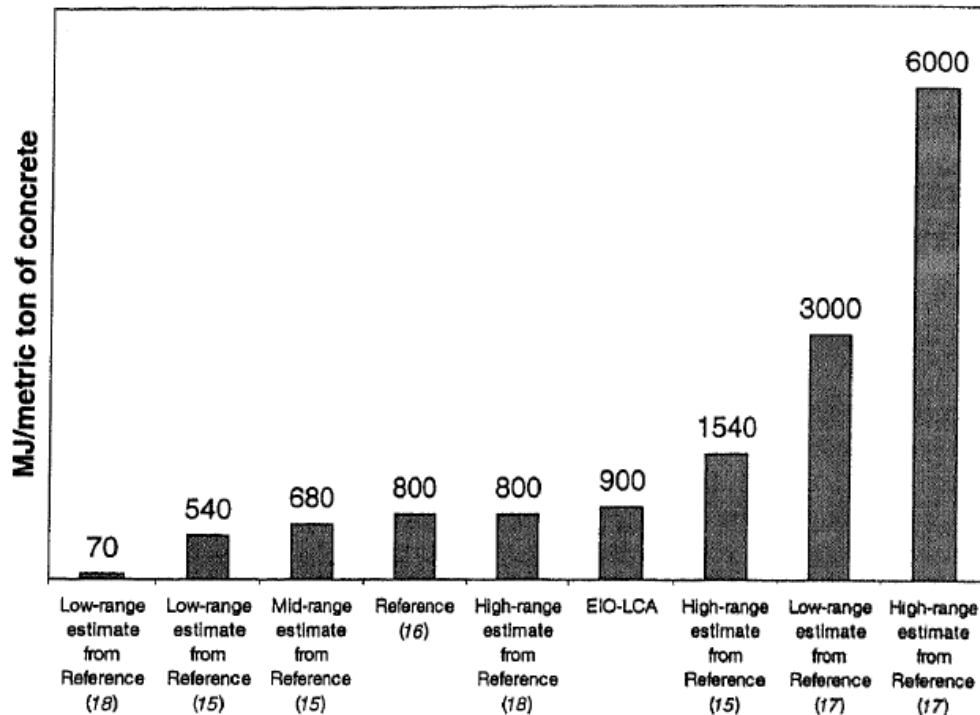


Fig. 11 Energie nécessaire pour des chaussées en béton (armature non considérée) [28]

En guise de synthèse, nous pouvons citer les travaux [38] qui propose une revue de 14 publications (66 cas) traitant de l'analyse du cycle de vie de routes. L'auteur indique:

- 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.

2.4.2 Calculateurs de gaz à effet de serre

De multiples calculateurs de gaz à effet de serre relatifs au domaine de la route existent, mais aucun produit n'est actuellement considéré comme référence absolue. Ces produits se distinguent principalement par les sources de données utilisées, les limites de l'inventaire et la possibilité de réaliser (ou non) une ACV. Nous présentons ci-dessous une sélection de produits jugés intéressants.

CHANGER® (Calculator for Harmonised Assessment and Normalisation of Greenhouse-gas Emissions for Roads) est un logiciel développé et commercialisé par la Fédération Routière Internationale (IRF). Le logiciel s'articule autour de différents modules (pré-construction, construction, maintenance, barrières et signalisation). Les résultats fournis sont la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre exprimés en CO₂ équivalent. Une analyse du logiciel, du concept de calcul et des bases de données utilisées a été effectuée par [40].

Fig. 12 Calculateur gaz à effet de serre CHANGER® de l'IRF (International Road Federation)

L'Ecologiciel® a été développé par Colas et est utilisé à l'interne de la société 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, non commercialisé, est utilisé afin de promouvoir les variantes de produits écologiques développés par la société.

ECORCE2® (ECO comparateur Routes Construction Entretien), développé par l'IFSTTAR avec la collaboration des Centres d'Etudes Technique de l'Equipement (CETE), est un outil gratuit proposant 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 [41]. Au-delà d'un ICV, le logiciel ECORCE2® détermine également des indicateurs ACV pour différentes catégories d'impacts (acidification, eutrophisation, ozone photochimique, éco-toxicité, toxicité chronique).

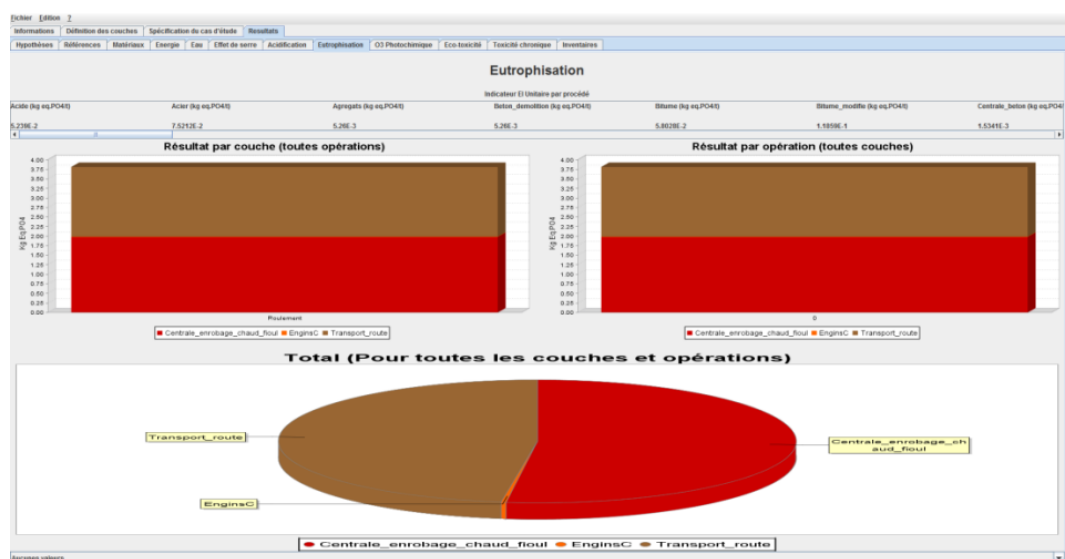


Fig. 13 Vue logiciel ECORCE2®

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 a donc pour vocation de créer une base commune à l'ensemble de la profession (contexte français) et il constitue la synthèse de travaux relatifs à la caractérisation environnementale des matériaux menés au sein de l'USIRF [42]. Le logiciel compare cinq indicateurs : la consommation énergétique, les émissions de gaz à effet de serre, la consommation de granulats, la valorisation d'agrégats d'enrobés (matériaux recyclés) ainsi que la tonne kilométrique.

COMPARAISON DES ÉMISSIONS TOTALES DE GAZ À EFFET DE SERRE (en t eq CO₂)

Graphique

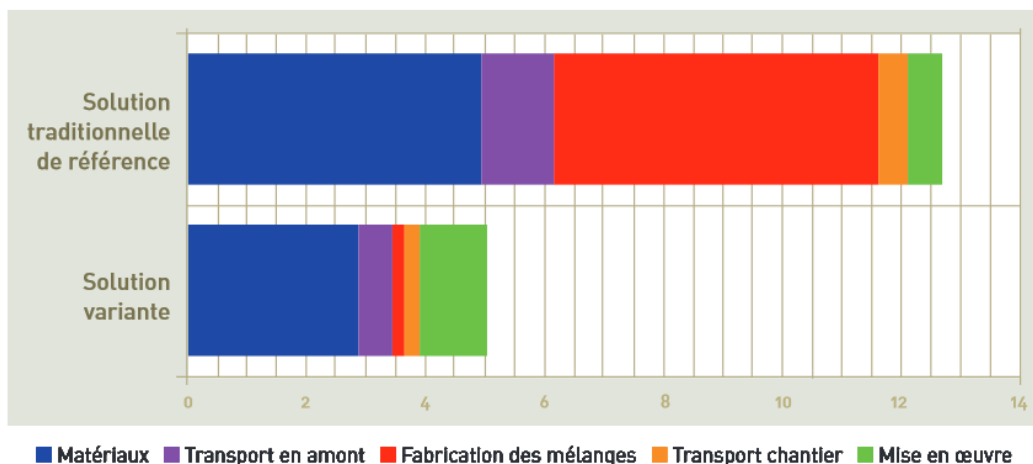


Fig. 14 Exemple de résultat logiciel SEVE®

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 décrite précédemment dans ce chapitre.

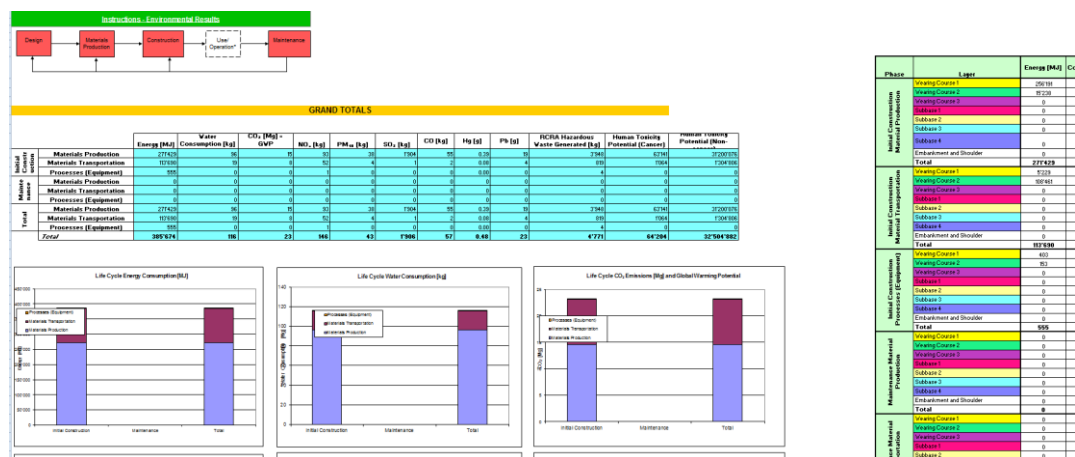


Fig. 15 Vue PaLATE®

De nombreux autres outils peuvent être mentionnés parmi lesquels : OMEGA TP® (Outil Méthodologique d'Évaluation 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),...

Nous pouvons finalement observer :

- Les calculateurs de gaz à effet de serre sont donc 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.
- La comparaison détaillée au niveau des technologies d'enrobage (*i.e.* sortes d'enrobés tièdes par exemple) 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 généralement 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 donc sur la base des éléments ci-dessus que le modèle d'évaluation multicritère proposé dans cette recherche va être axé, avec une méthode permettant la comparaison de différentes technologies d'enrobés bitumineux.

2.5 Choix d'une méthode d'analyse environnementale

Sur la base des différents éléments décrits dans ce chapitre, il est maintenant possible de définir les bases de la méthode d'analyse environnementale qui sera retenue dans le cadre du projet PLANET.

Dans un premier temps, nous pouvons observer que la procédure complète d'analyse du cycle de vie (ACV) est complexe, requiert la connaissance de nombreuses données ainsi que des compétences étendues en matière de chimie et toxicologie. Les étapes consistant à analyser l'impact et effectuer l'interprétation de ces impacts sont en effet relativement complexe, différents méthodes pouvant être utilisées les rendant ainsi quelque peu subjectives. A l'opposé, les première étapes de l'ACV qui sont la définition des objectifs et du système ainsi inventaire des polluants sont des étapes "objectives" pour lesquelles la place laissée à l'interprétation est sensiblement plus faible. 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. Ainsi, dans le cadre du projet PLANET, il a été décidé d'intégrer l'évaluation environnementale au-travers de la réalisation d'un inventaire du cycle de vie. Cette analyse devra proposer les valeurs de base (gaz à effet de serre) pouvant ensuite être intégrées dans l'analyse multicritère.

Rappelons finalement que l'analyse environnementale est une des composantes (critères) qui sera considérée dans la méthode globale d'évaluations, la prise en compte d'autres dimensions telles que les coûts, performances et les risques associés étant également attendue. Il est donc nécessaire que les résultats de l'analyse

environnementale puissent être intégrés dans la méthodologie globale; le tout devant être suffisamment flexible.

Nous pouvons finalement indiquer que des informations complémentaires relatives à l'analyse du cycle de vie pourront être trouvées dans le rapport RS-2 du projet PLANET [43].

2.6 Emissions considérées dans le modèle

La méthode d'analyse environnementale ayant été choisie (ICV), il est finalement nécessaire de préciser les polluants ou émissions qui seront étudiés dans le modèle PLANET.

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 [44] donne une répartition des émissions pour les principaux GES :

- La vapeur d'eau (H_2O) 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 (CO_2) : Le CO_2 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 CO_2 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 (CH_4) : 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 (N_2O) : Egalement un gaz d'origine naturelle et humaine (40% des émissions totales de N_2O). 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 (O_3) : 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 :
 - 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 (SF_6) : 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.

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" selon [44]. 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). L'horizon de temps joue également 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 finalement pour cette recherche les composants indiquées dans le Tab. 3 qui contient également pour chacun le PRG selon [44].

Tab. 3 GES considérés et potentiel de réchauffement global PRG (horizon 100 ans), selon [44]

Nom	Formule	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'étant parfois pas exprimée de manière très univoque. En raison de la difficulté d'obtenir les données, bon nombre de bases de données contiennent bien évidemment le dioxyde de carbone, mais parfois pas (ou peu) d'autres GES aux effets pourtant importants. Ainsi, le choix de composants à analyse fait l'objet d'une balance entre les données disponibles, les composants potentiellement dangereux ainsi que les efforts nécessaires pour la récolte de données amenant finalement un gain de précision quelque peu négligeable. Dans [13], les auteurs indiquent que l'ICV doit considérer les GES principaux, incluant le CO₂, CH₄ et N₂O. Cette recommandation sera suivie dans le projet PLANET, les calculs étant finalement réalisés en CO_{2,eq} grâce à l'utilisation des facteurs PRG. D'autres polluants comme les particules NO_x auraient également pu être intégrées étant donné leur effet sur le potentiel de réchauffement global.

3 Développement de la méthodologie multicritère d'évaluation

Après avoir discuté les différentes méthodes d'analyse environnementales au chapitre 2, nous proposons ici de détailler le développement de la méthodologie multicritère d'évaluation. Le chapitre est décomposé ainsi:

- Principes généraux et architecture du modèle (chapitre 3.1).
- Discussion des différentes sources de données intégrées dans le modèle (chapitre 3.2).
- Partie 1 du modèle soit inventaire du cycle de vie et évaluation selon les différents critères (chapitre 3.3).
- Partie 2 du modèle soit méthodologie multicritère d'évaluation (chapitre 3.4).

3.1 Principes et architecture de la méthodologie

Nous décrivons ici les principes généraux de la méthodologie multicritère d'évaluation, les détails étant proposés dans la suite du chapitre.

Sur la base de l'analyse précédente, il a été choisi de positionner le modèle 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 ou autre technique dite "environnementale".

L'architecture générale du modèle est présentée dans la figure 16; le modèle étant de manière globale décomposé en deux parties distinctes.

Partie 1: Inventaire du cycle de vie (ICV) et indicateurs de qualitatifs/quantitatifs

La première partie du modèle a pour objectif de générer l'ensemble des données nécessaires à la réalisation de l'analyse multicritère qui suivra (partie 2). Ainsi, les différentes variantes doivent être évaluées, ceci pour les différents critères choisis.

Dans un premier temps, l'ensemble des critères qui sont évalués sur le cycle de vie sont traités et les indicateurs qualitatifs/quantitatifs additionnels établis. Pour les critères évalués sur le cycle de vie, cela concerne bien évidemment les aspects environnementaux discutés précédemment au chapitre 2, mais également les critères relatifs aux coûts énergétiques. En plus de ces critères, les aspects performantiels et autres critères qualitatifs sont également considérés, ces critères faisant quant à eux référence à une sélection de processus unitaires du cycle de vie et non pas à l'ensemble du cycle. La prise en compte des performances dans le processus de décision (critère qualitatif) 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.

L'établissement de ces différents indicateurs permet finalement de déterminer les données d'entrée nécessaires au modèle d'évaluation multicritère.

Relevons encore que la figure 16 contient également les sources de données disponibles, qui seront décrites au chapitre 3.2 et ont été intégrées dans le modèle développé dans ce projet PLANET.

Partie 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 soit les indicateurs évalués sur l'ensemble du cycle de vie, mais également les indicateurs complémentaires qualitatifs et quantitatifs introduits au gré des niveaux d'analyse. Le développement du modèle intègre progressivement la notion de préférence de l'utilisateur.

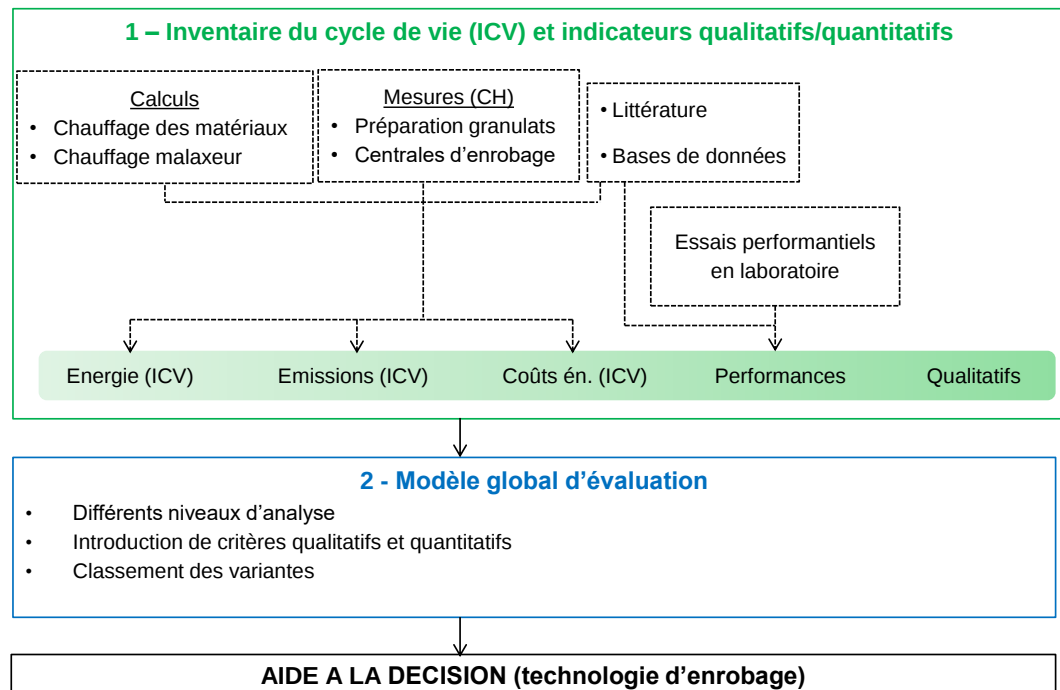


Fig. 16 Vue générale du modèle multicritère

3.2 Sources de données

Différentes sources de données peuvent être utilisées pour l'évaluation des variantes selon les critères préalablement choisis.

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. Cela est abondamment discuté dans la recherche PLANET RS-1 relative aux centrales d'enrobage [10].

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 (on appelle cela une erreur d'agrégation).

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 des sources suivantes:

- Articles de journaux,
- rapports de recherche,
- conférences,
- données de l'industrie,
- données gouvernementales,
- enquêtes,

- mesures,
- calculs,
- bases de données générales ou spécialisées.

Bien que la collecte des données ne constitue pas l'objet central du modèle développé, la mise à disposition de données permet de proposer des valeurs par défaut aux utilisateurs et également fournir une première base de comparaison. Pour cela, différentes sources de données ont été intégrées à la réflexion lors du développement du modèle PLANET; un soin particulier étant mis dans le choix de données appropriées, représentatives et transparentes, ainsi que dans la proposition de différentes alternatives (sources). Le Tab. 4 résume les sources de données intégrées. Nous pouvons ajouter les commentaires suivants:

- Les données obtenues par calcul concernent la consommation d'énergie et les émissions au poste d'enrobage. Pour cela, un modèle de calcul a été implémenté, avec prise en compte de l'énergie de chauffage des matériaux et modélisation du brûleur de la centrale. Les détails relatifs aux formules de calcul utilisées peuvent être consultés dans le rapport [10] relatif à la RS-1 du projet PLANET qui concerne les centrales d'enrobage. Dans ce même rapport, les données relatives à l'enquête sur des postes d'enrobage suisses sont également discutées. Les données récoltées dans le contexte même de l'étude, telles que celles relatives aux postes d'enrobage, sont appelées données primaires, par opposition aux données secondaires qui proviennent par exemple de la littérature ou autres études comparables.
- Les différentes bases de données consultées sont quant à elles discutées au chapitre 3.2.1.
- Il n'y a pas de sources de données spécifiques pour les critères qualitatifs, l'évaluation devant être faite sur la base de critères qualitatifs d'évaluation qui seront discutés plus loin.

Tab. 4 Type de données utilisées

Source	Energie	Emissions	Coûts	Performances
Calcul (cf. PLANET RS-1 [10])	X	X	X	
Enquête centrales Suisses (cf. PLANET RS-1 [10])	X	X	X	
Littérature	X	X	X	X
Bases de données (chap. 3.2.1)	X	X	X	
Essais laboratoire				X

3.2.1 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 spécialisés. Bien qu'elles ne se rapportent en général pas au domaine spécifique des matériaux bitumineux, ces bases de données fournissent des informations complètes et fiables pour certains processus unitaires. Dans [9], les auteurs 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. Nous pouvons observer que 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 unanimement 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 fournies avec des calculateurs. Un aperçu de la base de données créée est disponible au chapitre 4.1 relatif à l'implémentation de la méthodologie. Les principales sources utilisées sont brièvement décrites 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 ...) [45, 46].

La base de données Ecoinvent contient des informations relatives à des domaines variés tels que l'énergie, les matériaux de construction, métaux, chimie, papier, forêt, agriculture, transports, traitement des déchets, etc. Elle contient 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 car elle permettent 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 utiliser pour les non spécialistes.

+ waste asphalt	-1	kg		
By-product/Waste				
+ waste cement, hydrated	1.04E-08	kg	Lognormal	5.9826
+ waste graphical paper	3.88E-05	kg	Lognormal	1.0502
+ waste plastic, mixture	3.88E-05	kg	Lognormal	1.0502
To Environment				
air				
+ Aluminium	4.64E-14	kg	Lognormal	42.62
+ Aluminium	3.1E-13	kg	Lognormal	20.22
+ Ammonia	5.91E-09	kg	Lognormal	5.7834
+ Arsenic	9.34E-13	kg	Lognormal	33.068
+ Arsenic	1.88E-14	kg	Lognormal	24.227
+ Calcium	1.04E-13	kg	Lognormal	40.393
+ Calcium	6.77E-14	kg	Lognormal	21.736
- Carbon dioxide, fossil	0.0011	kg	Lognormal	4.5266
Uncertainty	Lognormal (Geometric mean=0.0011, Variance of log-transformed data=0.57, Arithmetic mean of log-transformed data=-6.81, Standard deviation=4.5266, CI/2wP, half range of confidence interval=4.5266, Variance of data with pedigree=0.57) Pedigree matrix: 1 1 1 1			
Compartment	air	Subcompartment	non-urban air or from high stacks	
Classification		Formula		
CAS-Number	000124-38-9	Synonym		
Activity Link		Variable Name		
Mathematical Relation		Comment	burden from direct release or incineration of landfill biogas. Uncertainty calculated from uncertainty of the waste composition of this waste, uncertainty in waste decomposition and short-term leaching in sanitary landfill	

Fig. 17 Extrait base de données Ecoinvent (version 3.2 (2015))

Relevons encore que les données d'inventaire du cycle de vie Ecoinvent 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 [21] discutée précédemment.

Daten aus GEMIS-Version 4.94

Pkw-Nutzung, je MJ Kraftstoffeinsatz

GEMIS-Szenario-Name:	Verkehr: Benzin, LPG, CNG, Diesel in Pkw 2010-2030 (je MJ)
Kommentar:	Dieses Szenario vergleicht deutsche Mittelklasse-Pkw pro MJ Kraftstoffeinsatz für Benzin (ohne Bioethanolanteil), CNG (ohne Biomethananteil), LPG, Diesel (ohne Biodieselanteil) für 2010-2030; die Aufwände für die Fahrzeugherstellung sind hier ausgenommen.
Systemgrenzen:	Gesamter Lebenszyklus inkl. Transporte + Materialvorleistung, ohne Entsorgung

Szenario-Option	Erläuterung bzw. Kommentar	Zeitbezug
Pkw-Otto-Benzin-mittel-DE-2010 (je MJ)	mittlerer Pkw mit Ottomotor für Benzin, ohne Biokraftstoffanteile, ohne Fahrzeugherstellung	2010
Pkw-Otto-Benzin-mittel-DE-2020 (je MJ)	mittlerer Pkw mit Ottomotor für Benzin, ohne Biokraftstoffanteile, ohne Fahrzeugherstellung	2020
Pkw-Otto-Benzin-mittel-DE-2030 (je MJ)	mittlerer Pkw mit Ottomotor für Benzin, ohne Biokraftstoffanteile, ohne Fahrzeugherstellung	2030
Pkw-Otto-LPG-mittel-DE-2010 (je MJ)	mittlerer Pkw mit Ottomotor für Flüssiggas (LPG), ohne Biokraftstoffanteile, ohne Fahrzeugherstellung	2010
Pkw-Otto-LPG-mittel-DE-2020 (je MJ)	mittlerer Pkw mit Ottomotor für Flüssiggas (LPG), ohne Biokraftstoffanteile, ohne Fahrzeugherstellung	2020
Pkw-Otto-LPG-mittel-DE-2030 (je MJ)	mittlerer Pkw mit Ottomotor für Flüssiggas (LPG), ohne Biokraftstoffanteile, ohne Fahrzeugherstellung	2030
Pkw-Otto-CNG-mittel-DE-2010 (je MJ)	mittlerer Pkw mit Ottomotor für komprimiertes Erdgas (CNG), ohne Biomethananteile, ohne Fahrzeugherstellung	2010
Pkw-Otto-CNG-mittel-DE-2020 (je MJ)	mittlerer Pkw mit Ottomotor für komprimiertes Erdgas (CNG), ohne Biomethananteile, ohne Fahrzeugherstellung	2020
Pkw-Otto-CNG-mittel-DE-2030 (je MJ)	mittlerer Pkw mit Ottomotor für komprimiertes Erdgas (CNG), ohne Biomethananteile, ohne Fahrzeugherstellung	2030
Pkw-Diesel-mittel-DE-2010 (je MJ)	mittlerer Pkw mit Dieselmotor für Diesel, ohne Biokraftstoffanteile, ohne Fahrzeugherstellung	2010
Pkw-Diesel-mittel-DE-2020 (je MJ)	mittlerer Pkw mit Dieselmotor für Diesel, ohne Biokraftstoffanteile, ohne Fahrzeugherstellung	2020
Pkw-Diesel-mittel-DE-2030 (je MJ)	mittlerer Pkw mit Dieselmotor für Diesel, ohne Biokraftstoffanteile, ohne Fahrzeugherstellung	2030

Luftschadstoffe	SO ₂	SO ₂	NO _x	Staub
Option [g/MJ]	Äquivalent	SO ₂	NO _x	Staub
Pkw-Otto-Benzin-mittel-DE-2010 (je MJ)	0.09	0.04	0.07	0.005
Pkw-Otto-Benzin-mittel-DE-2020 (je MJ)	0.08	0.03	0.07	0.004
Pkw-Otto-Benzin-mittel-DE-2030 (je MJ)	0.09	0.04	0.07	0.004
Pkw-Otto-LPG-mittel-DE-2010 (je MJ)	0.08	0.02	0.08	0.004
Pkw-Otto-LPG-mittel-DE-2020 (je MJ)	0.08	0.02	0.09	0.003
Pkw-Otto-LPG-mittel-DE-2030 (je MJ)	0.06	0.01	0.06	0.002
Pkw-Otto-CNG-mittel-DE-2010 (je MJ)	0.06	0.00	0.09	0.001
Pkw-Otto-CNG-mittel-DE-2020 (je MJ)	0.07	0.00	0.09	0.001
Pkw-Otto-CNG-mittel-DE-2030 (je MJ)	0.05	0.00	0.07	0.001
Pkw-Diesel-mittel-DE-2010 (je MJ)	0.29	0.03	0.36	0.008
Pkw-Diesel-mittel-DE-2020 (je MJ)	0.28	0.03	0.36	0.007
Pkw-Diesel-mittel-DE-2030 (je MJ)	0.28	0.03	0.36	0.007

Fig. 18 Extrait base de données Gemis

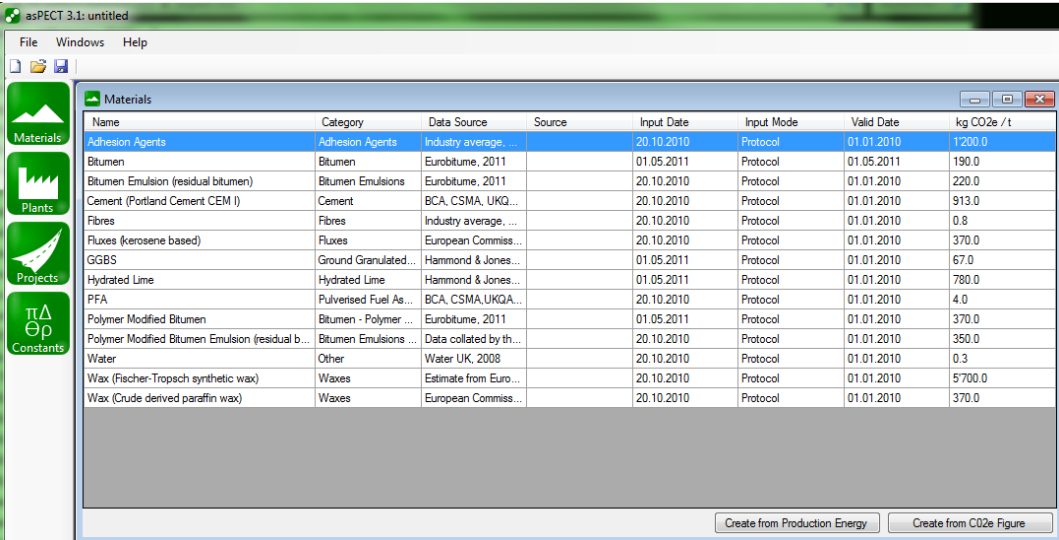
Bath University

L'université de Bath (Sustainable Energy Research Center Team) a mis au point une base de données en ligne très complète appelée "ICE – Inventory of Carbon & Energy". La base de données, régulièrement mise à jour, 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 informations proposées par [15] sont reprises. Cette base de données présente la particularité de proposer des valeurs d'écart-type des émissions fournies. Pour la production d'enrobé bitumineux, des variations de $\pm 30\%$ entre les valeurs minimales et maximales sont renseignées (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 entre 2008 et 2011. La dernière version du logiciel date de 2014. Le but du projet relié à cette base de données [47] 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 à la profession. 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 seront utilisées.



Name	Category	Data Source	Source	Input Date	Input Mode	Valid Date	kg CO2e / t
Adhesion Agents	Adhesion Agents	Industry average, ...		20.10.2010	Protocol	01.01.2010	1'200.0
Bitumen	Bitumen	Eurobitume, 2011		01.05.2011	Protocol	01.05.2011	190.0
Bitumen Emulsion (residual bitumen)	Bitumen Emulsions	Eurobitume, 2011		20.10.2010	Protocol	01.01.2010	220.0
Cement (Portland Cement CEM I)	Cement	BCA, CSMA, UKQA...		20.10.2010	Protocol	01.01.2010	913.0
Fibres	Fibres	Industry average, ...		20.10.2010	Protocol	01.01.2010	0.8
Fluxes (kerosene based)	Fluxes	European Commiss...		20.10.2010	Protocol	01.01.2010	370.0
GGBS	Ground Granulated...	Hammond & Jones...		01.05.2011	Protocol	01.01.2010	67.0
Hydrated Lime	Hydrated Lime	Hammond & Jones...		01.05.2011	Protocol	01.01.2010	780.0
PFA	Pulverised Fuel As...	BCA, CSMA, UKQA...		20.10.2010	Protocol	01.01.2010	4.0
Polymer Modified Bitumen	Bitumen - Polymer ...	Eurobitume, 2011		01.05.2011	Protocol	01.01.2010	370.0
Polymer Modified Bitumen Emulsion (residual b...	Bitumen Emulsions ...	Data collated by th...		20.10.2010	Protocol	01.01.2010	350.0
Water	Other	Water UK, 2008		20.10.2010	Protocol	01.01.2010	0.3
Wax (Fischer-Tropsch synthetic wax)	Waxes	Estimate from Euro...		20.10.2010	Protocol	01.01.2010	5'700.0
Wax (Crude derived paraffin wax)	Waxes	European Commiss...		20.10.2010	Protocol	01.01.2010	370.0

Fig. 19 Extrait base de données asPECT

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 citées ci-dessus, 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 du cycle de vie d'un enrobé. Ces données seront discutées dans la section suivante qui détaillera les aspects relatifs à l'ICV.

3.2.2 Qualité et incertitude des bases de données

Selon le jeu de données obtenues, il peut être 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 relative aux données dépend également du type de ces données. Par exemple, 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.

A notre connaissance, 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 d'échantillons suffisants afin de mener une étude probabiliste solide. C'est pourquoi [5] 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 les suivants :

- 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 [45].

La procédure complète de calcul est relativement longue à réaliser. Nous proposons ici un exemple de calcul pour le cas des données issues de l'enquête de consommation énergétique effectuée auprès de centrales suisses et détaillée dans le rapport RS-1 [10]. La procédure proposée dans [5] est suivie et elle amène les résultats suivants :

- 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.

D'autres auteurs proposent des considérations relatives à l'incertitude des données dans une procédure d'analyse du cycle de vie. Par exemple, [13] indique que 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 de 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, ce qui sera effectué dans cette recherche.

3.3 Partie 1: Inventaire du cycle de vie et indicateurs qualitatifs/quantitatifs

Comme décrit précédemment, la première partie du modèle a pour objectif de générer l'ensemble des données nécessaires à la réalisation de l'analyse multicritère qui suivra (partie 2). Pour cela, chaque variante (*i.e.* enrobé) doit alors être évaluée selon l'ensemble des critères choisis.

Pour rappel, nous distinguerons les familles de critères (indicateurs) suivants:

- Critères évalués sur le cycle de vie soit aspects énergétiques, environnementaux et coûts énergétiques. Ces aspects sont discutés aux chapitres 3.3.1, 3.3.2 et 3.3.3.
- Critères quantitatifs pouvant être associés à une sélection de processus unitaires du cycle de vie. Cela concerne les performances mécaniques, discutées au chapitre 3.3.4.
- Critères qualitatifs pouvant être associés à une sélection de processus unitaires du cycle de vie. Les critères proposés sont discutés au chapitre 3.3.5.

Dans la suite de ce chapitre, nous proposons tout d'abord une analyse des paramètres et hypothèses de base (chapitre 3.3.1) ainsi que la définition des objectifs et du système (chapitre 3.3.2). Ces étapes sont en effet indispensables afin de bien formaliser les bases de l'étude. Les trois familles de critères sont ensuite analysées soit les critères faisant l'objet d'une analyse sur le cycle de vie (chapitre 3.3.3), les critères quantitatifs (chapitre 3.3.4) et les critères qualitatifs (chapitre 3.3.5).

3.3.1 Paramètres et hypothèses de base

Comme détaillé précédemment, l'évaluation environnementale est concrétisée par un inventaire du cycle de vie. Ceci permet de conserver des valeurs brutes et évite l'introduction d'une incertitude additionnelle relative à la méthode de détermination des dommages (procédure ACV). 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 de notre système.

La méthodologie se positionne dans une comparaison au niveau d'enrobés bitumineux (*i.e.* types d'enrobés). 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 et ses scénarios de maintenance sont difficiles à quantifier dans le cas de comparaisons de projets routiers. Ces aspects indirects ne sont donc 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 pourront 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.

Un exemple d'arbre de processus pour l'ICV d'une route avec ses différents éléments constitutifs est proposé dans la figure 20.

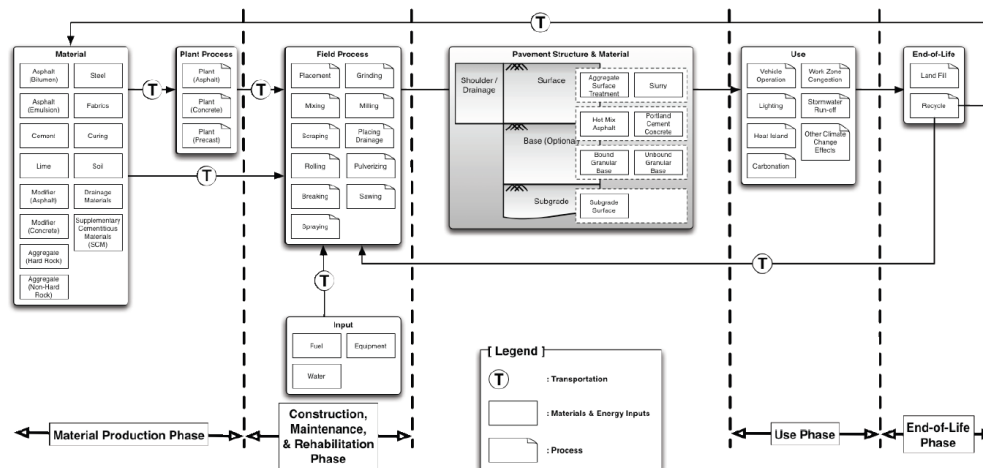


Fig. 20 Exemple d'arbre de processus pour l'ACV d'une route [13]

Nous effectuons également les hypothèses et postulats suivants, valable pour l'ensemble de la présente étude :

- 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). Pour ces calculs, nous supposons un processus de combustion parfaite. 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 spécifique est utilisé dans la base de données du modèle afin d'identifier les données calculées en fonction de la consommation énergétique des données issues de mesures.
- 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 du modèle afin d'identifier les données calculées en fonction de la consommation énergétique des données issues de mesures.
- 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 du bitume (appelée également énergie "matière" que l'on pourrait récupérer en brûlant le matériau) 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 d'enrobé. Cette hypothèse peut être discutée, mais elle nécessite d'être clairement stipulée en début d'analyse. Dans [29], les auteurs ne prennent pas non plus en compte la valeur énergétique comme carburant. La prise en compte de l'énergie "matière" est par contre discutée dans [48] qui rappelle que l'énergie "matière" est environ 30 fois supérieure à l'énergie "procédé" qui représente l'énergie consommée pour la production du bitume.
- La précision des différents indicateurs (nombre de décimales) est définie 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).

3.3.2 Objectifs et système

L'étape de définition des objectifs et du système n'est pas très technique et bien cernée dans la documentation relative. Elle a pour objectif de définir les conditions de base de l'étude [5].

Objectif de l'étude

Évaluation de l'impact de différents enrobés bitumineux (*i.e.* scénarios ou variantes) 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 CHF) est également fait en se basant sur le même système de référence décrit plus loin.

Fonction du produit

La fonction principale des enrobés bitumineux évalués est définie comme "matériau de construction routière pour couche bitumineuse". 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 comme dans le cadre de ce projet, 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. Un vue schématique des flux pour le processus unitaire de la centrale d'enrobage est proposée dans la figure 21. Dans cette étude, nous considérons comme flux entrants l'utilisation de ressources énergétiques ainsi que la quantité de matière (granulats, bitume, additifs ...). Comme discuté précédemment, 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 donc pas considérés.

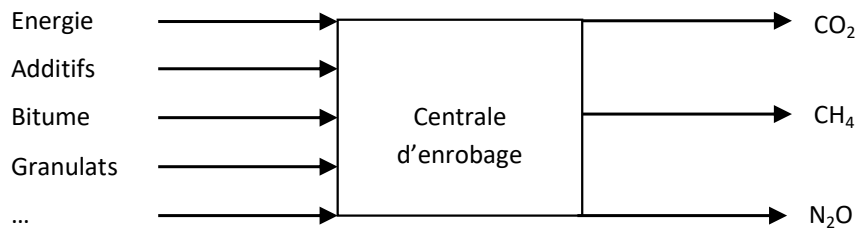


Fig. 21 Schéma des flux élémentaires pour un processus unitaire donné

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 éléments composant le système sont généralement appelés "processus unitaires". Les limites (ou bornes) du système contiennent l'ensemble des processus nécessaires à la réalisation de la fonction du système. La définition des limites du système a une grande influence sur les résultats de l'analyse.

De manière globale, 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. Un schéma général du système étudié et de ses limites est proposé dans la figure 22. 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 jugés comme déterminants, ceci 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 [13], 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. Cette proposition n'est pas suivie dans le cadre de cette étude afin de fournir à l'utilisateur un résultat qui soit représentatif de l'ensemble du cycle de vie et évaluer la proportion de la contribution de chaque processus par rapport au total (analyse Pareto). Les limites du système étudié sont finalement représentées par un trait discontinu orange. Les processus indiqués sur fond orange correspondent donc au cycle du recyclage de l'enrobé, séparé de la pose de l'enrobé par la durée de service de la chaussée (solicitations du trafic et du climat). Le cycle du recyclage n'est pas considéré dans cet inventaire du cycle de vie (limites du système) et la sollicitation de la chaussée par le trafic et le climat ne sont également pas pris en considération.

Les hypothèses et simplifications suivantes sont finalement faites pour 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 (pourrait être aisément intégrés dans le modèle).

- 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.

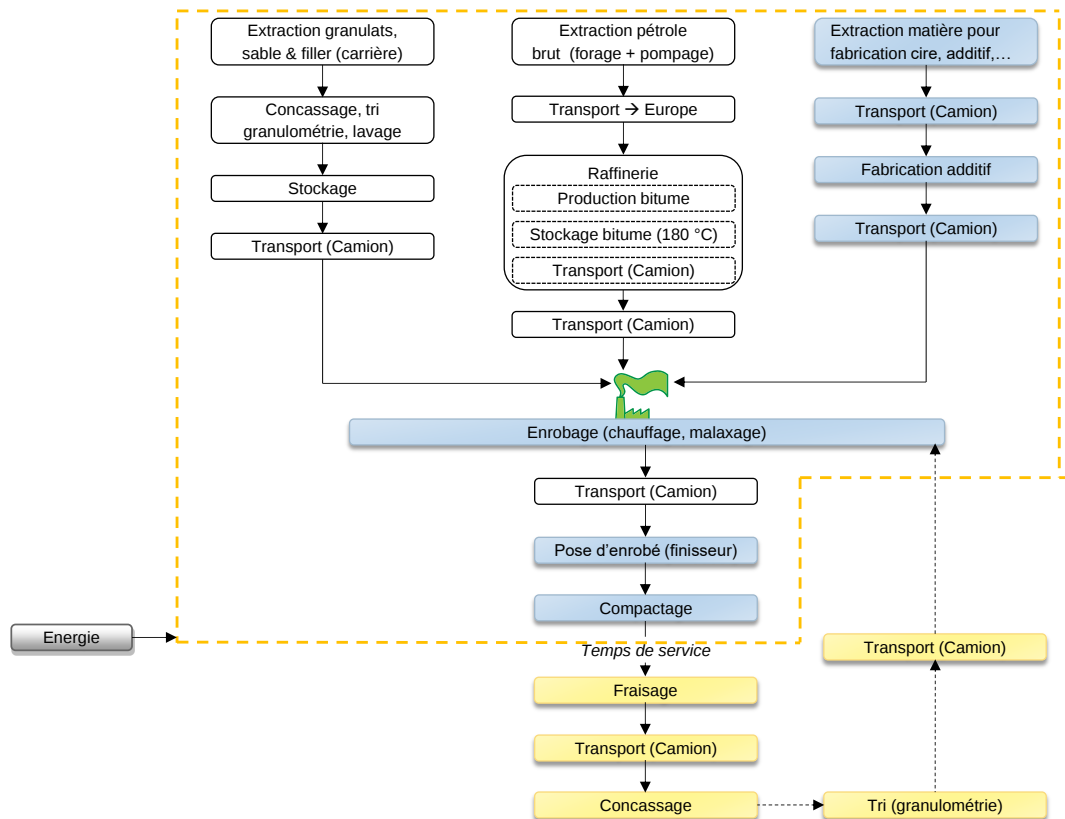


Fig. 22 Arbre des processus unitaires pour l'ICV d'un enrobé bitumineux (limites du système)

La méthode d'ICV/ACV décrite dans [5] 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, analyse Pareto).

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 doit en effet être préalablement définie et pour cela différentes méthodes existent. Par exemple, [16] considère que chaque construction est responsable de la totalité des matériaux qu'elle utilise. Donc, dans l'utilisation de matériaux recyclés, le fraisat d'enrobé est considéré comme un matériau de base. D'autres auteurs comme [13] mentionnent différentes possibilités parmi lesquelles une allocation des émissions à 50/50 entre la construction initiale et la nouvelle construction.

Afin de simplifier la procédure globale d'analyse et éviter des hypothèses parfois discutables, on supposera dans cette recherche que les enrobés fabriqués ne contiennent pas de matériaux recyclés, conformément à l'analyse performantielle en laboratoire. La prise en compte de matériaux recyclés dans le cadre d'une procédure complète d'évaluation peut cependant être aisément réalisée et cela est discuté notamment dans [37, 49], projets auxquels les auteurs du présent rapport ont contribué.

3.3.3 Inventaires des émissions et de l'énergie

Comme expliqué précédemment, 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 ci-dessous quelques précisions pour les processus clefs *i.e.* les processus ayant la plus grande influence sur le bilan global de l'inventaire du cycle de vie.

Production du bitume

Les données fournies par [30] et reprises notamment par [32] 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 23 indique les processus unitaires considérés et les limites du système, système dans lequel les données utilisées constituent une moyenne de mesures lors de la production d'un bitume standard. L'utilisation de données moyennes pour la production du bitume semble pertinente, contrairement à la fabrication de l'enrobé qui nécessite des données spécifiques selon le type d'application.

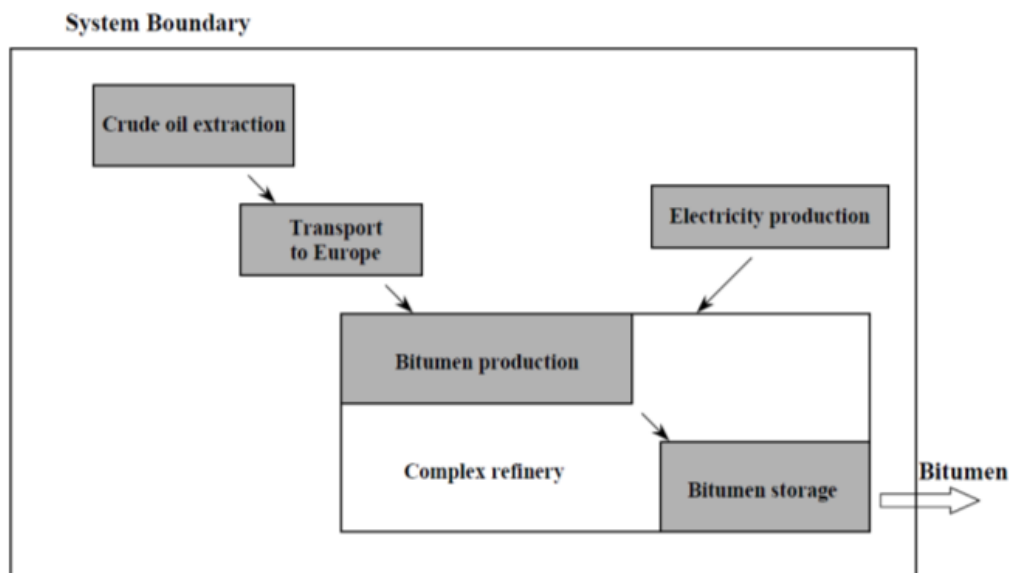


Fig. 23 Limites du système pour la production du bitume [30]

Une mise à jour des données est proposée par [50] où l'auteur s'intéresse à la production et 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 un aspect déterminant de l'inventaire du cycle de vie. C'est pourquoi différents auteurs ont étudié cet aspect avec autant de sources de données qui se différencient entre autre par les conditions technologiques, géographiques et temporelles ainsi que le processus d'allocation des différents produits

obtenus par raffinage. Dans [26], les auteurs indiquent des valeurs allant de 0.42 MJ/kg à 6 MJ/kg. [50] 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 24 propose finalement un comparatif selon différentes sources où nous pouvons relever que l'ordre de grandeur des données est comparable à celles proposées dans le cadre de ce projet.

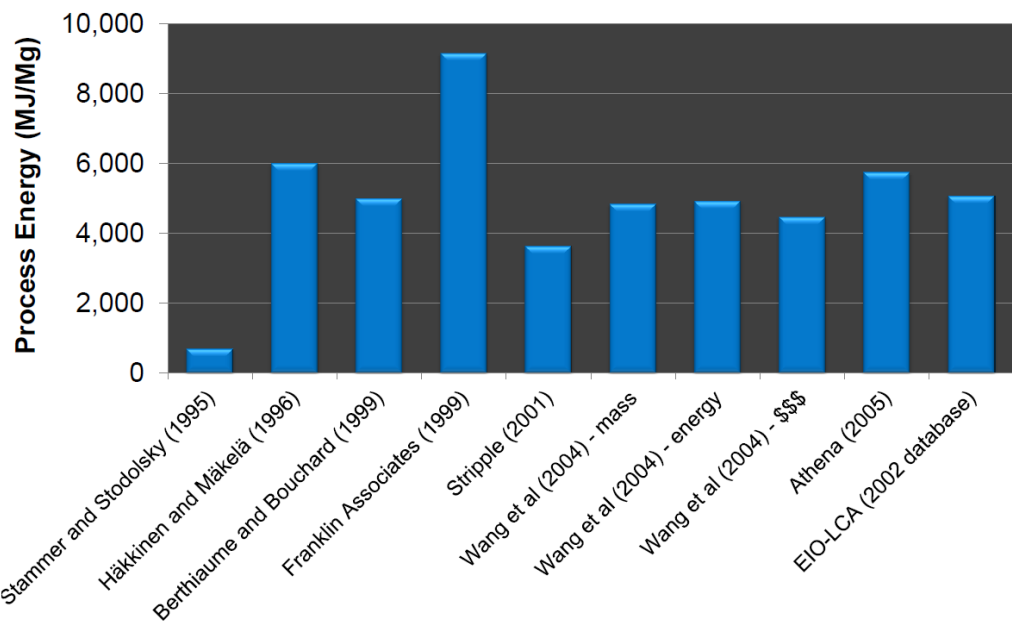


Fig. 24 Energie nécessaire à la production du bitume selon différentes sources [13]

Centrale d'enrobage

De nombreuses données existent pour la fabrication des mélanges en centrale d'enrobage. La plupart des données à disposition concernent la production d'enrobé à chaud. Dans le cadre de ce travail, différentes sources de données sont proposées pour le processus unitaire de la centrale d'enrobage:

- Données issues de mesures sur centrales.
- Données issues de la littérature.
- Possibilité de calculer la consommation d'énergie et les émissions par une modélisation du poste d'enrobage.

Ces différentes sources de données sont abondamment discutées et détaillées dans le rapport relatif à la recherche RS-1 du projet PLANET [10] que l'on pourra recommander pour de plus amples détails. Les différentes données sont donc intégrées au modèle développé.

En guide de résumé de [10], nous pouvons indiquer que les données issues de la littérature indiquent que 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 parmi lesquels le type de centrale et son niveau de modernité, le type de mélange, l'approvisionnement énergétique, la calibration du brûleur, les conditions climatiques, etc. [32] propose des valeurs allant de

276 MJ/t à 389 MJ/t pour un enrobé à chaud alors que l'EAPA [52] indique des valeurs typiques de consommation en centrale situées 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 relative "jeunesse" des produits ainsi que du secret technologique entourant ces ajouts. Pour la fabrication de cire, la base de données asPECT est utilisée. Pour l'utilisation d'un additif chimique de type tensio-actif, les données proposées 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 (agent tensio-actif). Cette consommation est directement liée à la complexité technologique pour l'élaboration des additifs. Par exemple, la cire utilisée en construction routière est peut être obtenue par synthèse de Fischer-Tropsch (FT). Le procédé de Fischer-Tropsch a été développé initialement en 1925 pour ensuite être affiné au cours des dernières années afin de produire la cire utilisée aujourd'hui. De manière générale, le procédé FT consiste en 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 dans ce cas un impact plus réduit que la cire. Ces additifs peuvent donc sensiblement influencer le bilan global.

3.3.4 Critères quantitatifs: Indices performantiels

En plus des données relatives à l'inventaire du cycle de vie (émissions, énergie, coûts énergétiques), un critère quantitatif relatif aux performances mécaniques des enrobés est ajouté. Nous décrivons ci-dessous les principes de base de ce critère performantiel.

Critères performantiels considérés

Les performances mécaniques jouent un rôle important dans un processus décisionnel, elles influencent les opérations de maintenance et donc les coûts futurs pour le gestionnaire.

Les performances sont évaluées sur l'enrobé elle elles concernent en général une série limitée de processus unitaires (par ex. fabrication et pose). 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 (traction indirecte) 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 diminué 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 ou de liaison, les performances suivantes ont été sélectionnées sur la base des sollicitations subies par la couche et des particularités relatives aux procédés tièdes:

- 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 dans les couches bitumineuses profondes, ceci 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 et la fatigue ne deviendrait alors plus un critère déterminant.

Avant l'établissement des indices, une vérification préliminaire du seuil d'acceptabilité des performances est proposée 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 ensuite 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 d'informations. Nous considérons donc les indices bruts suivants :

- Sensibilité à l'eau : L'indice brut de la sensibilité à l'eau est le ratio ISTR, 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 est à minimiser.
- Résistance à la fatigue : L'indice brut est le niveau de déformation ε_6 soit la déformation conduisant à la rupture de l'éprouvette par fatigue après 1 million de chargements et sous certaines conditions (10 °C, 25 Hz). Sa valeur est à maximiser. Notons que 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.

Indice normalisé

En raison de ses échelles et unités variables selon la performance, l'indice brut ne peut être utilisé à tous les niveaux de l'analyse multicritère qui sera détaillée par la suite. En effet, 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 25.

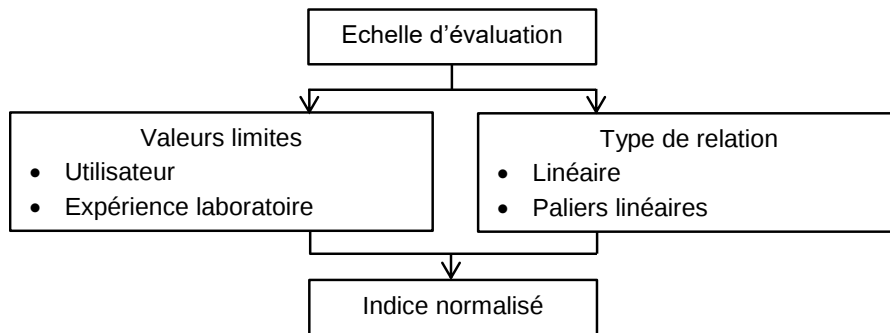


Fig. 25 Procédure de détermination de l'indice normalisé pour une performance donnée

Conformément aux recommandations de [53], l'indice normalisé est finalement calculé selon une échelle d'évaluation allant de 1 à 5, la note de 1 correspond à un comportement mécanique "très mauvais", mais respectant le seuil d'acceptabilité alors que la note de 5 correspond à un comportement "très bon" (2=Mauvais, 3=Moyen, 4=Bon). Lorsque la valeur est inférieure au seuil limite, la note de 0 est alors attribuée.

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 indiquées ci-après, ces valeurs étant des données par défaut pouvant en tout temps être modifiées par l'utilisateur du modèle :

- Sensibilité à l'eau (paramètre : ratio ITSR)
 - Très mauvais (note=1) : La norme SN 640-431-1-NA [1] fixe le seuil d'acceptabilité à 70%. Au vu de l'expérience acquise depuis l'établissement de la norme, cette valeur semble (trop) conservatrice. Pour cela, le ratio de 80% est fixé comme valeur limite du comportement très mauvais.
 - Moyen (note=3) : Un comportement moyen est assimilé à ITSR=86%.
 - Très bon (note=5) : Le ratio maximal théorique est de 100%.
- Résistance aux déformations permanentes (paramètre : profondeur d'ornièr à 30'000 cycles)
 - Très mauvais (note=1) : Un comportement très mauvais est assimilé à un enrobé présentant 10% d'ornièr soit un comportement à la limite d'acceptabilité au sens de la normalisation SN 640-431-1-NA [1].
 - Moyen (note=3) : La norme SN 640-431-1-NA [1] 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. 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'ornièr de 7%.
 - Très bon (note=5) : La profondeur d'ornièr étant à minimiser, la valeur seuil est fixée à 0%.
- Résistance à la fatigue (paramètre: ϵ^6 selon essai 2PB-TR)
 - 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). 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 [54].
 - 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 à l'utilisateur pour le calcul de l'indice normalisé (exemple dans la figure 26):

- 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 une linéarité de la dégradation entre le comportement le meilleur et le moins bon.
- 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 et 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).

Etant donné l'incertitude relative à ces lois d'évaluation ainsi que les différences relativement faibles entre les paliers, des relations plus complexes ne semblent pas adéquates.

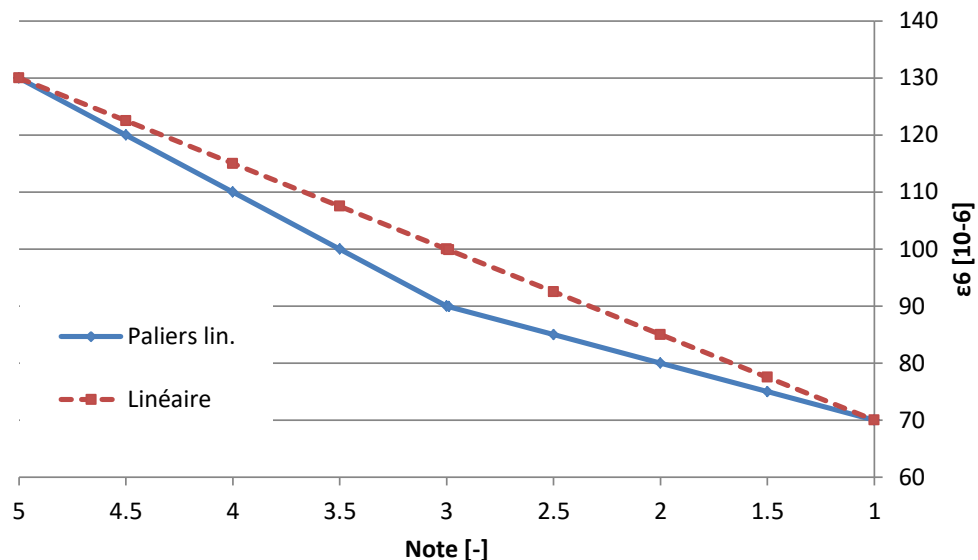


Fig. 26 Exemple de paliers d'interpolation pour le calcul de l'indice normalisé (fatigue)

Comme il le sera détaillé dans la suite, ces indices normalisés seront utilisés aux deux premiers niveaux de l'évaluation multicritère.

3.3.5 Critères qualitatifs

En plus des critères relatifs au cycle de vie et aux performances mécaniques des enrobés, il a été choisi d'intégrer à la méthodologie des critères relatifs à des aspects qualitatifs.

Deux critères qualitatifs ont été intégrés. Le premier critère concerne la complexité du processus de fabrication au poste d'enrobage. Ce critère doit donc indirectement permettre de traduire le "risque" au poste d'enrobage lors de la fabrication d'un enrobé tiède. Une technologie nécessitant de nombreuses modifications du poste ainsi que de multiples points de contrôle présentera en effet un risque plus élevé qu'une technologie n'impliquant aucune modification de la centrale. L'échelle d'évaluation proposée pour ce critère est présentée dans la figure 27.

Paramètre d'évaluation	Echelle qualitative	Note	Commentaires
Processus de fabrication en centrale	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	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	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	

Fig. 27 Critère "complexité du processus de fabrication": Echelle d'évaluation

Les limites de l'inventaire du cycle de vie état définies à la fin du processus de pose; le recyclage éventuel des enrobés n'est donc pas pris en compte dans l'ICV. L'ajout d'un indicateur relatif au potentiel de recyclabilité représente, pour l'enrobé évalué, s'il sera ou non un "bon" matériau de recyclage. L'échelle d'évaluation ainsi que les différents paramètres d'appréciation pour ce critère sont présentés dans la figure 28.

Paramètre d'évaluation	Echelle qualitative	Note	Commentaires
Additifs utilisés	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	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	Aucun	6	Echelle non-linéaire.
	1 cycle	2	
	Plus de 1 cycle	0	

Fig. 28 Critère "potentiel de recyclabilité": Echelle d'évaluation

Relevons finalement que la méthodologie implémentée permet à l'utilisateur de modifier en tout temps les différents paramètres des critères qualitatifs.

Pour le calcul de la note d'un des critères qualitatifs ci-dessus, la moyenne géométrique pondérée (moyenne quasi linéaire [58]) des sous-critères est utilisée au lieu de la moyenne arithmétique. Ce calcul permet d'éviter le risque de compensation inhérent à la moyenne arithmétique. La moyenne géométrique pondérée est calculée avec la relation suivante (note x , pondération ω) :

$$\bar{x} = \prod_{i=1}^n x_i^{\omega_i}$$

3.3.6 Synthèse partie 1 du modèle

La première partie du modèle multicritère détaillée dans ce chapitre 3.3 a pour objectif d'établir les indicateurs de l'inventaire du cycle de vie (énergie, émissions, coûts) ainsi que les indicateurs performantiels (indice brut et indice normalisé) et indicateurs qualitatifs (potentiel de recyclabilité, complexité du processus de fabrication). Ainsi, chaque variante (*i.e.* enrobé bitumineux) sera alors évalué pour l'ensemble des critères choisis. Les résultats de cette évaluation, appelés également matrice de performance, constituent alors les données de base à utiliser dans la seconde partie du modèle traitant de l'analyse multicritère.

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 proposée et implémentée. Différentes sources de données sont finalement proposées à l'utilisateur qui pourra également, s'il le souhaite, utiliser ses propres données.

Il est finalement intéressant de relever que les critères proposés peuvent être modifiés dans le modèle implémenté, de même que les règles d'évaluation pour les critères qualitatifs et quantitatifs. Cette flexibilité du modèle est un prérequis, l'objectif consistant ici à démontrer les apports de la méthodologie proposée.

3.4 Partie 2: Evaluation multicritère

Dans la première partie du modèle (chapitre 3.3), l'inventaire du cycle de vie et l'établissement des indices de performances et indices qualitatifs ont été expliqués. Les différents indicateurs issus de cette première partie (évaluation de chaque variante par rapport à l'ensemble des critères) constituent les données d'entrée pour la seconde partie du modèle discutée dans le présent chapitre. Le modèle global d'évaluation multicritère consiste à proposer différents niveaux d'analyse pour fournir une aide à la décision dans le choix de la technologie d'enrobé. Les différentes étapes de définition du modèle d'évaluation multicritère sont détaillées dans ce chapitre:

- Positionnement de la problématique et réflexions générales sur l'aide à la décision (chapitre 3.4.1).
- Descriptif des principales familles de méthodes d'aide à la décision (chapitre 3.4.2).
- Choix de méthodes dans le contexte du présent projet de recherche (chapitre 3.4.3).
- Détails relatifs aux méthodes choisies (chapitre 3.4.4 et 3.4.5).
- Synthèse de la méthodologie globale d'évaluation (chapitre 3.4.6).

3.4.1 Contexte et problématique

Le développement du modèle multicritère d'aide à la décision est l'une des contributions principales de cette recherche. En effet, 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 considération d'autres critères, telles que les performances mécaniques, et proposent par la suite une aide à la décision pour le choix de la variante la plus adaptée. Ce manque de support dans l'aide à la décision est lié d'une part à une hypothèse de performances équivalentes des différents enrobés, mais également 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 doit finalement offrir une vue globale de la technologie et permettre d'affiner le processus de décision pour finalement encourager l'innovation.

Les premières réflexions sur l'aide à la décision se situent peu avant la seconde guerre mondiale, dans le domaine militaire. À 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 [55,

58]. La différence avec les méthodes d'algorithme unicritère appliquées jusqu'alors est importante. [56] 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.
- 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 ou MADM multi attribute decision making) 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 projet, les méthodes multicritères semblent les plus adaptées à fournir un appui dans le processus de décision.

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. Il faut également garder à l'esprit que, par définition, l'aide à la décision est un processus subjectif [57] pour lequel on tente au-travers des différentes méthodes de diminuer cette subjectivité, mais il en subsiste toujours une certaine partie. La subjectivité reflète notamment le système de valeurs du décideur et des intervenants et elle conditionne la décision finale. Il est finalement important de dissocier ces aspects objectifs des aspects subjectifs qui peuvent être les hypothèses relatives à la méthode choisie ou la matrice de performances des variantes.

Afin de faciliter la compréhension de la suite, nous définissons la terminologie suivante:

- Variante / action potentielle / scénario: Eléments faisant l'objet de l'analyse multicritère. Dans le cadre de cette recherche il s'agit donc des enrobés bitumineux.
- Critères: Eléments 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.
- Utilité: Par analogie avec le monde économique, on comprendra que l'utilité caractérise une mesure de la satisfaction relative.

3.4.2 Méthodes multicritères d'aide à la décision

Un problème multicritère est difficile à traduire en équations mathématiques. De manière très générale, un processus d'aide multicritère à la décision pourra être décomposé en cinq étapes successives et indépendantes, le processus pouvant être itératif [57]:

- Etape 1 - Inventorier les variantes (actions potentielles): Cette liste n'est pas nécessairement exhaustive et définitive; elle peut évoluer au cours du processus.
- Etape 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. Les critères ainsi choisis dans la première partie du modèle doivent respecter ces conditions.
- Etape 3 - Pondérer les critères: Cette phase consiste à introduire la subjectivité (appelée également préférence) notamment lors de la pondération. Ne pas utiliser de pondération est une subjectivité implicite.
- Etape 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. La pondération peut aussi y être répertoriée.
- Etape 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.

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 décrites plus loin. Partant d'un problème multicritère, les méthodes d'agrégation complète le ramènent donc 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.

Les méthodes d'agrégation complète présentent également la particularité d'autoriser la compensation des jugements et la transitivité entre les différents critères (on parle d'agrégation complète transitive). 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" alors que la relation "vaut le double de" n'est pas nécessairement transitive. 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. Parmi les méthodes d'agrégation complète les plus courantes, nous pouvons relever:

- 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.
- 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 simultanément. La préférence du décideur est donc désagrégée. Cette méthode nécessite une certaine interaction entre le décideur et le chercheur.
- 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. 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 [57].
- Moyenne arithmétique, moyenne géométrique, médiane, ...
- Analyse coût-bénéfice (ACB).
- Monétarisation.

On pourra recommander les ouvrages [55, 56, 57, 58] pour plus de détails et d'autres propositions de méthodes.

Agrégation partielle

Les méthodes d'agrégation partielle sont développées par les tenants de l'école dite "européenne". [57] 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 comparativement aux méthodes d'agrégation complète. 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 ainsi que l'intransitivité. 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. De plus, comme la méthode procède à une comparaison des variantes par paires, le nombre d'opérations à réaliser peut s'avérer considérable; ce qui devrait selon toute vraisemblance ne pas être un problème majeur étant donné les outils de calculs actuellement à disposition.

Les méthodes d'agrégation partielle sont fréquemment utilisées dans les projets de gestion environnementale, quelques exemples étant proposés dans [56]. Dans le domaine routier, ces méthodes sont par exemple utilisées pour l'aide à la décision dans le choix de variantes de tracé [59], mais pas à notre connaissance dans des processus de choix de technologie d'enrobage.

Parmi les méthodes d'agrégation partielle, nous pouvons citer les suivantes:

- 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 [58].
- Qualiflex : Cette méthode datant de 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. Cette idée est exploitée dans une procédure basée sur différents classements et non pas sur la comparaison entre deux variantes. Le nombre de possibilités à prendre en compte peut rapidement exploser avec ce type de méthode [57].
- 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).
- 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 ordinale 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 [58].
- 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.

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. Plus de détails sur cette famille de méthodes multicritères pourront être trouvés dans [57, 58].

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. [60] propose un exemple d'application dans le domaine des 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.

Par exemple, 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 [58]. La représentation de Pareto consiste à tracer graphiquement les différentes performances (un axe par critère) pour identifier les points non-dominés. L'ensemble des solutions efficaces (Pareto optimales) comprend alors les solutions intéressantes du point de vue multicritère *i.e.* les points non dominés dans l'espace des critères. La solution optimale peut être cependant difficile à identifier et complexe à représenter dans le cas de nombreux critères. 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 29).

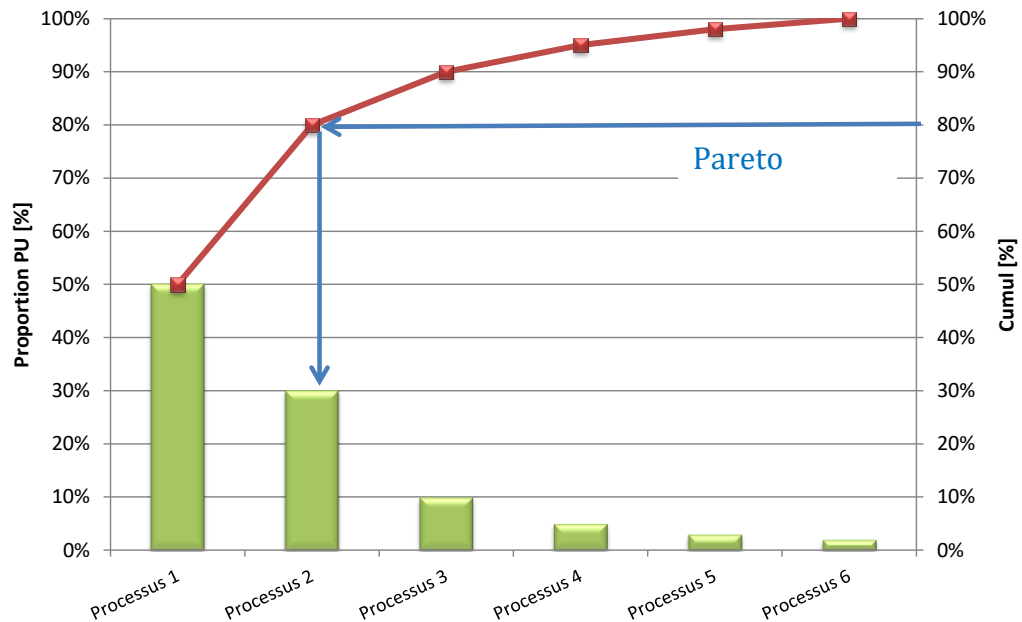


Fig. 29 Illustration de représentation de la loi de Pareto

3.4.3 Choix des méthodes

Après avoir décrit les familles de méthodes multicritères d'aide à la décision, il est maintenant nécessaire de proposer une sélection de méthodes pouvant être appliquée dans le contexte du projet PLANET relatif à l'aide à la décision dans le choix de la technologie d'enrobage.

Le choix des méthodes n'est pas univoque; [58] rapporte d'ailleurs qu'« *il n'y a pas de méthode idéale, mais il existe peut-être des méthodes plus satisfaisantes (ou moins mauvaises) que d'autres* ». [56] indique quant à lui que le choix de la méthode doit 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. Des applications dans le domaine global des chaussées routières peuvent cependant être trouvées:

- Dans la thèse [59] relative au choix entre variantes de tracés routiers, l'auteur mentionne que « ... il n'y a pas de méthode multicritère parfaite et idéale ... la méthode d'agrégation partielle est la plus adaptée au projet routier ».
- Lors d'un workshop sur la thématique, [13] 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.
- Dans son travail sur l'utilisation de matériaux alternatifs dans les chaussées [61] utilise une agrégation complète par pondération technique d'indicateurs partiels.

Sur la base de ces considérations, il est proposé une analyse en différents niveaux progressifs, ce qui présente 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; la méthode étant détaillée au chapitre 3.4.4.

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 choisie. Pour le traitement de l'incertitude des données, [62] suggère 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 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 théorie 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. Cette méthode sera détaillée au chapitre 3.4.5.

Une vue comparative globale entre les méthodes d'agrégation partielle et d'agrégation complète sélectionnées est proposée dans le Tab. 5, ces méthodes étant détaillées dans la suite du chapitre.

Tab. 5 Comparatif entre les méthodes d'agrégation partielle et complète sélectionnées

	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)

3.4.4 Agrégation partielle (méthode Electre III)

Nous décrivons dans ce chapitre les notions de base relatives à la méthode d'agrégation partielle choisie. Pour davantage de détails, on pourra recommander la lecture de [4] dont les éléments ci-après sont repris, ou alors de la littérature spécialisée mentionnée en bibliographie.

Les bases de la méthode multicritère Electre (Elimination et choix traduisant la réalité) sont détaillées dans l'ouvrage [53] qui reprend les développements de B. Roy [63, 64]. 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 qui est une relation binaire qui porte sur des couples de deux actions.
- L'agrégation qui est la méthode permettant d'obtenir des informations sur une préférence globale entre deux actions, à partir des préférences pour chaque critère individuellement.

Différentes versions d'Electre existent, ces versions se distinguant notamment par la façon dont le problème est posé (problématique) et les résultats fournis par la méthode. Le choix de la méthode va donc dépendre de la problématique étudiée (formulation du problème). Selon [53], Electre différencie les problématiques suivantes:

- α : Cette problématique consiste à éclairer la décision en proposant 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 donc 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 à priori, les classes se définissent ici par les actions qu'elles contiennent.

Parmi les différentes méthodes Electre, il a été choisi d'appliquer dans le cadre de notre recherche la méthode Electre III qui relève de la problématique de classement γ . Les raisons principales sont les suivantes:

- 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. Le critère flou permet de traduire le caractère incertain des données d'évaluation des critères et donc de la matrice de performance. 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. 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.

Nous détaillerons dans la suite de ce chapitre les principes de base inhérents à la méthode Electre III.

Terminologie et notions de base

Plusieurs termes étant récurrents, nous définissons ici les éléments nécessaires à la bonne compréhension des bases théoriques qui suivent. Les définitions suivantes sont appliquées:

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 également appelées variantes.
- $C=\{c_1, c_2, \dots, c_j, \dots, c_m\}$ famille des critères. On relèvera la distinction entre la famille des critères C et les indices de concordance C_{ik} utilisés plus loin.
- $g_j(a_i)$ évaluation de l'action a_i par rapport au critère j (i.e. performance).
- P_j pondération (importance relative) du critère j .

Un critère est défini comme une expression qualitative ou quantitative permettant de juger les conséquences (ou performances) d'une variante. Il est par définition associé à une échelle ordinale (bon, moyen, mauvais,...) ou cardinale (MJ, Francs, kg CO₂, ...) et il dispose d'un sens de préférence (minimisation ou maximisation). Afin de simplifier l'étude, nous considérons dans la suite que les critères sont à maximiser. Pour cela, les performances des critères à minimiser seront multipliées par (-1). Le choix des critères doit être cohérent, la cohérence devant selon [57] être vérifiée par le respect des conditions suivantes:

- 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.

Pour la définition de la pondération, différentes méthodes existent [65, 66, 67], méthodes principalement applicables dans le cas de nombreux acteurs participant à l'évaluation. [53] propose quant à lui les méthodes suivantes:

- 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. Par exemple, la méthode de Simos [68, 69] basée sur un classement de cartons contenant chacun exclusivement le nom d'un critère est fréquemment utilisées. Le principe consiste à ajouter des cartons blancs 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 permettant ensuite de calculer une pondération selon une méthode précise.
- 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.
- Pas de pondération : Partant du principe qu'aucun critère n'est prépondérant ou négligeable, on peut alors utiliser une méthode sans pondération.

Le principe de base d'Electre est le suivant [57] : 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, la méthode d'agrégation partielle Electre III fait appel à la notion de concordance et à la notion de discordance. Il vient les notions de base 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.

Electre III

Nous décrivons ici les bases théoriques de la méthode Electre. Pour des renseignements plus détaillés, on pourra proposer de consulter le rapport [4] ou la littérature spécialisée dont [53, 64].

La méthode Electre III a pour objectif de classer les actions potentielles (variantes) depuis la meilleure jusqu'à la moins bonne. Le principe général est identique aux autres méthodes de la famille Electre soit 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 est possible de distinguer deux types de critères avec chacun ses particularités:

- Critères francs: La comparaison de deux variantes par rapport à un critère c_j peut présenter trois situations soit "indifférence", " a_i préférée à a_k " ou " 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 significative.
- Critères flous (ou pseudo-critères): 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.

Electre III utilise la notion de critère flou pour les notions de surclassement, en lieu et place de critères francs. Ainsi, la méthode introduit deux seuils supplémentaires:

- 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 entre deux variantes (pour un critère donné). Ainsi, le nombre de situations possibles lors de la comparaison de deux variantes a_i et a_k n'est plus de 3 comme dans le cas de critères francs mais de 5. La notion de préférence faible fait son apparition. Ceci est traduit par le degré de crédibilité du surclassement qui varie entre 0 et 1. Les différentes situations de classement entre deux variantes sont schématisées dans la figure 30 où nous pouvons bien évidemment observer que $q_j \leq p_j$.

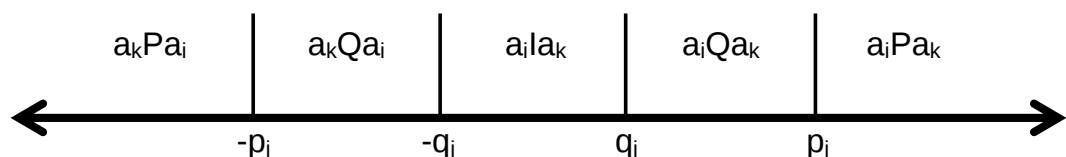


Fig. 30 Schématisation de la situation relative entre deux variantes a_i et a_k dans le cas de critères flous (repris de [57])

La définition des seuils p et q peut être réalisée soit avec une constante ou alors avec une fonction relative à l'action a_i considérée. Dans le cadre de notre étude, les seuils seront définis par des constantes propres à chaque critère c_j .

Dans la concrétisation de la notion de discordance, un troisième seuil appelé seuil de veto v_j 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. Selon [54], 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 ». 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 et par définition il vient: $q_j \leq p_j < v_j$

La méthodologie générale de la méthode Electre est schématisée dans la figure 31, quelques détails étant fournis dans la suite du chapitre.

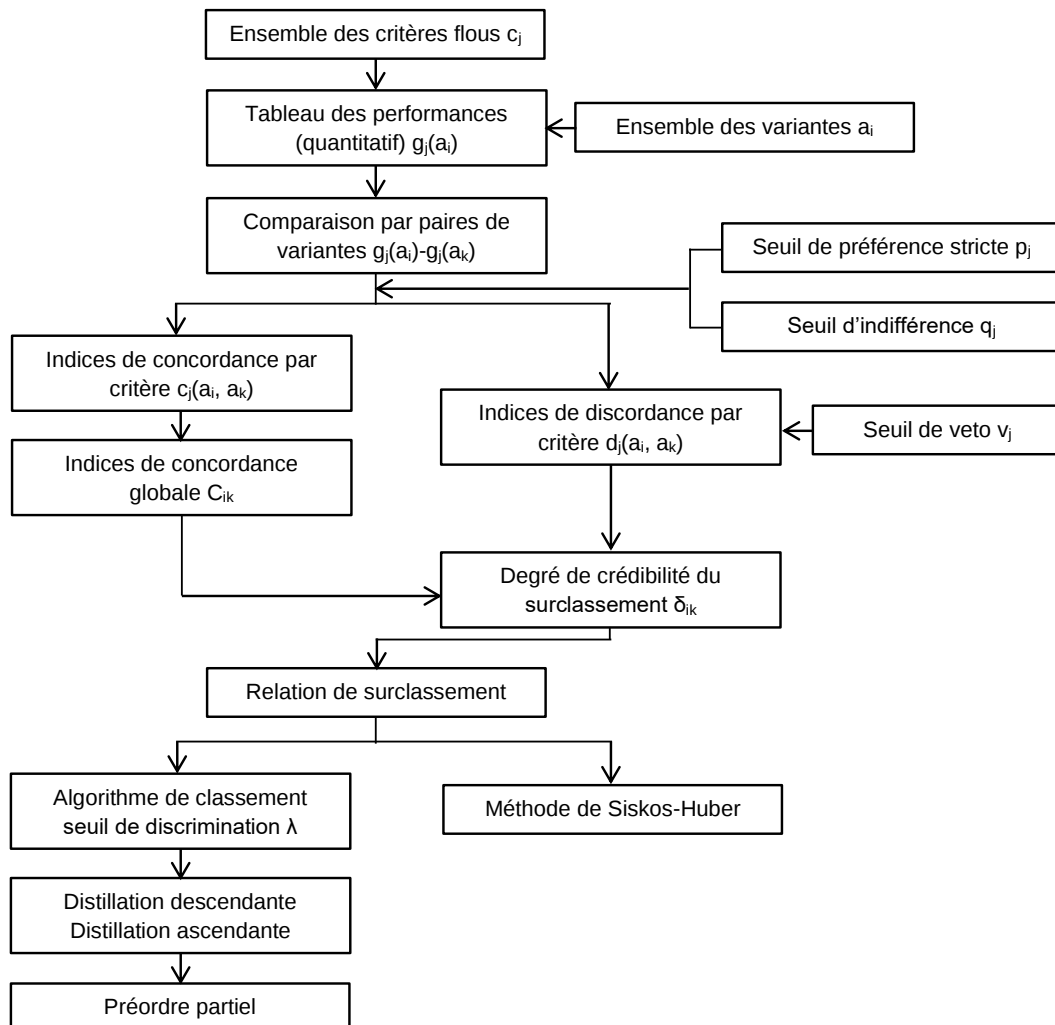


Fig. 31 Démarche générale méthode Electre III

La méthode Electre II peut être décomposée en différentes phases;

Phase 1: Construction du tableau de performances

Dans un premier temps, le tableau de performances (appelé également 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, tant des critères qualitatifs que quantitatifs pouvant être considérés; les critères qualitatifs devant cependant être préalablement convertis en valeurs numériques.

Il est important de renseigner le sens de préférence des critères *i.e.* quels sont les critères à maximiser et quels sont les critères à minimiser. Comme indiqué précédemment, nous choisissons de un système où l'ensemble des critères sont à maximiser.

Phase 2: Etablissement des indices de concordance

Electre III fait appel à deux indices pour la concordance :

- L'indice de concordance par critère $c_j(a_i, a_k)$ renseigne 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 globale C_{ik} exprime si l'hypothèse de départ " a_i surclasse a_k " concorde avec la réalité représentée par les évaluations des actions.

L'indice de concordance par critère $c_j(a_i, a_k)$ est défini de la manière suivante, ceci pour chaque couple d'actions (a_i, a_k) :

$$c_j(a_i, a_k) = 0 \quad \leftrightarrow \quad p_j < g_j(a_k) - g_j(a_i)$$

$$0 < c_j(a_i, a_k) < 1 \quad \leftrightarrow \quad q_j < g_j(a_k) - g_j(a_i) \leq p_j$$

$$c_j(a_i, a_k) = 1 \quad \leftrightarrow \quad g_j(a_k) - g_j(a_i) \leq q_j$$

Lorsque $0 < c_j(a_i, a_k) < 1$, nous pouvons alors calculer l'indice de concordance par critère par interpolation linéaire:

$$c_j(a_i, a_k) = \frac{g_j(a_i) + p_j - g_j(a_k)}{p_j - q_j}$$

La représentation des différents indices de concordance par critère permet de construire la matrice de concordance par critère.

Sur la base des indices de concordance par critère $c_j(a_i, a_k)$, l'indice de concordance globale C_{ik} est ensuite calculé:

$$C_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^m P_j \cdot c_j(a_i, a_k)}{\sum_{j=1}^m P_j} \text{ avec } C_{ij} = [0 \dots 1]$$

Un indice de concordance globale est donc calculé pour chaque couple (a_i, a_k) , indice regroupant l'évaluation selon les différents critères. Le regroupement des indices de concordance globale pour chaque couple de variantes permet finalement d'établir la matrice de concordance globale.

Phase 3: Etablissement de l'indice de discordance

La notion de discordance a pour objectif d'affaiblir la relation de concordance. 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 et il est défini ainsi :

$$d_j(a_i, a_k) = 1 \quad \leftrightarrow \quad v_j < g_j(a_k) - g_j(a_i)$$

$$0 < d_j(a_i, a_k) < 1 \quad \leftrightarrow \quad p_j < g_j(a_k) - g_j(a_i) \leq v_j$$

$$d_j(a_i, a_k) = 0 \quad \leftrightarrow \quad g_j(a_k) - g_j(a_i) \leq p_j$$

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 permettant de calculer une matrice de discordance 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 calculées. Dans Electre III, les relations de surclassement sont établies entre deux variantes. 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 donc 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 [53].

On peut relever deux cas particuliers:

- 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

La relation de surclassement floue est traduite par le degré de crédibilité du surclassement δ_{ik} déterminé dans la phase précédente. Différentes méthodes existent afin d'exploiter cette relation de surclassement floue finalement proposer un classement des variantes. Nous présentons ci-dessous 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. Compte tenu de la part d'arbitraire dans le calcul du degré de crédibilité 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, un seuil de discrimination $s(\lambda)$ est introduit. L'algorithme finalement proposé dans Electre III consiste à réaliser un processus itératif avec un sous-ensemble d'actions toujours plus réduit pour finalement construire deux pré-ordres différents appelés distillations (descendante et ascendante) dans lesquels les actions seront classées. L'algorithme pour la réalisation de la distillation peut être long à exécuter selon le nombre de critères et de variantes étudiés. Pour la mise en application 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 32, différentes représentations des résultats pouvant être utilisées. 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. Le préordre partiel final est ensuite construit par l'intersection au sens mathématique des résultats des distillations descendante et ascendante.

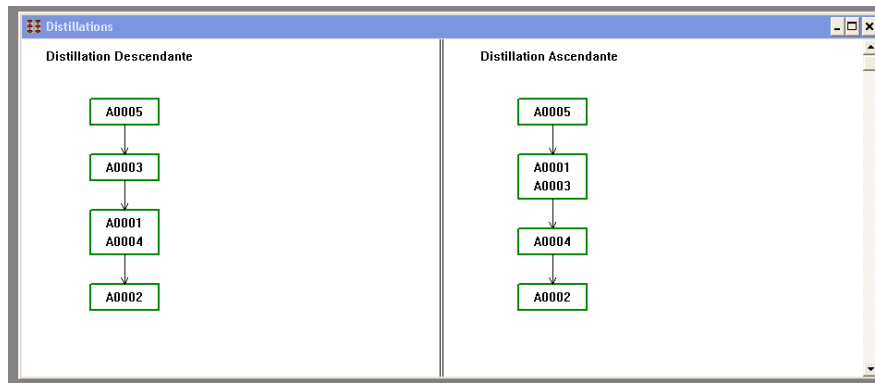


Fig. 32 Exemple de résultats de distillations avec Electre III (version 3.1b)

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 a_i , le calcul du degré de non-dominance $\mu^{ND}(a_i)$ de l'action par les autres actions:

$$\mu^{ND}(a_i) = 1 - \max (\delta_{ki} - \delta_{ik}) \quad a_k \in A$$

Ensuite, plus le degré de non dominance est élevé, et plus l'action a_i sera préférée par rapport aux autres actions. Cette seconde méthode de classement des variantes est directement implémentée dans le modèle PLANET. Relevons encore que légères différences peuvent apparaître selon la méthode de classement appliquée.

Phase optionnelle: Analyse de robustesse

Une fois le classement établi, il est courant de procéder à une analyse de robustesse de la solution; analyse qui peut 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

Dans l'analyse de sensibilité, les calculs sont répétés en faisant varier les différents paramètres, afin d'examiner la stabilité du classement de base obtenu. Les résultats de l'analyse de sensibilité servent de base pour l'analyse de robustesse dans laquelle 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.

3.4.5 Agrégation complète (théorie de l'Evidence)

Nous décrivons dans ce chapitre les notions de base relatives à la méthode d'agrégation complète choisie soit la théorie de l'Evidence (Evidential Reasoning – ER) utilisée dans un contexte d'aide à la décision multicritère (multiple-attribute decision making MADM). Pour davantage de détails, on pourra recommander la lecture de [4] dont les éléments ci-après sont repris, ou alors de la littérature spécialisée mentionnée en bibliographie.

Par extension, nous parlons ici de "théorie de l'Evidence" mais il s'agit en réalité d'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.

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 [55, 70, 71].

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 ci-après 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 tout en représentant parfaitement ce qui est déjà connu.

Le principe consiste à travailler sur un référentiel de base, composé de l'ensemble des hypothèses, sur lequel différents traitements seront effectués. Pour l'application de la théorie de Dempster-Shafer, les fonctions suivantes, détaillées par la suite, doivent être introduites:

- Fonction de masse (ou masse d'évidence/de probabilité),
- fonction de crédibilité,
- fonction de plausibilité.

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:

$$D=\{H_1, H_2, \dots, H_N\}$$

L'exhaustivité du cadre de discernement est un désavantage potentiel de la méthode et c'est pourquoi des théories dérivées avec cadre de discernement non-exhaustif ont également été développées.

A partir du cadre de discernement D , on en déduit l'ensemble E (également appelé 2^D), des parties A de D telles que :

$$E=2^D=\{A|A\subseteq D\}=\{\emptyset, \{H_1\}, \{H_2\}, \dots, \{H_N\}, \dots, \{H_1 \cup H_2\}, \dots, D\}$$

E contient l'ensemble des 2^N-1 sous-ensembles A de D et 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 E ; 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 et 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 Cr 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 Pl 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 (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.

Descriptions générale de l'algorithme ER modifié

La procédure d'aide à la décision mise en place par le Prof. Yang est donc basée sur la théorie de l'Evidence (théorie de Dempster-Shafer) décrite ci-dessus, théorie qui est combinée avec 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 comme dans le cas de l'agrégation partielle décrite précédemment. Ceci peut parfois être difficile à appliquer et attribuer une note est déterministe et suppose la certitude de l'affectation de la note. En réalité, plusieurs notes pourraient être affectées à un critère donné, 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.

Nous décrivons ici les concepts de base, de plus amples informations pouvant être trouvées dans [72, 73, 74, 75]. Les raisons motivant le choix de la théorie de Dempster-Shafer sont principalement les suivantes:

- 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. Dans cette méthode, la probabilité non assignée à une hypothèse est considérée comme une incertitude.

Une vue générale de la procédure d'analyse multicritère par agrégation complète est proposée dans la figure 33, les éléments étant détaillés dans la suite de ce chapitre.

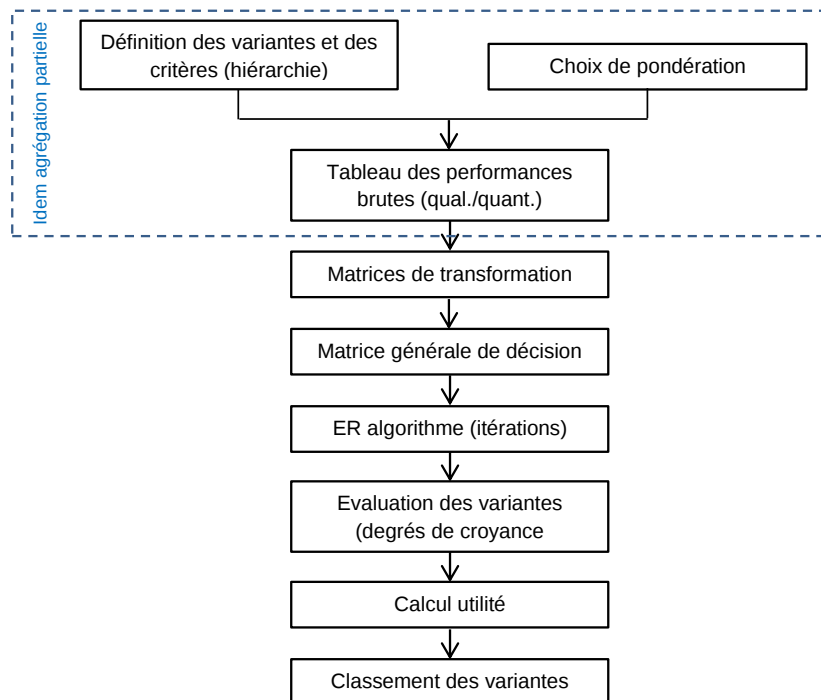


Fig. 33 Vue générale procédure d'évaluation multicritère par agrégation complète

Nous pouvons globalement distinguer trois phases critiques:

- 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.

Création matrice de décision

La matrice générale de décision (decision matrix) 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 . Afin d'illustrer cela, un exemple de matrice de décision est proposé dans la figure 34 où la matrice contient les variantes (types de motos) ainsi que, pour chaque critère, l'évaluation accordée aux variantes. Les degrés d'évaluation H_n considérés dans cet exemple sont 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)

Fig. 34 Exemple de matrice de décision [74]

La détermination de la matrice de décision s'effectue en appliquant des matrices de transformation au tableau de performances brutes (tableau contenant les résultats bruts des évaluations, également utilisé dans 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 peut être faite selon différentes techniques, une méthode basée sur des "règles" (rule based) étant proposée ici [73].

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.

Pour un critère relatif à l'énergie, on pourra par exemple postuler les N degrés d'évaluation H_n suivants: 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 :

$$h_{n,i} \in H_n \quad (n=1, \dots, N)$$

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 :

$$S_i(h_j) = \{(h_{n,i}, \beta_{n,j}), n=1, \dots, N\}$$

$$\text{Avec} \quad \beta_{n,j} = \frac{h_{n+1,i} - h_j}{h_{n+1,i} - h_{n,i}} \quad \beta_{n+1,j} = 1 - \beta_{n,j} \quad \text{si } h_{n,i} \leq h_j \leq h_{n+1,i}$$

$$\beta_{k,j}=0 \text{ pour } k=1, \dots, N \text{ et } k \neq n, n+1$$

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 également utilisée, ceci selon le même principe.

Algorithme de la théorie de l'Evidence

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.

La problématique traitée par cet algorithme peut être illustrée ainsi: Soit une matrice de décision fournissant 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 des résultats de deux types :

- La force de freinage est bonne (30% sûr) ou moyenne (60% sûr)
- 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% et 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.

Le détail de l'algorithme est fourni en Annexe au présent rapport de même qu'un exemple de calcul (repris de [4]), les différentes considérations théoriques étant issues de [74].

Calcul de l'utilité et classement des variantes

Une fois l'algorithme de théorie de l'Evidence appliqué, le résultat se présente sous la forme de la masse de probabilité (degré de croyance β) assigné à chaque degré d'évaluation. Un exemple de résultat est proposé dans la figure 35.

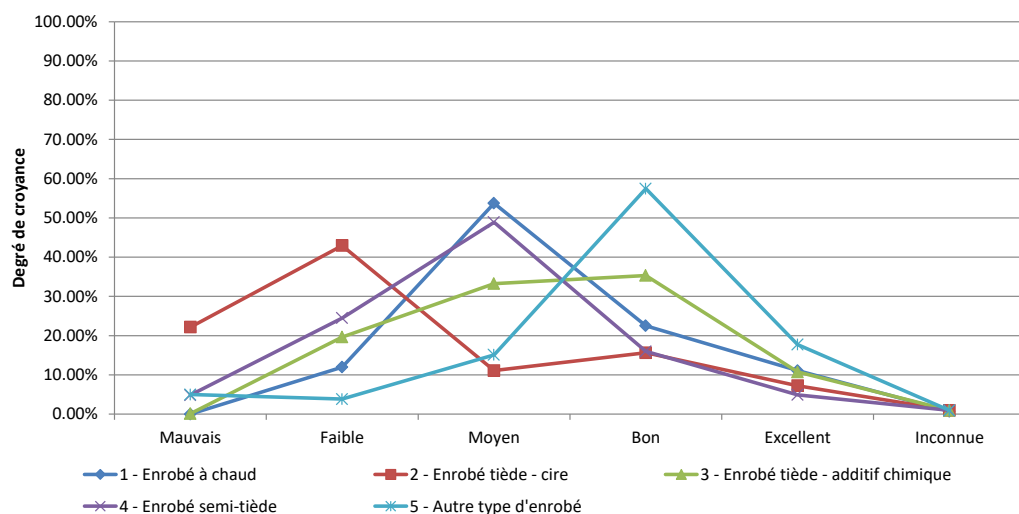


Fig. 35 Exemple de représentation des degrés de croyance en fonction du degré d'évaluation

Comme illustré dans la figure ci-dessus, il est parfois difficile de procéder à un classement des variantes sur la seule base des masses de probabilité. Ainsi, il peut être

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 "u" que l'on définit ci-dessous.

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 proposée consiste à calculer "l'utilité attendue" et permet la prise en considération de 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 soit la valeur minimale, maximale et moyenne :

$$u_{max}(y) = \sum_{n=1}^{N-1} \beta_n u(H_n) + (\beta_N + \beta_H) u(H_N)$$

$$u_{min}(y) = (\beta_1 + \beta_H) u(H_1) + \sum_{n=2}^N \beta_n u(H_n)$$

$$u_{moy}(y) = \frac{u_{max}(y) + u_{min}(y)}{2}$$

Dans le cas où toutes les évaluations sont complètes (pas d'inconnue, $\beta_H=0$), nous obtenons alors $u_{max}(y) = u_{min}(y) = u_{moy}(y)$.

Le classement entre les variantes est ensuite effectué par comparaison des différentes utilités et il vient:

- 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 la relation suivante [75]:

$$P(a_i > a_k) = \frac{\max[0, u_{max}(a_i) - u_{min}(a_k)] - \max[0, u_{min}(a_i) - u_{max}(a_k)]}{[u_{max}(a_i) - u_{min}(a_i)] + [u_{max}(a_k) - u_{min}(a_k)]}$$

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 imposées. On distinguera ensuite les fonctions d'utilité linéaires et non-linéaires selon les applications.

3.4.6 Synthèse de la méthodologie d'évaluation multicritère

La première partie du modèle, détaillée au chapitre 3.3, a pour objectif l'établissement de la matrice de performances ceci pour l'ensemble des critères et variantes choisies. Les résultats suivants sont donc fournis pour chaque variante:

- Consommation énergétique sur le cycle de vie [MJ/t].
- Emissions dans l'air sur le cycle de vie (kg CO₂,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.
- Evaluation selon les critères qualitatifs de complexité du processus de fabrication et potentiel de recyclabilité.

La méthodologie globale d'évaluation multicritère finalement mise en place est synthétisée dans la figure 36; les différentes phases étant détaillées dans la suite du chapitre.

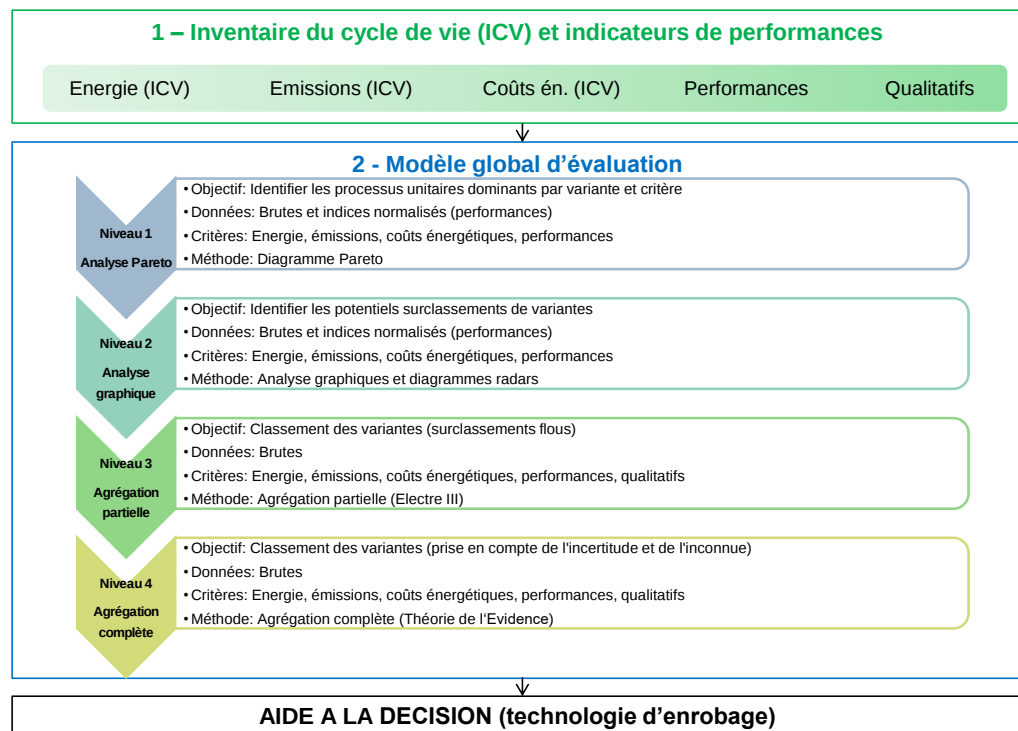


Fig. 36 Vue générale méthodologie d'évaluation multicritère (partie 2)

Le principe du modèle consiste à effectuer différents niveaux d'analyse, chaque niveau amenant sa propre contribution au processus global d'analyse. La complexité des méthodes appliquées est également croissante au fur et à mesure des niveaux d'analyse. Le recours à des méthodes d'aides à la décision ainsi que l'introduction de pondération peuvent parfois donner une (fausse) impression de "boîte-noire" aux utilisateurs et pour cette raison les deux premiers niveaux d'analyse sont importants car ils proposent 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 essentiellement en une analyse graphique. A moins qu'une variante ne surclasse toutes les autres (surclassement complet) pour l'ensemble des critères, ce genre d'analyse graphique sur la base des données brutes est cependant bien souvent insuffisant afin de choisir de manière indiscutable la meilleure variante. Pour cela, le recours à des méthodes avancées d'aide à la décision est requis aux niveaux 3 et 4 de l'analyse.

Dans les niveaux 3 et 4, des méthodes d'aide à la décision sont utilisées soit la méthode d'agrégation partielle décrite au chapitre 3.4.4 et la méthode d'agrégation complète discutée au chapitre 3.4.5. Ces méthodes, initialement développées pour d'autres domaines, sont également applicables au contexte du choix de la technologie d'enrobé. 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, les critères qualitatifs ne pouvant être considérés de manière directe dans les premiers niveaux d'analyse.

Les particularités relatives à chaque niveau d'analyse ainsi que les critères considérés sont finalement résumés dans le Tab. 6.

Tab. 6 Comparatif des différents niveaux de l'évaluation selon le modèle PLANET

	Niveau 1	Niveau 3	Niveau 2	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 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

Nous pouvons observer que les résultats de l'inventaire du cycle de vie (énergie, émission, coûts énergétiques) ainsi que les performances sont considérés à chaque niveau d'analyse. Les émissions n'étant pas directement proportionnelles à la consommation énergétique, ces deux critères ne sont donc pas redondants. Par exemple, pour le processus unitaire du poste d'enrobage, les émissions sont largement dépendantes 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 [10].

4 Implémentation de la méthodologie

La méthodologie détaillée au chapitre 3 a finalement été implémentée dans un modèle global appelé "modèle PLANET". Ce modèle est par ailleurs mis gratuitement à disposition des utilisateurs (contacter les auteurs du rapport).

L'implémentation du modèle a été effectuée dans MS-Excel, avec programmation Visual Basic (VBA) pour certains aspects. Il permet de comparer 5 différents enrobés avec les critères détaillés dans le présent rapport. Le choix de la méthode d'implémentation a été effectué afin de garantir la souplesse ainsi qu'une transparence totale de l'outil autorisant également sa modification au gré des modifications éventuelles de critères et/ou du nombre de variantes à comparer. 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.

Nous fournissons ci-après quelques détails relatifs à l'implémentation du modèle, ceci en séparant les deux parties préalablement discutées; parties qui font d'ailleurs l'objet de fichiers séparés.

4.1 Partie 1: Inventaire du cycle de vie

La première partie du modèle contient les onglets suivants :

- Instructions et navigation (figure 37).
- Base de données: Calculs de chauffage des matériaux.
- Base de données: Calcul de chauffage de l'air du malaxeur.
- Base de données: Préparation des granulats en carrière (mesures carrière Suisse).
- Base de données: Mesures en centrale d'enrobage (enquête centrales Suisses [10]).
- Base de données: Données de la littérature (figure 38).
- Calcul des indicateurs: Inventaire du cycle de vie (figure 39).
- Calcul des indicateurs: indicateurs de performances (figure 40).
- Synthèse des résultats pour analyse multicritère.

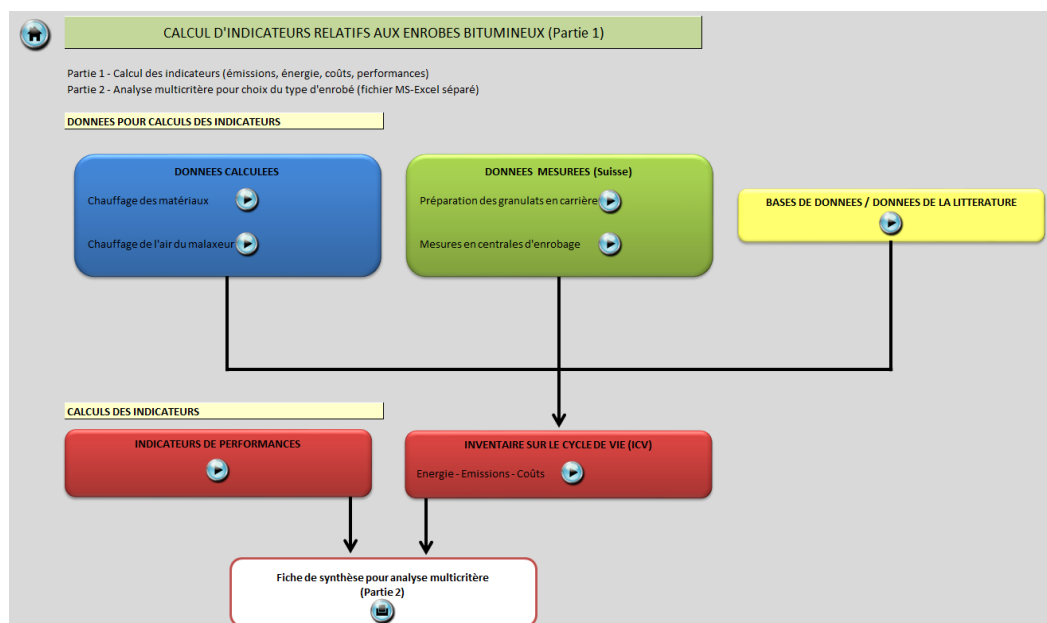


Fig. 37 Modèle PLANET, partie 1: Zone de navigation

Nous pouvons observer dans la base de données qu'une certaine flexibilité est laissée de même que la possibilité d'insérer ses propres sources de données, ceci pour chaque processus unitaire.

BASE DE DONNÉE POUR ICV																					
Légende																					
Données à insérer par l'utilisateur (option)																					
Données calculées sur la base de la consommation énergétique ou des émissions																					
Données issues de la base de données																					
Données reprises de la source																					
N° étape	Processus unitaire	Environ	Détails complémentaires	Unité	Total	Fuel	Char	Ele	Autre	Energie (MJ)	Emissions dans l'air (g/t)	CO2	CH4	N2O	CO2 eq	Coûts énergétiques	Type	Source	Référence	Remarques complémentaires	
1. Matières premières Granulats																					
1A	Extraction des granulats, sable	Tout	Donnée à compléter (1A)	Mt/ha	grs						high	grs				0.00	CH2F	grs		Donnée à compléter	
	Extraction des granulats, sable	Tout	Donnée à compléter (1A)	Mt/ha	grs						high	grs				0.00	CH2F	grs		Donnée à compléter	
1B	Concassage, 10, granulométrie, montage (granulats, sable)	Tout	Donnée à compléter (1B)	Mt/ha	grs						high	grs				0.00	CH2F	grs		Donnée à compléter	
	Concassage, 10, granulométrie, montage (granulats, sable)	Tout	Donnée à compléter (1B)	Mt/ha	grs						high	grs				0.00	CH2F	grs		Donnée à compléter	
1A/B	Production de granulats	Tout	Montage au productif fin, cas BSR (2000)	Mt/ha	grs	38.20	17.00	11.20			high	grs	3.88			1.88	CH2F	grs	Strapex, 10, 2000		
	Production de granulats	Tout	Montage au productif fin, cas BSR	Mt/ha	grs	40.00	12.00	6.64	14.37		high	grs	4.80			5.20	CH2F	grs	ICE v2 2016, 2011		Données issues de mesures moyennes
	Production de granulats	Tout	Montage au productif fin, donnée L2007	Mt/ha	grs	56.00	19.00				high	grs	6.07			6.07	CH2F	grs	Combustion, 2005		Hypothèse sur allocation énergétique
	Production de granulats	Tout	Montage au productif fin, cas BSR (2000)	Mt/ha	grs	38.18	16.99	11.19			high	grs	3.87			1.87	CH2F	grs	Strapex, 10, 2000		Données issues de mesures moyennes
	Production de granulats	Tout	Montage au productif fin, 80 Dams	Mt/ha	grs	10.84	6.04	6.80			high	grs	0.15	0.01	0.00	0.16	CH2F	grs	ICPFO, 2010		Données issues de la 80 Dams
	Production de granulats	Tout	Matériau concassé, typique CH	Mt/ha	grs	12.47		0.17			high	grs	0.78	0.00		1.16	CH2F	grs	Environnement 2.2		Données issues entre 1997 et 2001
	Production de granulats	Tout	Matériau concassé, typique CH	Mt/ha	grs	3.81		0.11			high	grs	0.32	0.00		1.32	CH2F	grs	Environnement 2.2		Données issues entre 1997 et 2001
	Production de granulats	Tout	Donnée utilisateur (1A/B) - Granulats	Mt/ha	grs						high	grs				0.00	CH2F	grs			
	Production de sable	Tout	Du montage au productif fin, cas BSR	Mt/ha	sab	27.00	16.00	11.00			high	sab	1.54			1.54	CH2F	sab	Strapex, 10, 2000		
	Production de sable	Tout	Du montage au productif fin, cas BSR	Mt/ha	sab	8.30	2.15	1.81	0.65		high	sab	0.80			0.80	CH2F	sab	ICE v2 2016, 2011		Données issues de mesures moyennes
	Production de sable	Tout	Du montage au productif fin, 80 Dams	Mt/ha	sab	27.00	18.00	8.00			high	sab	6.88	0.00	0.00	7.88	CH2F	sab	ICPFO, 2010		Données issues de la 80 Dams
	Production de sable	Tout	Donnée utilisateur (1A/B) - Sable	Mt/ha	sab						high	sab				0.00	CH2F	sab			
	Production de filier	Tout	Du montage au productif fin, cas BSR	Mt/ha	fil	0.24	0.02	0.22			high	fil	7.90	0.01		8.13	CH2F	fil	Strapex, 10, 2000		
	Production de filier	Tout	Donnée utilisateur (1A/B) - Filier	Mt/ha	fil						high	fil				0.00	CH2F	fil			
1C	Stockage granulats	Tout	ICP - Consommation d'énergie nulle	Mt/ha	grs	0.00					high	grs	0.00	0.00	0.00	0.00	CH2F	grs	NA		Hypothèse interne
	Stockage granulats	Tout	Donnée utilisateur (1C)	Mt/ha	grs						high	grs				0.00	CH2F	grs			Hypothèse de base - à corriger si nécessaire
2. Matières premières Brutes																					
2A	Forage et extraction pétrole brut	Tout	Broume SGT/70, distillation directe (B)	Mt/ha	brut	2.20		2.20			high	brut	109.82			109.82	CH2F	brut	Recherche	Eurobitume, rap. 99/007	Valeurs moyennes sur une année (192000 t/L), stockage brut à 180°C
	Forage et extraction pétrole brut	Tout	Cas BSR, pétrole Vénétien	Mt/ha	brut	5.78		5.78			high	brut	89.80			89.80	CH2F	brut	Recherche	Strapex, 10, 2001	Cas saoudien (pétrole Vénétien)
	Forage et extraction pétrole brut	Tout	Donnée utilisateur (2A)	Mt/ha	brut						high	brut				0.00	CH2F	brut			
2B	Transport pétrole en Europe	Tout	Broume SGT/70, distillation directe (B)	Mt/ha	brut	0.59	0.59				high	brut	45.94			45.94	CH2F	brut	Recherche	Eurobitume, rap. 99/007	Valeurs moyennes sur une année (192000 t/L), stockage à 180°C
	Transport pétrole en Europe	Tout	Cas BSR, pétrole Vénétien	Mt/ha	brut	0.29	0.29				high	brut	22.20			22.20	CH2F	brut	Recherche	Strapex, 10, 2001	Transport à raffinerie Nantes-Deux
	Transport pétrole en Europe	Tout	Donnée utilisateur (2B)	Mt/ha	brut						high	brut				0.00	CH2F	brut			
2C	Raffinage (production/stockage/transport interne)	Tout	Broume SGT/70, distillation directe (B)	Mt/ha	brut	1.71	0.50	0.17	1.06		high	brut	100.18			100.18	CH2F	brut	Recherche	Eurobitume, rap. 99/007	Valeurs moyennes sur une année (192000 t/L), stockage à 180°C
	Raffinage (production/stockage/transport interne)	Tout	Broume SGT/70, distillation directe (C2)	Mt/ha	brut	4.01	4.00	0.01			high	brut	40.00	0.00	0.00	40.00	CH2F	brut	ICPFO, 2010		Données de raffineries en C2
	Raffinage (production/stockage/transport interne)	Tout	Raffinerie Catalytique et Cœur (C1)	Mt/ha	brut	0.20			0.20		high	brut	205.60	0.04		205.69	CH2F	brut	Environnement 2.2		Requies en 2005, 4.6 mt/L de pétrole brut, fraction de la population
	Raffinage (production/stockage/transport interne)	Tout	Moyenne européenne	Mt/ha	brut	0.11			0.11		high	brut	176.46	0.07		177.89	CH2F	brut	Environnement 2.2		Requies en 2005, 4.6 mt/L de pétrole brut, fraction de la population

Fig. 38 Modèle PLANET, partie 1: Extrait de la base de données

Données à insérer par l'utilisateur

Instructions complémentaires

Données reprises de la source

Données calculées sur la base de la consommation énergétique ou des émissions

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données de coûts

Données relatives au matériau

Données relatives au chantier

Données de temps

Données

4.2 Partie 2: Evaluation multicritère

La partie relative à l'évaluation multicritère consiste en la mise en application de la méthodologie décrite au chapitre 3.4.6 dont les données d'entrée sont issues de la première partie du modèle (matrice de performances).

Nous décrivons dans la suite de ce chapitre les éléments principaux disponibles au cours des différentes phases de l'évaluation multicritère. L'implémentation effectuée distingue les parties suivantes:

- Instructions et navigations.
- Saisie des résultats de l'analyse du cycle de vie (figure 41).
- Analyse niveau 1 : Analyse Pareto (chapitre 4.2.1).
- Analyse niveau 2 : Analyse graphique (chapitre 4.2.2).
- Analyse niveau 3 : Agrégation partielle (chapitre 4.2.3).
- Analyse niveau 4 : Agrégation complète (chapitre 4.2.4).

Après introduction des données de performances et des données de base nécessaires, la procédure de calcul est automatisée.

INVENTAIRE SUR LE CYCLE DE VIE - RESULTATS BRUTS

Retour au menu général

Date: 27.01.2016

Légende:
Données à reporter de Partie 1 (ICV)

1) RAPPEL DES HYPOTHESES DE BASE

Unité fonctionnelle: 1

Types d'enrobés évalués:

Enrobé 1	Faire un choix (enrobé 1)
Enrobé 2	Faire un choix (enrobé 2)
Enrobé 3	Faire un choix (enrobé 3)
Enrobé 4	Faire un choix (enrobé 4)
Enrobé 5	Faire un choix (enrobé 5)

PU Dist. [km]

1D	
2D	
3B	
3D	
5	

2) PARAMETRES: ENERGIE, EMISSIONS, COÛTS

Processus unitaire	Ne pas compléter			Ne pas compléter			Ne pas compléter			Ne pas compléter			Ne pas compléter		
	Energie MJ	Emissions kg CO ₂ -eq	Coûts éner. CHF	Energie MJ	Emissions kg CO ₂ -eq	Coûts éner. CHF	Energie MJ	Emissions kg CO ₂ -eq	Coûts éner. CHF	Energie MJ	Emissions kg CO ₂ -eq	Coûts éner. CHF	Energie MJ	Emissions kg CO ₂ -eq	Coûts éner. CHF
1 - Matière première: granulats															
2 - Matière première: bitume															
3 - Matière première: additifs															
4 - Centrale d'enrobage															
5 - Transport (centrale - chantier)															
6/7 - Pose et compactage															
Total	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.000

3) PARAMETRE: PERFORMANCES

Performance de l'enrobé	Ne pas compléter		Ne pas compléter		Ne pas compléter		Ne pas compléter		Ne pas compléter		Ne pas compléter	
	Indice brut Unité	Valeur	Indice brut Unité	Valeur	Indice brut Unité	Valeur	Indice brut Unité	Valeur	Indice brut Unité	Valeur	Indice brut Unité	Valeur
Sensibilité à l'eau	%		%		%		%		%		%	

Fig. 41 Modèle PLANET, partie 2: Extrait zone de saisie des résultats ICV et indicateurs performantiels

4.2.1 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 [5], on ne retiendra en général dans le système que les processus contribuant à plus de 1% ou 3% du bilan global. Dans ce niveau, les variantes ne sont pas encore comparées entre-elles, l'objectif étant d'effectuer une analyse propre à chaque variante afin de mettre en évidence les processus dominants sur le cycle de vie.

Les critères considérés sont : énergie, émissions, coûts énergétiques et performances (indices normalisés).

Il n'y a pas de pondération des critères.

Les principales hypothèses sont celles relatives à l'inventaire du cycle de vie soit le choix des sources de données. La méthode de représentation étant graphique, il n'y a pas d'hypothèses additionnelles.

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.

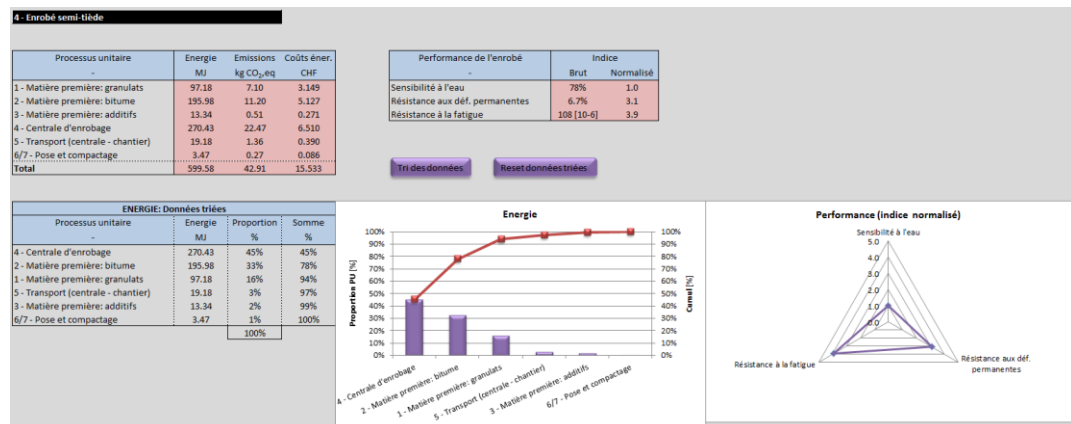


Fig. 42 Modèle PLANET, partie 2: Extrait de résultat d'analyse niveau 1 (représentation Pareto)

4.2.2 Niveau 2: Analyse graphique

Dans le second niveau d'analyse, les différentes variantes sont comparées entre-elles par des représentations graphiques, sans traitement préalable des données. Si une variante surclasse toutes les autres pour l'ensemble des critères, cette dernière pourra alors être identifiée à ce niveau, rendant la suite de l'analyse (méthodes multicritères) quelque peu superflue. La comparaison est dans un premier temps effectuée pour chaque critère individuellement, avant de proposer un comparatif global prenant en considération l'ensemble des 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.

La méthode étant graphique, il n'y a pas d'hypothèses spécifiques dans ce niveau d'analyse.

Un exemple de résultats est proposé dans la figure 43.

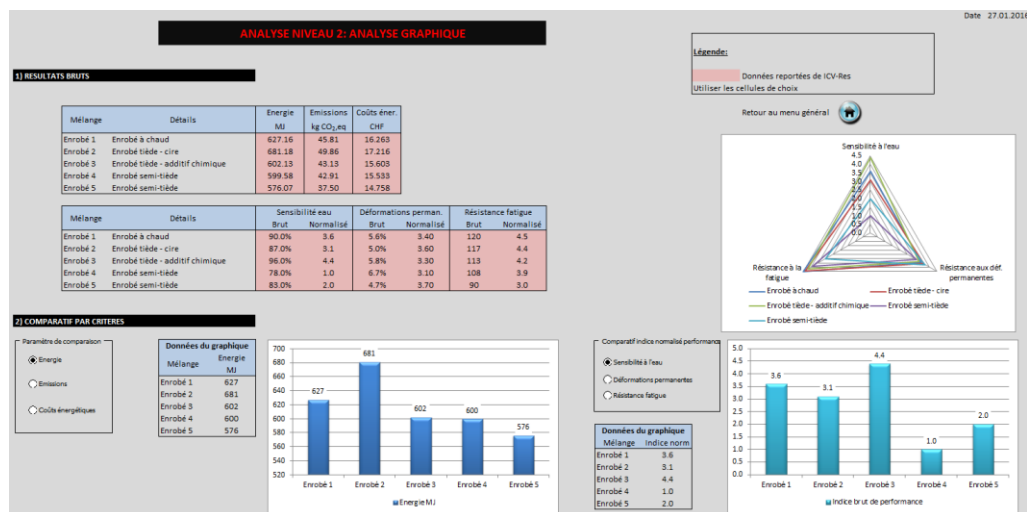


Fig. 43 Modèle PLANET, partie 2: Extrait de résultat d'analyse niveau 2 (analyse graphique)

Nous pouvons observer que la comparaison graphique des différentes variantes est effectuée par diagramme radar (appelé également polaire). Ce type de représentation possède quelques limites parmi lesquelles:

- Difficulté à identifier la meilleure variante si pas de surclassement net.
- Échelles identiques ou normalisations nécessaires [0...1] pour tous les axes (perte d'informations).
- Pas d'informations sur l'ampleur du surclassement.

Pour la normalisation des données, deux options sont implémentées, le choix n'influençant pas les relations de surclassement entre variantes mais uniquement la perception visuelle:

- Utilisation des valeurs du projet en cours soit normalisation par rapport à la valeur maximale renseignée pour chaque critère.
- Utilisation de valeurs par défaut soit normalisation selon des valeurs fixées arbitrairement. Cette option permet de réaliser des comparaisons inter-projets.

4.2.3 Niveau 3: Agrégation partielle

Le troisième niveau d'analyse concerne l'application de la méthode multicritère Electre III. Un classement des variantes est obtenu, des analyses de robustesse de la solution pouvant également être réalisées.

Les critères pris en compte sont: énergie, émissions, coûts énergétiques et performances (indices bruts et normalisés) et critères qualitatifs.

La pondération est prise en compte dès le troisième niveau d'analyse, ceci selon une méthode de pondération directe. Les options suivantes sont données à l'utilisateur pour le choix de la pondération, des valeurs maximales et minimales étant définies afin d'éviter les choix irréalistes:

- Pondération propre à l'utilisateur
- Pondération équilibrée entre les critères.
- Choix d'une pondération par défaut discutée plus loin.

Les différentes valeurs de pondération proposées dans le modèle sont indiquées dans la figure 44.

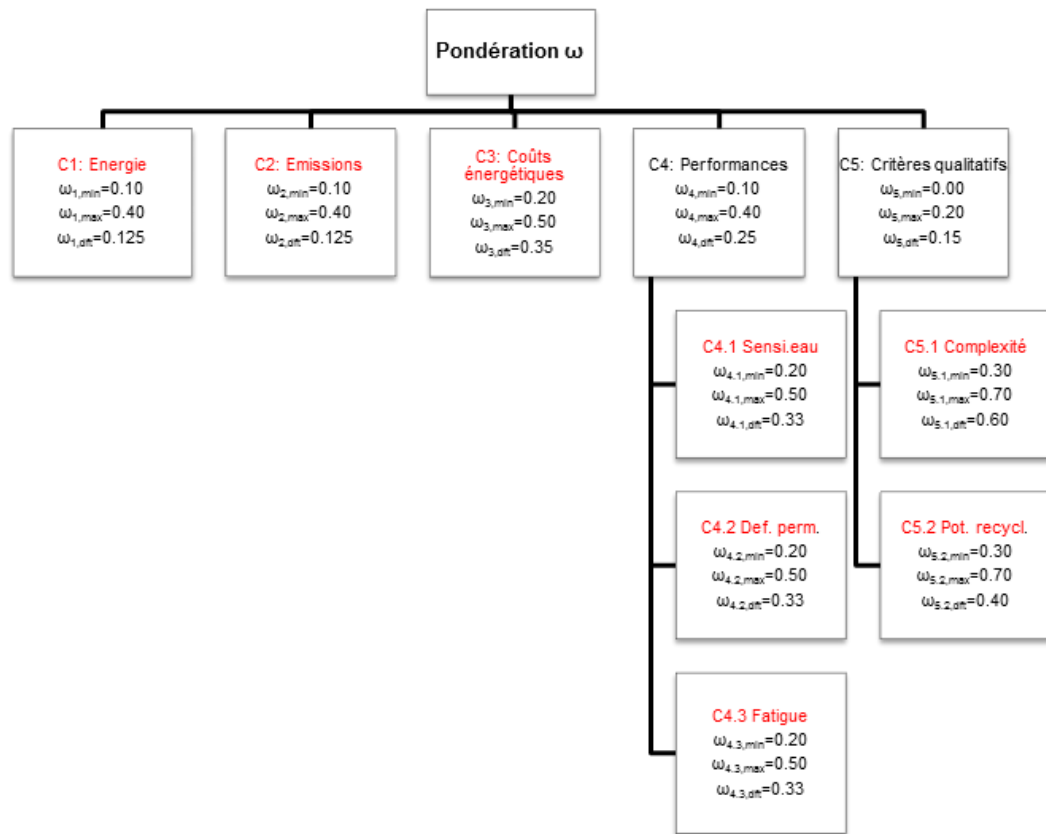


Fig. 44 Modèle PLANET, partie 2: Arbre de pondération pour les méthodes multicritères

En plus de la pondération, d'autres hypothèses inhérentes à la méthode d'agrégation partielle choisie sont nécessaires. Cela concerne les différents seuils, propres à chaque critère:

- 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 définies ainsi:

- 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 issues de la normalisation et de la littérature [76] 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 par défaut est défini sur la base de l'expérience relative aux essais, exemples d'application et recommandations issues de la littérature [53]. Afin de ne pas rendre les seuils de veto trop contraignants, des valeurs élevées sont proposées.
- La définition des seuils pour les critères évalués sur le cycle de vie est plus complexe. Le choix des valeurs par défaut est finalement effectué sur la base de différents calculs ICV et de résultats de la littérature.
- 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 par défaut élevé est suggéré, afin de ne pas rendre ce seuil discriminant.

Une synthèse des différents seuils par défauts est proposée dans le Tab. 7, valeurs pouvant en tout temps être modifiées par l'utilisateur par exemple lors d'analyses de sensibilité.

Tab. 7 Modèle PLANET, partie 2: Seuils par défaut (agrégation partielle, Electre III)

		Seuil indifférence q_j	Seuil préférence stricte p_j	Seuil veto v_j
Energie	MJ	10	25	125
Emissions	Kg CO _{2,eq}	0.70	1.70	8.50
Coûts En.	CHF	0.30	0.75	3.75
Performances				
Sensi. eau	%	8	12	25
Orniérage	%	0.40	0.60	3.00
Fatigue	10-6	2.1	3.1	16.0
Qualitatifs				
Complexité fab.	-	0.5	1.0	5.0
Potentiel recy.	-	0.5	1.0	5.0

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). Rappelons qu'un classement par distillation peut également être effectué à l'aide du logiciel Electre III/IV. Dans la méthodologie proposée, nous recommandons de combiner le calcul systématique selon Syskos-Huber (implémenté dans la feuille de calcul) avec les résultats de la distillation pour certains cas critiques. L'utilisation d'une seconde méthode de classement (distillations) permet de valider les résultats et évaluer les éventuelles divergences de classement selon la méthode.

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 en général réalisée en variant les différents seuils ainsi que la pondération. Lors de l'analyse de robustesse, on part du principe que la solution trouvée est la bonne solution ; l'analyse de sensibilité ne servant qu'à vérifier la robustesse de cette solution. Une solution peu robuste n'est pas erronée, mais elle traduit sa sensibilité.

La méthode Electre II a été implémentée dans le modèle PLANET dont un extrait est proposé dans la figure 45. Seul le cas d'une procédure de classement par distillation requiert l'utilisation du logiciel ELECTRE III/IV développé par le LAMSADE (Laboratoire d'analyse et de modélisation de systèmes pour l'aide à la décision, 1994). Ce logiciel a également permis de valider les calculs mis en place dans le modèle PLANET dans lequel l'absence de seuil de veto peut être "simulée" en imposant $v_j \rightarrow \infty$.

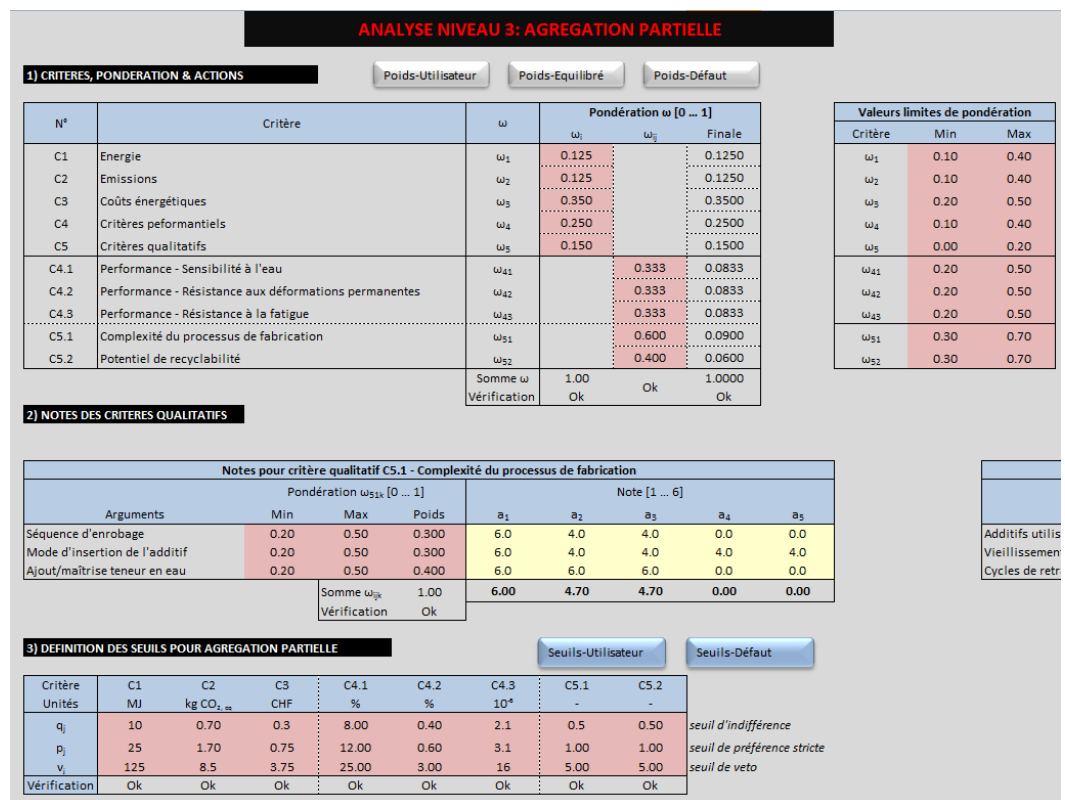


Fig. 45 Modèle PLANET, partie 2: Extrait des calculs niveau 3 (agrégation partielle, Electre III)

4.2.4 Niveau 4: Agrégation complète

La méthode d'agrégation complète (théorie de l'Evidence) a pour but de classer les variantes en prenant en considération l'inconnue ainsi que l'incertitude sur les données comparativement à la première méthode par agrégation partielle implémentée au troisième niveau de l'analyse.

Tout comme pour l'agrégation partielle, l'ensemble des critères peuvent être considérés, la méthode de pondération étant également identique.

Contrairement à l'agrégation partielle, des matrices de transformation sont utilisées afin de passer du tableau de performances brutes (figure 46) à la matrice de décision. Les matrices de transformation par défaut pour les critères qualitatifs (Tab. 8) et quantitatifs (Tab. 9) sont proposées ci-dessous; ces matrices pouvant être modifiées par l'utilisateur.

L'intérêt des matrices de transformation dans le cas de critères qualitatifs est de permettre la prise en compte une part d'inconnue. Par exemple, selon le Tab. 8, un enrobé dont l'évaluation qualitative est "A" présente 80% de chances d'être excellent et 10% de chances d'être bon. Une part de 10% d'inconnue a été choisie dans la proposition par défaut.

Tab. 8 Modèle PLANET, partie 2: Matrice de transformation par défaut (critères qualitatifs, agrégation complète)

	A=6	B=5	C=4	D=3	E=2	F=1	G=0
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					

Les valeurs seuils de la matrice de transformation dans le cas de critères quantitatifs (Tab. 9) sont définies sur la base de valeurs rencontrées habituellement lors de l'évaluation d'enrobés et des seuils d'acceptabilité des performances mécaniques discutés préalablement. Dans le cas de critères quantitatifs, il est indispensable de s'assurer préalablement que les performances brutes se situe entre les bornes de la matrice de transformation et au besoin adapter cette dernière matrice.

Tab. 9 Modèle PLANET, partie 2: Matrice de transformation par défaut (critères quantitatifs, agrégation complète)

	Energie [MJ]	Emissions [kg CO ₂ ,eq]	Coûts en. [CHF]	Sensi. [%]	Eau	Orniérage [%]	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

	Critère Niveau 1	Critère Niveau 2	Critère Niveau 3	Unités	Enrobé 1	Enrobé 2	Enrobé 3	Enrobé 4	Enrobé 5
C. quantitatifs	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	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]	120	117	113	108	90
C5 Qualitatifs	C5.1 Complexité	C5.1.1 Séquence	-	A	C	C	G	G	
		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	
		C5.2.2 Vieillessement	-	E	C	C	A	A	
		C5.2.3 Retraitement	-	A	A	A	A	A	

Fig. 46 Modèle PLANET, partie 2: Exemple de matrice de performances brutes (agrégation complète)

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 utiliser les matrices de transformation permettant alors d'intégrer une part d'inconnue sur les critères quantitatifs également.

La dernière hypothèse concerne les seuils pour le calcul de l'utilité en fonction du degré d'évaluation. Les valeurs proposées par défaut, issues de [74], sont contenues dans le Tab. 10.

Tab. 10 Modèle PLANET, partie 2: Utilité proposée par défaut (agrégation complète)

	Mauvais	Faible	Moyen	Bon	Excellent
Utilité	0.00	0.35	0.55	0.85	1.00

Les résultats finalement obtenus sont la représentation des degrés de croyance (degré de crédibilité) associés à chaque degré d'évaluation ainsi que le calcul de l'utilité permettant de classer les variantes (figure 47).

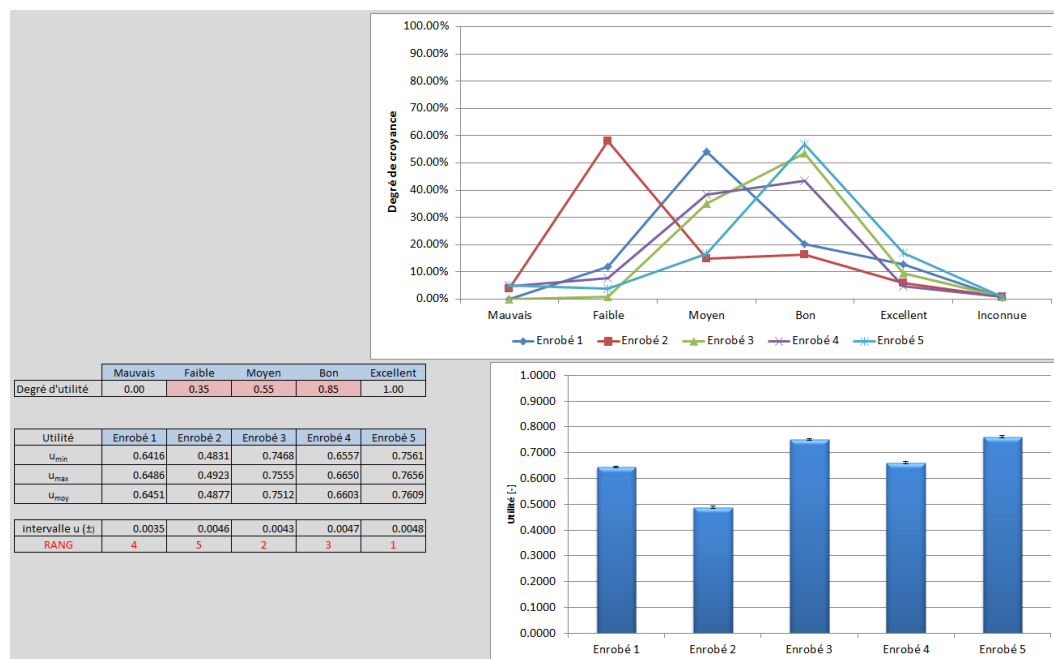


Fig. 47 Modèle PLANET, partie 2: Exemple de résultats de l'agrégation complète

La robustesse de la solution trouvée peut finalement être évaluée en effectuant une analyse de sensibilité sur les hypothèses principales soit pondération, matrices de transformation, degrés d'utilité et éventuellement matrice de décision.

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. Dans le cadre de cette recherche, les calculs selon la théorie de l'Evidence ont été implémentés directement dans le modèle PLANET, rendant ainsi la procédure davantage transparente et paramétrable si nécessaire. L'algorithme mis en place a été validé en effectuant des calculs comparatifs avec quelques cas de la littérature [73, 74]; le détail du code étant fourni en Annexe au travail [4].

5 Application de la méthodologie

Après avoir décrit les bases de l'analyse environnementale (chapitre 2) ainsi que l'élaboration théorique (chapitre 3) et pratique (chapitre 1) du modèle d'évaluation multicritère, le présent chapitre propose un exemple d'application illustrant la méthodologie mise en place.

Les données utilisées pour le calcul de cet exemple sont issues des travaux de thèse de N. Bueche [4] pour lequel des techniques d'enrobés tièdes identiques à celles utilisées dans le cadre du projet PLANET ont été utilisées. Pour plus d'informations relatives aux enrobés et performances mécaniques, on pourra recommander de consulter le rapport relatif à la RS-3 (formulation et optimisation des performances des enrobés tièdes) du projet PLANET [77].

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 (partie 1 du modèle). Dans la seconde partie du modèle, nous réalisons les quatre différents niveaux d'analyse multicritère en détaillant et commentant les résultats obtenus pour chaque niveau. Une analyse de sensibilité permettant d'évaluer la robustesse de la solution sera finalement proposée.

5.1 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 une sélection d'enrobés bitumineux. Les choix des enrobés à évaluer est effectué en accord avec les produits testés dans le cadre du projet PLANET [77], mais également dans le but de considérer des familles variées de produits mettant ainsi en évidence des potentielles différences entre matériaux. Les cinq variantes (ou alternatives) finalement retenues sont les enrobés suivants:

- REF-HOT: Enrobé de référence à chaud.
- FR-WAX: Enrobé tiède avec ajout de cire dosée à 3% de la masse de bitume.
- FR-PACK: Enrobé tiède avec additif chimique (agent tensio-actif), dosé à 0.4% de la masse de bitume.
- PA-HWAM: Enrobé tiède avec maîtrise de la teneur en eau et ajout d'un additif (fluxant) dosé à 0.4% de la masse de bitume. Le principe de cet enrobé consiste à introduire une part du sable (25%) humide et froide; les autres composants étant chauffés de manière "traditionnelle". Le moussage du bitume est alors créé par la fraction humide du sable.
- EBT: Enrobé semi-tiède avec maîtrise de la teneur en eau

Le dernier procédé évalué (EBT) ne fait pas partie du choix initial des enrobés tièdes considérés dans le cadre du projet PLANET. Cet enrobé revêt cependant un intérêt pour cet exemple d'application, ceci car il présente des gains énergétiques considérables en raison de sa température de production inférieure à 100 °C, les performances mécaniques étant par contre moins élevées que celles des autres enrobés considérés. Les informations relatives aux performances mécaniques de l'enrobé EBT sont obtenues dans l'étude [78] menée au LAVOC. Un descriptif détaillé de cet enrobé est également fourni dans [77], le principe de fabrication étant globalement comparable à celui de l'enrobé PA-HWAM, seul le conditionnement des composants étant 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 doit donc être perçu comme un exemple indicatif non généralisable.

Nous pouvons encore mentionner les hypothèses de base et postulats suivants:

- L'unité fonctionnelle est la fabrication d'une tonne d'enrobé bitumineux.
- 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 sont utilisées dans la mesure du possible.
- L'arbre des processus unitaires est conforme au descriptif détaillé fourni au chapitre 3.3, un rappel étant effectué ci-dessous.

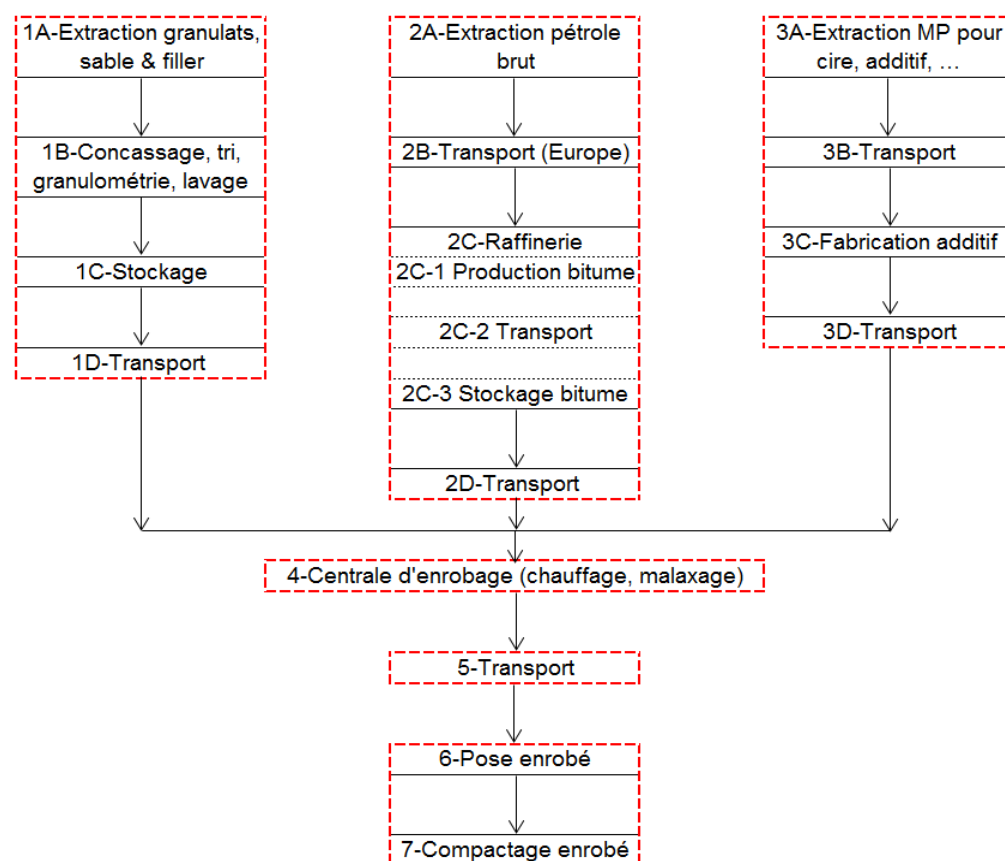


Fig. 48 Exemple de calcul: Arbre des processus unitaires

- Les hypothèses relatives aux distances et moyens de transport sont indiquées dans le Tab. 11. 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).

Tab. 11 Exemple de calcul: Hypothèses de base pour les distances

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

Un exemple de résultat de l'inventaire du cycle de vie (enrobé REF-HOT) est fourni en Annexe au présent rapport, exemple dans lequel les données relatives à la courbe granulométrique et teneur en liant peuvent notamment être consultées

5.2 Partie 1: Etablissement des indicateurs

Nous indiquons ici la synthèse des résultats, la méthodologie décrite au chapitre 3 étant appliquée.

5.2.1 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. Nous fournissons ici quelques informations complémentaires relatives aux processus unitaires illustrés dans la figure 48.

Matière première : Granulats (1A à 1D)

Pour les granulats, nous choisissons d'utiliser les données issues de mesures effectuées dans une carrière située à l'entrée du Valais (Choëx-Massongex) et pour laquelle la valeur moyenne des années 2009 et 2010 est considérée. Ces informations sont détaillées dans un onglet spécifique du modèle PLANET (partie 1). Nous pouvons observer que les données utilisées sont comparables à celles pouvant être trouvée dans la littérature [15, 20, 32].

Pour les calculs, nous effectuons l'hypothèse que le stockage des matériaux à la carrière (ou gravière) ne consomme pas d'énergie et que le transport des granulats de la carrière à la centrale d'enrobage est effectué avec un camion 20-28 t pour lequel la base de données du modèle renseigne des valeurs relatives au 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 par ailleurs celui utilisé dans le cadre de ce projet. Les données qui sont intégrées au modèle proviennent de [30] qui est une source largement reconnues et utilisées pour les ICV réalisées dans un contexte européen.

La considération de chaque sous-processus unitaire individuellement abouti à un résultat du 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 FR-WAX (cire synthétique Fischer-Tropsch), FR-PACK (agent tensio-actif), PA-HWAM (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 PA-HWAM et EBT, nous faisons l'hypothèse a priori réaliste de valeurs identiques à celles d'un agent tensio-actif. La base de données du modèle PLANET 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 dont les résultats dépendent largement du poste d'enrobage. Il est peu fréquent de disposer de données mesurées sur un même poste d'enrobage, ceci avec différentes techniques. En ce sens, la recherche RS-1 de PLANET constitue une source importante d'informations [10]. Ne disposant pas de données d'énergie et d'émissions mesurées pour l'ensemble des produits considérés dans cet exemple de calcul nous choisissons d'effectuer un calcul théorique selon la méthode de

calcul décrite dans la recherche PLANET relative aux centrales d'enrobage [10]. 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. Nous supposons également que le poste d'enrobage utilise de l'électricité (10%) et du fioul (90%) ; le processus de combustion étant optimal. Les résultats des calculs de consommation énergétique, émissions et coûts énergétiques sont consignés dans le Tab. 12.

Tab. 12 Exemple de calcul: Calculs théoriques processus unitaire poste d'enrobage

	REF-HOT	FR-WAX	FR-PACK	PA-HWAM	EBT
Energie chauffage composants [MJ/tenr]	182.17	161.31	160.96	163.30	103.73
Energie chauffage du malaxeur [MJ/tenr]	20.18	16.47	16.47	12.48	11.88
Total énergie (rdt=65%) [MJ/tenr]	311.30	273.52	272.98	270.43	177.87
Emissions chauff. compo. [kgCO ₂ ,eq/tenr]	15.14	13.41	13.38	13.57	8.62
Emissions chauff. malax. [kgCO ₂ ,eq/tenr]	1.68	1.37	1.37	1.04	0.99
Total émissions (rdt=65%) [kgCO ₂ ,eq/tenr]	25.87	22.73	22.69	22.47	14.78
Coûts éner. chauff. composants [CHF/t]	4.39	3.89	3.88	3.93	2.50
Coûts éner. chauff. malaxeur [CHF/t]	0.49	0.40	0.40	0.30	0.29
Total coûts énergé. (rdt=65%) [CHF/t]	7.51	6.60	6.58	6.51	4.29

Il est utile de rappeler que le type d'énergie utilisée au poste d'enrobage peut engendrer davantage d'émissions pour un poste, ceci malgré une consommation d'énergie plus faible.

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 les informations nécessaires sont intégrées à la base de données PLANET.

Pose et compactage de l'enrobé (6 et 7)

Nous supposons que la pose et le compactage sont effectués avec des machines de chantier Dynapac pour lesquelles la base de données du modèle PLANET renseigne les informations nécessaires. Nous supposons également une énergie de compactage comparable pour les différents enrobés, ce qui semble réaliste pour autant que les matériaux soient produits et compactés à des températures conformes à la bonne pratique.

Résultats de l'inventaire du cycle de vie

La somme des différents processus unitaires permet de réaliser l'ICV des différents enrobés. Les résultats sont présentés dans les tableaux ci-dessous, davantage de détails pouvant être trouvés dans en Annexe pour l'enrobé REF-HOT.

Processus unitaire -	REF-HOT			FR-WAX		
	Energie MJ	Emissions kg CO ₂ ,eq	Coûts éner. CHF	Energie MJ	Emissions kg CO ₂ ,eq	Coûts éner. CHF
1 - Matière première: granulats	97.20	7.10	3.150	97.08	7.10	3.146
2 - Matière première: bitume	196.01	11.21	5.128	195.76	11.19	5.121
3 - Matière première: additifs	0.00	0.00	0.000	92.17	7.21	1.873
4 - Centrale d'enrobage	311.30	25.87	7.510	273.52	22.73	6.600
5 - Transport (centrale - chantier)	19.18	1.36	0.390	19.18	1.36	0.390
6/7 - Pose et compactage	3.47	0.27	0.086	3.47	0.27	0.086
Total	627.16	45.81	16.263	681.18	49.86	17.216

Fig. 49 Exemple de calcul: Résultats ICV des enrobés REF-HOT et FR-WAX

Processus unitaire -	FR-PACK			PA-HWAM			EBT		
	Energie	Emissions	Coûts éner.	Energie	Emissions	Coûts éner.	Energie	Emissions	Coûts éner.
	MJ	kg CO ₂ ,eq	CHF	MJ	kg CO ₂ ,eq	CHF	MJ	kg CO ₂ ,eq	CHF
1 - Matière première: granulats	97.18	7.10	3.149	97.18	7.10	3.149	99.20	7.08	3.308
2 - Matière première: bitume	195.98	11.20	5.127	195.98	11.20	5.127	182.96	10.46	4.786
3 - Matière première: additifs	13.34	0.51	0.271	13.34	0.51	0.271	93.40	3.55	1.898
4 - Centrale d'enrobage	272.98	22.69	6.580	270.43	22.47	6.510	177.87	14.78	4.290
5 - Transport (centrale - chantier)	19.18	1.36	0.390	19.18	1.36	0.390	19.18	1.36	0.390
6/7 - Pose et compactage	3.47	0.27	0.086	3.47	0.27	0.086	3.47	0.27	0.086
Total	602.13	43.13	15.603	599.58	42.91	15.533	576.07	37.50	14.758

Fig. 50 Exemple de calcul: Résultats ICV des enrobés FR-PACK, PA-HWAM et EBT

L'ordre de grandeur des valeurs d'inventaire du cycle de vie peut être brièvement vérifié par confrontation avec des données de la littérature. Il vient:

- Dans [21], l'auteur estime la consommation énergétique pour la construction d'une autoroute entre 660 MJ/t et 700 MJ/t et entre 645 MJ/t - 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 jugé comparable compte tenu des différences au niveau de la méthode de calcul, des bases de données (centrales d'enrobage en particulier) et des hypothèses réalisées.
- La recherche [32] indique 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).
- Finalement, la recherche [33] 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 en conclure que l'ordre de grandeur des valeurs obtenues est comparable.
- Un bref calcul avec le logiciel ICV CHANGER® amène à des résultats du même type. La méthode de calcul d'ICV mise en place est donc jugée satisfaisante.

5.2.2 Indices de performance

Les indices de performance sont établis conformément à la méthode préalablement détaillée au chapitre 3.3.4. Les différentes données pour les enrobés REF-HOT, FR-WAX, FR-PACK et PA-HWAM sont issues de résultats d'essais en laboratoire pour lesquels l'ensemble des détails sont disponibles dans le rapport relatif à la recherche RS-3 [77]. Les données relatives à l'enrobé EBT proviennent quant à elles de [78] à l'exception de la résistance en fatigue pour laquelle nous postulons un comportement moyen sur la base de l'expérience acquise avec ce type de matériau.

Les différents résultats sont rappelés dans le Tab. 13.

Tab. 13 Exemple de calcul: Indices de performances bruts et normalisés des enrobés

	REF-HOT	FR-WAX	FR-PACK	PA-HWAM	EBT
Sensibilité à l'eau (ratio ITSr)					
Indice brut	90%	87%	96%	78%	83%
Indice normalisé	3.6	3.1	4.4	1.0	2.0
Résistance aux déformations permanentes (ornières 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	120·10 ⁻⁶	117·10 ⁻⁶	111·10 ⁻⁶	108·10 ⁻⁶	90·10 ⁻⁶
Indice normalisé	4.5	4.4	4.1	3.9	3.0

5.3 Partie 2: Analyse multicritère

Les différents indicateurs établis dans la première partie du modèle permettent ensuite de constituer le tableau des performances de base insérées dans la première partie du modèle multicritère. Pour rappel, le but de cette analyse est de déterminer quelle sera la solution (type d'enrobé) globalement préférée, ainsi que la robustesse de cette solution.

5.3.1 Niveau 1: Analyse Pareto

Le premier niveau d'analyse ne propose pas une comparaison des variantes, mais une analyse individuelle de chacune dans le but d'identifier les processus unitaires (PU) dominants sur le cycle de vie. Les paramètres d'énergie, d'émission et de coût énergétique sont considérés, une représentation de Pareto étant réalisée pour chaque critère et matériau. Un exemple de résultat est proposé dans la figure 51.

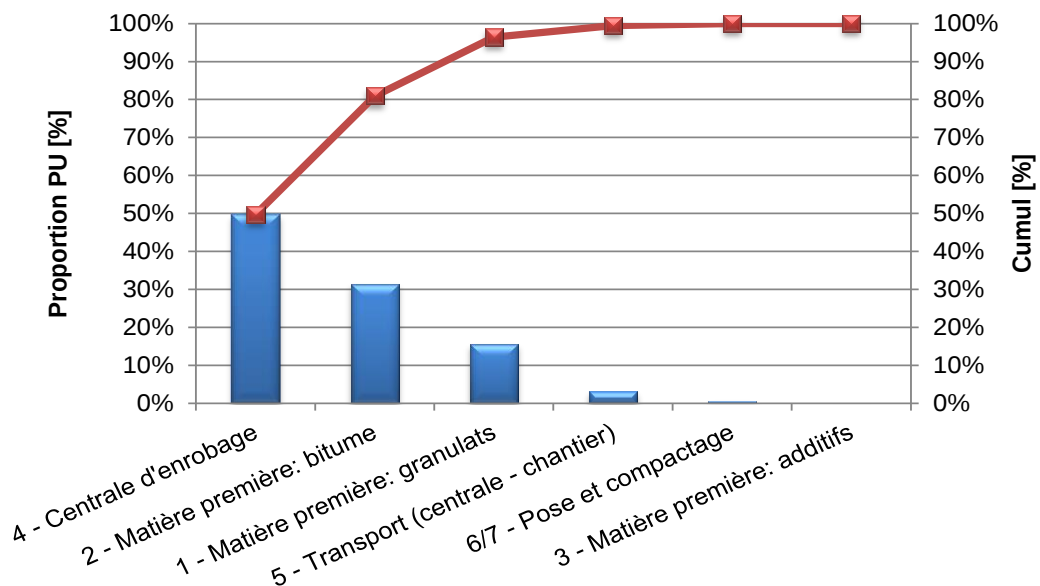


Fig. 51 Exemple de calcul, niveau 1: Analyse Pareto de la consommation d'énergie, enrobé REF-HOT

Une synthèse des quatre processus unitaires dominants au niveau de la consommation énergétique de chaque enrobé est également proposée dans le Tab. 14 qui contient le classement et la part de la consommation énergétique pour chaque PU. Nous pouvons observer:

- Les quatre processus dominants représentent plus de 97% de la consommation énergétique totale.
- Etant donné les paramètres de base choisis (matière première, enrobés, transports), la principale différence entre les variantes se situe au niveau du poste d'enrobage et des additifs éventuels.
- La centrale d'enrobage est le processus unitaire nécessitant le plus d'énergie pour les enrobés REF-HOT, FR-WAX, FR-PACK et PA-HWAM; la consommation d'énergie représentant entre 40% (FR-WAX) et 50% (REF-HOT) 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 soit environ 30% du total.
- Dans le cas de l'enrobé EBT, le processus unitaire le plus gourmand en énergie est la production du bitume (32%) très légèrement supérieure à l'énergie requise au poste d'enrobage (31%).
- Les enrobés REF-HOT, FR-PACK et PA-HWAM sont globalement comparables (processus dominants et ordre de grandeur).

- Pour l'enrobé FR-WAX, une quantité non négligeable d'énergie est consommée pour l'élaboration de la cire (14%). Ceci est lié au dosage de la cire (3%/b) et au processus d'élaboration (Fisher-Tropsch). 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).

Tab. 14 Exemple de calcul: Analyse Pareto niveau 1 – Processus unitaires dominants (énergie)

	REF-HOT	FR-WAX	FR-PACK	PA-HWAM	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 selon les émissions ou le coût énergétique amène à des tendances globalement comparables

5.3.2 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 étant l'énergie, les émissions, le coût énergétique et les performances mécaniques. La figure 52 propose un exemple de comparatif des indices normalisés de performances des différents enrobés. Aucune relation de surclassement complet ne peut être mise en évidence sur la seule base de cette figure: l'enrobé FR-PACK 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.

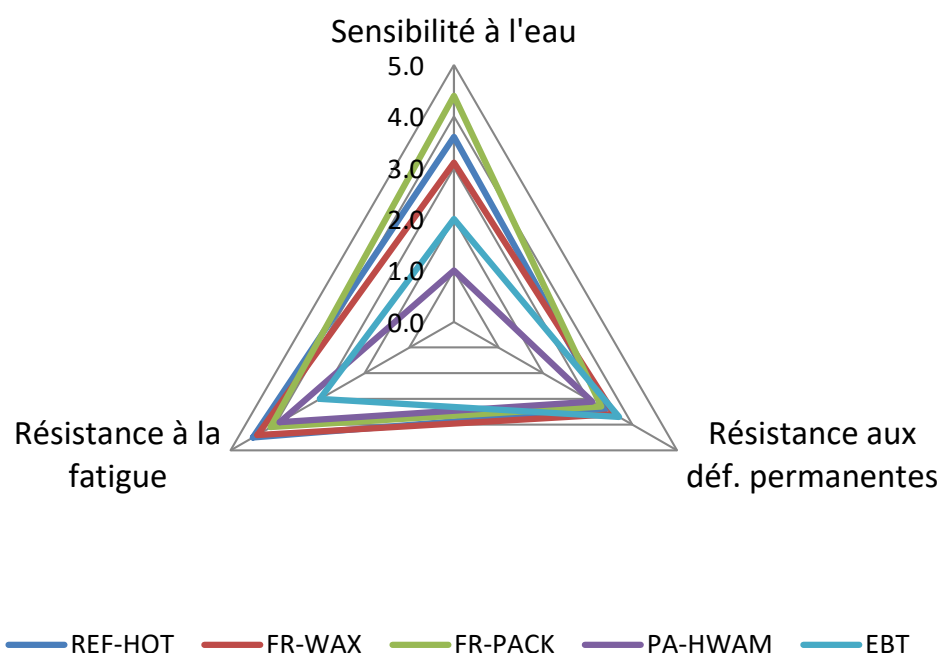


Fig. 52 Exemple de calcul, niveau 2: Comparatif des indices normalisés de performances mécaniques des enrobés

Les performances des différents enrobés peuvent ensuite être mises en relation avec les autres critères de consommation énergétique, émissions et coût énergétique dans l'optique d'un comparatif global. Un exemple de représentation pour l'exemple discuté ici est proposé dans la figure 53.

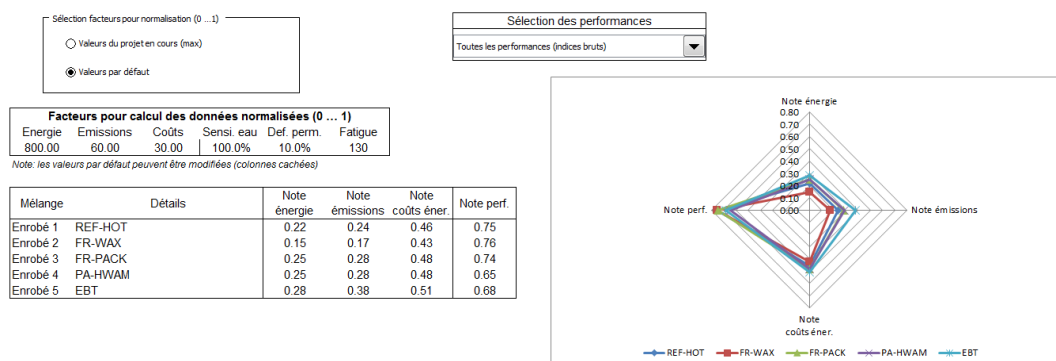


Fig. 53 Exemple de calcul, niveau 2: Comparaison graphique des enrobés pour les critères énergie, émissions, coûts énergétiques et performances

Les résultats et différentes représentations graphiques proposées dans ce second niveau d'analyse ne mettent pas en évidence de surclassement complet de variantes. Il est par conséquent difficile de déterminer un classement des différents enrobés sur cette base, et encore plus complexe d'évaluer l'ampleur d'un éventuel surclassement de variantes. Il faut de plus considérer ces représentations avec précaution. Par exemple, la figure 53 peut donner l'impression de performances mécaniques excellentes en raison du facteur de normalisation utilisé.

Les représentations graphiques et l'analyse Pareto des deux premiers niveaux ne suffisant pas, une analyse plus approfondie à l'aide de méthodes multicritères est donc requise.

5.3.3 Niveau 3: Agrégation partielle

Dans le niveau 3 (agrégation partielle) et le niveau 4 (agrégation complète) des méthodes d'aide à la décision sont appliquées.

Les hypothèses suivantes sont effectuées pour le cas de référence:

- Pondération (valeurs par défaut indiquées dans la figure 44).
- Seuil d'indifférence q_j (valeurs par défaut indiquées dans Tab. 7).
- Seuil de préférence stricte p_j (valeurs par défaut indiquées dans Tab. 7).
- Seuil de veto v_j (valeurs par défaut indiquées dans Tab. 7).

Nous pouvons rappeler que le principe des valeurs par défaut 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.

Evaluation des critères qualitatifs

Comme détaillé au chapitre 3.3.5, deux critères qualitatifs sont considérés; l'évaluation des différentes variantes étant proposée dans le Tab. 15 (complexité du processus de fabrication) et le Tab. 16 (potentiel de recyclabilité).

Tab. 15 Exemple de calcul: Agrégation partielle niveau 3 – Evaluation selon critère qualitatif "complexité du processus de fabrication"

	REF-HOT	FR-WAX	FR-PACK	PA-HWAM	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

Tab. 16 Exemple de calcul: Agrégation partielle niveau 3 – Evaluation selon critère qualitatif "potentiel de recyclabilité"

	REF-HOT	FR-WAX	FR-PACK	PA-HWAM	EBT
Additifs utilisés	6.0	1.0	1.0	3.0	1.0
Vieillessement 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

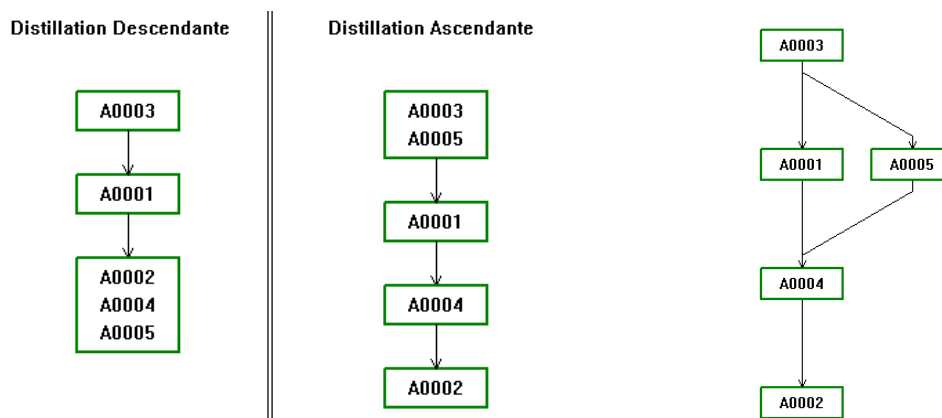
Discussion des résultats

Le résultat du calcul pour les hypothèses de référence est indiqué dans le Tab. 17. Selon ce premier calcul, la variante FR-PACK est globalement préférée en raison notamment de ses bonnes performances mécaniques, alors que les gains énergétiques et environnementaux importants de la variante EBT lui permettent de se positionner à la seconde place. Les enrobés FR-WAX et PA-HWAM sont vraisemblablement les moins bonnes variantes, globalement moins performantes que la référence à chaud (REF-HOT). On notera que de manière générale, seule "la meilleure" variante intéressera le décideur.

Tab. 17 Exemple de calcul: Agrégation partielle niveau 3 – Classement des variantes selon la méthode de Siskos-Huber

	REF-HOT	FR-WAX	FR-PACK	PA-HWAM	EBT
Rang	3	5	1	4	2

Afin de valider la méthode de calcul et fournir une méthode de classement complémentaire, le cas de référence a également été calculé dans le logiciel Electre III/IV (version 3.1b). 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. Cela valide la méthode de calcul mise en place. Une illustration du résultat des distillations est proposée dans la figure 54 où la nomenclature suivante est utilisée: REF-HOT=A0001, FR-WAX=A0002, FR-PACK=A0003, PA-HWAM=A0004, EBT=A0005.

**Fig. 54** Exemple de calcul, agrégation partielle niveau 3: Résultats des distillations (gauche) et préordre partiel final (droite) pour le cas de référence

L'étude du préordre partiel final indique que la variante FR-PACK est la préférée, tout comme pour le classement selon Siskos-Huber. Les variantes REF-HOT et EBT sont jugées incomparables, les variantes PA-HWAM et FR-WAX 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, implémentée dans le modèle PLANET.

Analyse de robustesse

La solution de référence obtenue est considérée comme la solution. La robustesse de cette solution est ensuite évaluée par l'intermédiaire d'analyses de sensibilité sur les différentes hypothèses de base effectuées. Lors de l'analyse de sensibilité, un seul paramètre à la fois est varié, ceci afin de simplifier l'interprétation.

Nous supposons que la matrice de performances brutes n'est pas sujette à une analyse de sensibilité ou en d'autres termes, l'évaluation des différentes performances est certaine. L'analyse de sensibilité peut donc 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 par conséquent rapidement s'avérer très 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 soit, pour la pondération, celle relative aux critères pour lesquels le poids est le plus élevé (coûts énergétiques, performances, critères qualitatifs). Pour chacun de ces critères, la pondération est variée entre la borne maximale et minimale admissible définie dans la figure 44. La somme des différents poids devant toujours être de 100%, deux alternatives sont envisagées pour le calcul des pondérations corrigées:

- 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 qui consiste à admettre 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 la figure 55 (critère coût énergétique), la figure 56 (critère performances mécaniques) et la figure 57 (critères qualitatifs). Nous pouvons observer:

- De manière générale et pour les trois analyses de sensibilité, la variante préférée (FR-PACK) 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-HOT et EBT sont relativement proches, leur ordre variant au gré de la pondération. Par exemple,

- lorsque le poids du critère de coût énergétique est bas (20%), la variante REF-HOT est 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 PA-HWAM et FR-WAX sont également proches, la préférence entre ces deux variantes dépendant également de la pondération. Par exemple, lorsque la pondération relative aux critères de performances est élevée (dès 30%), alors la variante FR-WAX est préférée à la variante PA-HWAM, ceci en raison de ses performances mécaniques globalement supérieures.
 - Les tendances obtenues sont donc identiques à celles mises en évidence avec la solution de référence et par le calcul des distillations.

				Variation de pondération du critère de coût énergétique						
				30%	25%	20%	40%	45%	50%	
Poids des critères				BASE	Calcul des pondérations					
	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%	31.6%	27.8%	23.5%	38.1%	40.9%	43.5%	
	Critères peformantiels	ω_4	25.0%	26.3%	27.8%	29.4%	23.8%	22.7%	21.7%	
	Critères qualitatifs	ω_5	15.0%	15.8%	16.7%	17.6%	14.3%	13.6%	13.0%	
Classement				Classement des variantes						
	REF-HOT	a1	3	3	3	2	3	3	3	
	FR-WAX	a2	5	4	4	4	5	5	5	
	FR-PACK	a3	1	1	1	1	1	1	1	
	PA-HWAM	a4	4	5	5	5	4	4	4	
	EBT	a5	2	2	2	3	2	2	2	

Fig. 55 Exemple de calcul, agrégation partielle niveau 3: Analyse de sensibilité de la pondération – critère coût énergétique

				Variation de pondération des critères de performances						
				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 peformantiels	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 des variantes						
Classement	REF-HOT	a1	3	3	3	3	3	3	2	
	FR-WAX	a2	5	5	5	5	4	4	4	
	FR-PACK	a3	1	1	1	1	1	1	1	
	PA-HWAM	a4	4	4	4	4	5	5	5	
	EBT	a5	2	2	2	2	2	2	3	

Fig. 56 Exemple de calcul, agrégation partielle niveau 3: Analyse de sensibilité de la pondération – critère performances mécaniques

				Variation de pondération des critères qualitatifs				
				BASE	10%	5%	0%	20%
					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 des variantes			
Classement	REF-HOT	a1	3	3	3	3	3	
	FR-WAX	a2	5	4	4	4	5	
	FR-PACK	a3	1	1	1	1	1	
	PA-HWAM	a4	4	5	5	5	4	
	EBT	a5	2	2	2	2	2	

Fig. 57 Exemple de calcul, agrégation partielle niveau 3: Analyse de sensibilité de la pondération – critères qualitatifs

L'analyse de sensibilité peut ensuite être poursuivie par l'étude des différents seuils, ceci tout en respectant la règle générale $q_j \leq p_j < v_j$ pour l'établissement des seuils.

Les résultats de l'analyse de sensibilité du seuil de préférence stricte p_j pour les critères déterminants de coût énergétique et consommation d'énergie sont présentés dans la figure 58. La consommation d'énergie est en effet particulièrement importante et des différences significatives entre les variantes sont calculées lors de l'ICV. Nous pouvons commenter:

- Pour rappel, le seuil de préférence stricte 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.
- Le seuil de préférence stricte du critère de coût énergétique est varié entre 0.4 CHF et 3.6 CHF. Quelle que soit la valeur du seuil de préférence stricte, la variante FR-PACK reste la solution 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-HOT est en seconde position et donc préférée à la variante EBT. Les variantes FR-WAX et PA-HWAM restent toujours aux dernières positions du classement, sauf dans un cas : Lorsque le seuil de préférence stricte prend des valeurs élevées (≥ 2.5 CHF), la variante FR-WAX dont le coût est important est alors "favorisée" et elle se positionne dans au troisième rang. Ce cas, peu réaliste, ne modifie cependant pas la variante globalement préférée (FR-PACK).
- L'analyse de sensibilité du seuil de préférence stricte relatif au critère de la consommation énergétique est réalisée en variant le seuil entre 15 MJ et 120 MJ. Là-aussi, la variante FR-PACK reste en tête de classement pour l'ensemble des combinaisons étudiées. Lorsque le seuil de préférence stricte est élevé (≥ 45 MJ), alors la variante REF-HOT 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 référence.

Critère: Coût énergétique		BASE	Seuil de préférence stricte p_j [CHF]					
		0.75	0.40	0.90	1.30	1.70	2.50	3.60
Classement des variantes	REF-HOT	3	3	3	2	2	2	2
	FR-WAX	5	5	5	4	4	3	3
	FR-PACK	1	1	1	1	1	1	1
	PA-HWAM	4	4	4	5	5	5	5
	EBT	2	2	2	3	3	4	4

Critère: Energie		BASE	Seuil de préférence stricte p_j [MJ]					
		25	15	30	45	60	90	120
Classement des variantes	REF-HOT	3	3	3	2	2	2	2
	FR-WAX	5	5	4	4	4	4	4
	FR-PACK	1	1	1	1	1	1	1
	PA-HWAM	4	4	5	5	5	5	5
	EBT	2	2	2	3	3	3	3

Fig. 58 Exemple de calcul, agrégation partielle niveau 3: Analyse de sensibilité du seuil de préférence stricte

Une analyse de sensibilité du même type peut être réalisée pour le seuil de veto; donnée pour rappel volontariste dont l'utilisateur peut choisir de se passer. Les résultats d'une telle analyse ne modifient globalement pas le choix de la variante préférée (FR-PACK), une rocade entre les variantes de fin de classement (FR-WAX, PA-HWAM) étant observée selon les valeurs de seuils. Lors de l'analyse du seuil de veto de la performance en fatigue (figure 59), nous pouvons observer que la variante FR-PACK est préférée, si le seuil de veto est $\geq 10 \mu\text{m}$. Pour un seuil de veto inférieur à cette valeur la variante REF-HOT se classe en première position en raison des bonnes performances en fatigue de cet enrobé comparativement à la variante FR-PACK. Un seuil de veto aussi bas n'est cependant pas recommandé, ni réaliste, car l'analyse s'en trouve alors biaisée.

Performance: Fatigue		BASE	Seuil de veto v_i [μm]			
		16	5	9	13	17
Classement des variantes	REF	3	1	1	3	3
	ET-C	5	5	5	5	5
	ET-P	1	3	3	1	1
	EST	4	4	4	4	4
	EBT	2	2	2	2	2

Fig. 59 Exemple de calcul, agrégation partielle niveau 3: Analyse de sensibilité du seuil de veto critère fatigue (performance mécanique)

La détermination du seuil de veto est complexe et elle peut passablement biaiser les résultats. Pour cela, les spécialistes recommandent parfois de ne pas appliquer de seuil de veto sur les critères financiers afin que ces derniers ne soient pas discriminants dans l'analyse. Nous effectuons un bref calcul (logiciel Electre III/IV) de deux variantes soit sans et avec seuil de veto sur le critère de coût énergétique. Les résultats de la distillation sont présentés dans la figure 60. Nous pouvons observer que sans seuils de veto, la variante EBT est alors préférée, l'enrobé FR-PACK étant en seconde position. Dans tous les cas, la variante FR-WAX reste la moins performante. Un classement selon la méthode de Siskos-Huber amène des résultats identiques.

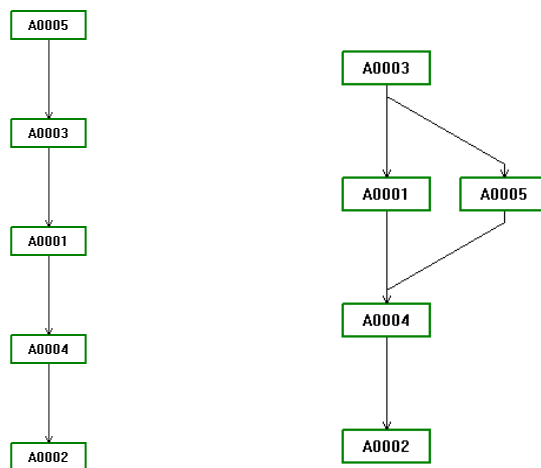


Fig. 60 Exemple de calcul, agrégation partielle niveau 3: Analyse de sensibilité du seuil de veto sur le critère de coût (gauche: sans seuil, droite avec seuil)

Nous pouvons finalement illustrer l'apport des méthodes d'aide à la décision en proposant un classement des différentes variantes, pour chaque critère, ceci sur la base de la matrice de performances brutes (figure 61). Selon la moyenne des différents classements obtenus pour les 8 critères, l'enrobé EBT est le plus performant (2.5), devant l'enrobé REF-HOT (2.6). L'enrobé FR-PACK n'est alors qu'en troisième position. Cette donnée n'est cependant que peut représentative ceci car elle ne prend pas en considération l'ampleur de la différence entre les variantes, ni les préférences de l'utilisateur. Une telle représentation pourra cependant s'avérer suffisante dans le cas de surclassement complet, identifié au second niveau de la méthodologie mise en place.

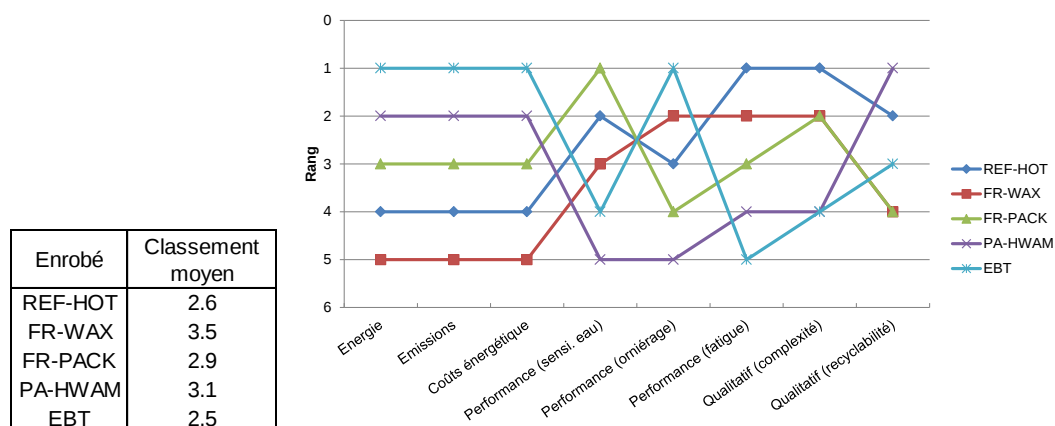


Fig. 61 Exemple de calcul, agrégation partielle niveau 3: Classement des variantes pour chaque critère individuel

5.3.4 Niveau 4: Agrégation complète

Comme pour le calcul précédent d'agrégation partielle (niveau 3), la solution de référence du calcul d'agrégation complète est déterminée en utilisant les valeurs de base proposées pour les paramètres suivants; la robustesse de la solution étant évaluée dans une seconde phase:

- Pondération (figure 44).
- Matrices de transformation pour critères qualitatifs (Tab. 8) et quantitatifs (Tab. 9).
- Fonction d'utilité (Tab. 10).

Comme précédemment, nous supposons que la matrice de performances brutes (figure 62) ne sera pas variée. Pour rappel, les critères qualitatifs sont évalués de manière à introduire une part d'inconnue dans l'évaluation (par les matrices de transformation).

					1	2	3	4	5			
	Critère Niveau 1		Critère Niveau 2		Critère Niveau 3		Unités	REF-HOT	FR-WAX	FR-PACK	PA-HWAM	EBT
C. quantitatifs	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	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]	120	117	111	108	90		
	C5	Qualitatifs	C5.1	Complexité	C5.1.1	Séquence	-	A	C	C	G	
					C5.1.2	Insertion additif	-	A	C	C	C	
					C5.1.3	Eau	-	A	A	A	G	G
C5.2			Recyclabilité	C5.2.1	Additifs utilisés	-	A	F	F	D	F	
				C5.2.2	Vieillessement	-	E	C	C	A	A	
				C5.2.3	Retraitement	-	A	A	A	A	A	

Fig. 62 Exemple de calcul, agrégation complète niveau 4: Matrice de performances brutes

Discussion des résultats

Le degré de croyance des différentes variantes (*i.e.* enrobés) et ceci pour chaque degré d'évaluation (mauvais, faible, moyen, bon, excellent) est représenté dans la figure 63. Nous pouvons observer que l'enrobé FR-WAX 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 laisse suspecter un mauvais classement final de cette variante. Le degré de croyance élevé des variantes FR-PACK et EBT pour le degré d'évaluation "bon" peut également être observé, la différence finale entre ces deux variantes étant cependant difficile à quantifier sur cette seule base. La faible part d'inconnue pour l'ensemble des enrobés (< 1%) est liée à la matrice de transformation utilisée pour les critères qualitatifs.

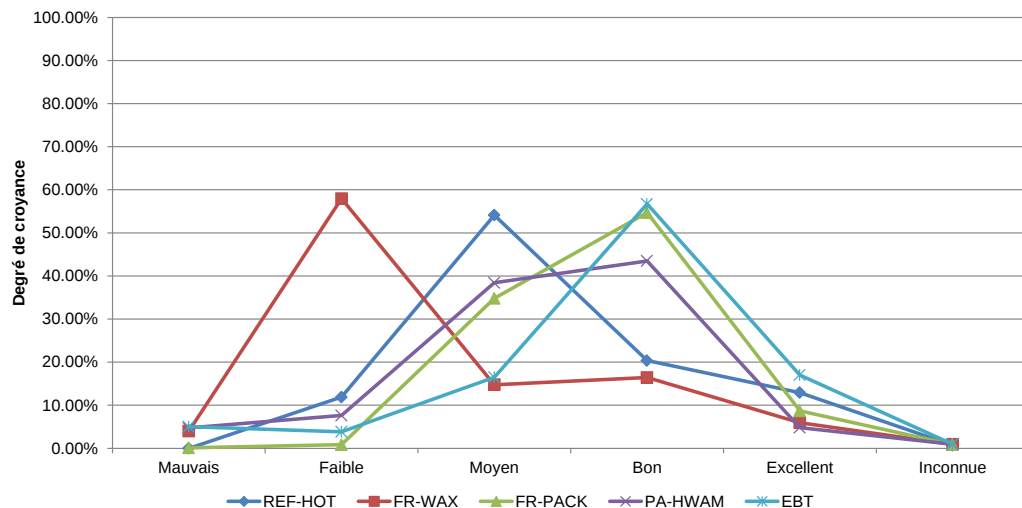


Fig. 63 Exemple de calcul, agrégation complète niveau 4: Représentation des degrés de croyance

Le calcul de l'utilité permet finalement de proposer un classement des variantes (figure 64). La variante EBT est classée en première position dans ce cas de base ($U_{\min}(\text{EBT}) > U_{\max}(\text{FR-PACK})$). Son utilité est cependant très proche de la variante FR-PACK classée en seconde position. Ensuite, les variantes PA-HWAM (troisième position) et REF-HOT (quatrième position) montrent également une utilité moyenne très proche l'une de l'autre. La variante FR-WAX présente une utilité sensiblement plus faible que les autres enrobés pour ce cas de référence.

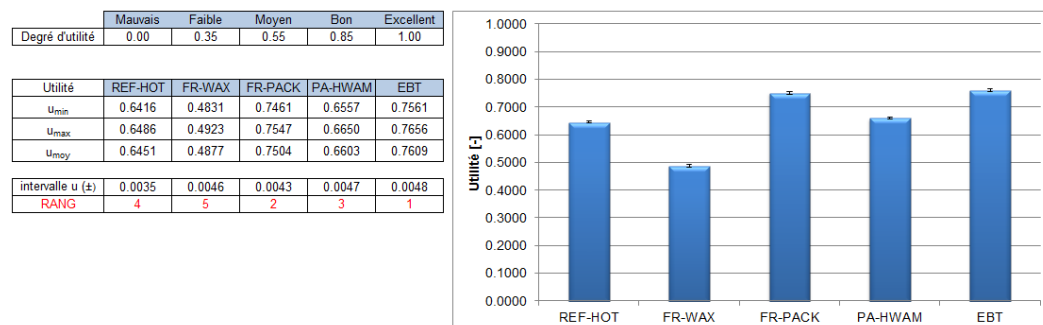


Fig. 64 Exemple de calcul, agrégation complète niveau 4: Calcul de l'utilité du cas de référence

Analyse de robustesse

Comme pour le troisième niveau d'analyse, la robustesse de la solution est évaluée par une analyse de sensibilité sur les paramètres variables soit pondération, matrices de transformation (qualitatif et quantitatif) et fonction d'utilité.

La variation de la pondération se fait selon la méthode explicitée au troisième niveau d'analyse. Les résultats sont proposés dans la figure 65 (coûts énergétiques), la figure 66 (performances mécaniques) et la figure 67 (critères qualitatifs). Nous pouvons observer:

- La variation de la pondération allouée au coût énergétique influence le classement de la variante de tête. Lorsque le poids alloué à ce critère 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 FR-PACK est classée en première position. De même, lorsque le poids du critère inférieur à 25%, alors la variante REF-HOT se classe en troisième position, en lieu et place de la variante PA-HWAM qui lui est préférée lorsque l'importance du critère est supérieure à 25%. Pour les différents cas évalués, l'enrobé FR-WAX subsiste en fin de classement.

- Les mécanismes sont globalement comparables lorsque le poids du critère de performances est varié. En raison de ses meilleures performances mécaniques que la variante EBT, la variante FR-PACK est alors préférée lorsque l'importance relative à ce critère est $\geq 30\%$.
- Si la pondération allouée au critère qualitatif est supérieure à 15%, alors la variante FR-PACK est préférée à la variante EBT en tête de classement.
- Il apparaît finalement que la solution de référence obtenue est légèrement moins robuste que pour l'agrégation partielle, la variante FR-PACK pouvant selon les choix de pondérations être préférée à la variante EBT. En troisième et quatrième position de classement, les enrobés REF-HOT et PA-HWAM sont également très proches, le classement dépendant de la pondération. Comme précédemment, la variante FR-WAX apparaît systématiquement en dernière position du classement.

				Variation de pondération du critère de coût énergétique						
				30%	25%	20%	40%	45%	50%	
				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%	31.6%	27.8%	23.5%	38.1%	40.9%	43.5%	
	Critères peformantiels	ω_4	25.0%	26.3%	27.8%	29.4%	23.8%	22.7%	21.7%	
	Critères qualitatifs	ω_5	15.0%	15.8%	16.7%	17.6%	14.3%	13.6%	13.0%	
				Classement des variantes						
Classement	REF-HOT	a1	4	4	3	3	4	4	4	
	FR-WAX	a2	5	5	5	5	5	5	5	
	FR-PACK	a3	2	1	1	1	2	2	2	
	PA-HWAM	a4	3	3	4	4	3	3	3	
	EBT	a5	1	2	2	2	1	1	1	

Fig. 65 Exemple de calcul, agrégation complète niveau 3: Analyse de sensibilité de la pondération – critère coût énergétique

				Variation de pondération des critères de performances						
				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 des variantes						
Classement	REF-HOT	a1	4	4	4	4	4	3	3	
	FR-WAX	a2	5	5	5	5	5	5	5	
	FR-PACK	a3	2	2	2	2	1	1	1	
	PA-HWAM	a4	3	3	3	3	3	4	4	
	EBT	a5	1	1	1	1	2	2	2	

Fig. 66 Exemple de calcul, agrégation complète niveau 3: Analyse de sensibilité de la pondération – critère performances mécaniques

				Variation de pondération des critères qualitatifs			
				10%	5%	0%	20%
Poids des critères	Energie	ω_1	BASE	Calcul des pondérations			
			12.5%	13.2%	13.9%	14.7%	11.9%
			12.5%	13.2%	13.9%	14.7%	11.9%
			35.0%	36.8%	38.9%	41.2%	33.3%
			25.0%	26.3%	27.8%	29.4%	23.8%
			15.0%	10.5%	5.6%	0.0%	19.0%
				Classement des variantes			
Classement	REF-HOT	a1	4	4	4	4	3
	FR-WAX	a2	5	5	5	5	5
	FR-PACK	a3	2	2	2	2	1
	PA-HWAM	a4	3	3	3	3	4
	EBT	a5	1	1	1	1	2

Fig. 67 Exemple de calcul, agrégation complète niveau 3: Analyse de sensibilité de la pondération – critères qualitatifs

Les résultats de l'analyse de sensibilité de la matrice de transformation des critères quantitatifs relatifs au coût énergétique (figure 68) et aux émissions (figure 69) sont proposés ci-dessous.

Pour la matrice de transformation du coût énergétique, un resserrement des limites entre le degré d'évaluation "faible" et "bon" (cas 1) a pour conséquence de positionner la variante FR-PACK en tête de classement. Cette même variante FR-PACK 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 FR-WAX est systématiquement en cinquième position, les enrobés REF-HOT et PA-HWAM se partageant la troisième et quatrième position du classement selon les cas.

		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-HOT	4	4	3	3	4
	FR-WAX	5	5	5	5	5
	FR-PACK	2	1	1	1	2
	PA-HWAM	3	3	4	4	3
	EBT	1	2	2	2	1

Fig. 68 Exemple de calcul, agrégation complète niveau 3: Analyse de sensibilité de la matrice de transformation – critère coût énergétique (quantitatif)

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 "excellent" (cas 1), un resserrement entre le degré d'évaluation "faible" et "moyen" (cas 2) et une répartition linéaire entre les émissions minimale et maximale calculées lors de l'ICV. Pour l'ensemble des cas testés, le classement final est identique à celui obtenu pour le cas de base soit la variante EBT en tête de classement.

Une analyse de la matrice de transformation du critère relatif à l'énergie ne modifie pas le classement obtenu pour le cas de base.

		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-HOT	4	4	4	4
	FR-WAX	5	5	5	5
	FR-PACK	2	2	2	2
	PA-HWAM	3	3	3	3
	EBT	1	1	1	1

Fig. 69 Exemple de calcul, agrégation complète niveau 3: Analyse de sensibilité de la matrice de transformation – critère émissions (quantitatif)

Une analyse de sensibilité des matrices de transformation des critères qualitatifs par variation de la part d'inconnue n'amène pas de modification dans le choix de la variante préférée (EBT), une augmentation de la part d'inconnue (30%) aboutissant également au même choix de la variante préférée.

La dernière analyse de sensibilité menée concerne la fonction d'utilité qui, pour rappel, peut par exemple traduire la propension du décideur à prendre des risques. Les résultats sont consignés dans la figure 70 où nous pouvons observer que les variantes préférées restent soit l'enrobé EBT ou alors l'enrobé FR-PACK avec additif chimique (agent tensio-actif). Ces résultats corroborent les observations faites lors des autres analyses de sensibilité.

		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-HOT	4	4	4	4
	FR-WAX	5	5	5	5
	FR-PACK	2	2	1	2
	PA-HWAM	3	3	3	3
	EBT	1	1	2	1

Fig. 70 Exemple de calcul, agrégation complète niveau 3: Analyse de sensibilité de la fonction d'utilité

Nous pouvons finalement indiquer que la théorie de l'Evidence a (notamment) pour avantage de pouvoir considérer une matrice de performances brutes incomplète. Ainsi, il est possible de ne pas renseigner certaines performances en cas d'absence de 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 donc 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% au lieu de 0.95% dans le calcul de référence. La relation $u_{\min}(\text{EBT}) \geq u_{\max}(\text{FR-PACK})$ n'est alors plus vérifiée et il est alors nécessaire de calculer le degré de préférence P de la variante EBT par rapport à la variante FR-PACK qui lui est la plus proche. Le degré de préférence est déterminé ainsi :

$$P(\text{EBT} > \text{ET} - P) = \frac{\max[0, u_{\max}(\text{EBT}) - u_{\min}(\text{ET} - P)] - \max[0, u_{\min}(\text{EBT}) - u_{\max}(\text{ET} - P)]}{[u_{\max}(\text{EBT}) - u_{\min}(\text{EBT})] + [u_{\max}(\text{ET} - P) - u_{\min}(\text{ET} - P)]}$$

$$= 69\%$$

- 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 référence. La variante EBT est toujours en tête de classement, le degré de préférence $P(\text{EBT} > \text{FR-PACK})$ est alors de 91%.

5.4 Discussion des résultats

L'exemple de calcul proposé dans ce chapitre consiste à comparer différents types d'enrobés tièdes avec une référence à chaud. Les données utilisées sont issues de résultats d'essais réalisés dans le cadre du projet PLANET (performances mécaniques) ou alors de données récoltées jugées réalistes et représentatives pour le contexte de l'étude (ICV). Bien que cet exemple soit illustratif, il propose tout de même une première tendance dans l'aide à la décision relative au choix d'une technologie d'enrobé tiède. Il

est également important de garder à l'esprit que les résultats obtenus ne peuvent être généralisés. Chaque étude demandera en effet une analyse particulière relative à son contexte et hypothèse de base. La méthodologie restera cependant la même.

Les calculs réalisés mettent en évidence les éléments suivants :

- 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. Ainsi, on pourra par exemple mieux identifier les phases du cycle de vie pour lesquelles il semble davantage pertinent d'investir du temps dans la recherche de données précises.
- Les résultats et tendances obtenus aux différents niveaux d'analyse sont consistants. Chaque niveau 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 référence, mais l'analyse de robustesse de la solution fournit des compléments importants permettant d'affiner le choix.
- L'étude par agrégation partielle identifie clairement deux groupes de variantes. Dans le groupe de tête, les enrobés REF-HOT, FR-PACK et EBT. Parmi ces trois enrobés, le mélange FR-PACK 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 PA-HWAM et FR-WAX.
- 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 FR-PACK présentent une utilité moyenne très proche. La solution de référence calculée préfère la variante EBT. L'analyse de sensibilité de la solution de référence indique que selon les conditions (pondération par exemple), la variante FR-PACK peut alors être préférée. La solution proposée est moins robuste que lors de l'analyse par agrégation partielle, les variantes EBT et FR-PACK étant très proches. Dans un deuxième groupe les variantes PA-HWAM et REF-HOT se partagent la troisième et quatrième place, ceci selon les hypothèses de base. La variante FR-WAX arrive en cinquième position du classement pour le cas étudié.
- Finalement et sur la base des calculs réalisés, il semble que la variante FR-PACK soit globalement préférée. 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 FR-PACK 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-HOT et PA-HWAM se situent en troisième et quatrième position, ceci selon les préférences de l'utilisateur (pondération) et les hypothèses de base. Parmi les enrobés étudiés, nous pouvons relever la variante FR-WAX se positionne 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 FR-PACK. Cette quantité élevée d'additif pèse sur le bilan sur le cycle de vie et les bonnes performances mécaniques de l'enrobé avec cire ne permettent pas de compenser suffisamment le "déficit" calculé sur le cycle de vie.

6 Conclusions et recommandations

Différents principes existent afin de produire des enrobés tièdes, engendrant ainsi de nombreux produits dont les performances mécaniques, les gains énergétiques et l'impact sur les émissions au cours du cycle de vie sont variables. De plus, selon le type de produit appliqué les impacts sur la centrale d'enrobage ainsi que son éventuelle recyclabilité en fin de vie seront également différents. Afin de promouvoir l'utilisation des enrobés tièdes (ou autres technologie potentiellement prometteuse), une aide à la décision doit alors être proposée ceci tant pour le producteur d'enrobé que pour le maître d'œuvre. Plus qu'un classement de différentes options, la solidité de la solution proposée ainsi que l'ampleur de la différence entre les variantes doivent être quantifiées.

La présente recherche RS-5 est positionnée au cœur du projet PLANET et elle a pour objectif de fournir une méthodologie relative à l'évaluation de technologies d'enrobés, mais également son implémentation concrète.

6.1 Conclusions

La recherche réalisée propose dans un premier temps une large vision des méthodes d'évaluation environnementales ainsi que de l'aide à la décision. Sur la base de ces analyses, le modèle PLANET a été développé. L'intérêt de la méthodologie proposée consiste notamment 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. De plus, la combinaison de méthodes permet de valider les résultats obtenus précédemment et confronter différentes procédures d'analyse confortant ainsi l'évaluation finalement obtenue.

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 dans le cadre de cette recherche. La méthodologie d'évaluation proposée offre un outil pertinent, flexible et complet pour l'aide à la décision.

Le modèle PLANET 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.

L'utilisation de méthodes multicritères spécifiques est réalisée dès le troisième niveau d'analyse dans lequel des critères qualitatifs sont également pris en compte. Le troisième niveau intègre également 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 sur l'ensemble du cycle de vie, mais également les performances mécaniques de l'enrobé ainsi que des critères qualitatifs tels que la complexité du processus de fabrication et le potentiel de recyclabilité.

La mise en place de la méthodologie est effectuée au format MS-Excel (VBA), l'outil final étant disponible et gratuit pour tout utilisateur potentiel.

Un exemple d'application est également proposé, exemple dans lequel un enrobé tiède avec cire, un enrobé tiède avec ajout d'additif chimique (agent tensio-actif), un enrobé

tiède avec moussage du bitume et un enrobé semi-tiède sont comparés à un enrobé de référence à chaud. Les résultats obtenus montrent globalement les bonnes performances de l'enrobé avec additif chimique et de l'enrobé semi-tiède, l'enrobé tiède avec ajout de cire étant fortement pénalisé par la quantité importante d'additif dont l'impact sur le cycle de vie ne peut être totalement compensé par de bonnes performances mécaniques (orniérage notamment). Outre le classement des variantes qui est propre à cet exemple traité, la mise en application de la méthodologie démontre la pertinence et l'apport d'un tel modèle dans l'aide à la décision du type d'enrobé.

Le modèle s'avère finalement être un outil important de promotion et dissémination des technologies à faibles impacts énergétiques et environnementaux. On pourra notamment imaginer son application dans le support à l'évaluation des offres, permettant ainsi de proposer un classement des alternatives au mandant ainsi qu'une évaluation de la robustesse de ce classement. Son utilisation permettra finalement de classer différentes options de manière technique et objective.

6.2 Recommandations et perspectives

La mise en place d'un modèle multicritère d'aide à la décision, selon une procédure transparente et paramétrable, est un outil important pour lequel de nombreuses perspectives peuvent être envisagées. On pourra notamment envisager les développements futurs suivants du modèle global d'évaluation:

- 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.
- Création d'une base de données de calculs (cases studies) ainsi que d'une base de données relatives aux performances mécaniques d'enrobés à faibles impacts énergétiques et écologiques.
- 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.

La réalisation de ce projet a également mis en évidence différents défis dans le domaine de l'évaluation environnementale des matériaux de chaussée, parmi lesquels nous pouvons citer:

- Etablir des méthodes d'évaluation de la qualité et des incertitudes des données utilisées.
- 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.
- 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 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.
- 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.

Les différentes considérations ci-dessus relatives à l'évaluation environnementale des chaussées ainsi que le modèle multicritère d'aide à la décision constituent également un apport potentiel pour la normalisation. La prise en compte des aspects environnementaux (et du changement climatique) est en effet une problématique importante, matérialisée au sein de la VSS par la création des commissions et/ou groupes de travail spécifiques. Ainsi, il pourrait être envisagé d'exploiter les enseignements relatifs à l'évaluation des variantes de chaussées afin de créer un guide ou un outil voire norme pouvant être utilisé et reconnu par l'ensemble de la profession. Une démarche de ce type a par exemple été réalisée en France avec la création d'un éco-comparateur "commun" à l'ensemble de la profession.

Annexes

I	Annexe I: Algorithme théorie de l'évidence pour aide à la décision	119
I.1	Données de base et conventions.....	119
I.2	Acquisition des informations et représentation	119
I.3	Pondération et probabilités de base	119
I.4	Agrégation des attributs	120
I.5	Calcul des degrés de croyance combinés	121
I.6	Théorie de l'Evidence: Exemple de calcul	121
I.6.1	Matrice de décision	121
I.6.2	Pondération et probabilités de base	121
I.6.3	Algorithme d'agrégation	122
I.6.4	Calcul des degrés de croyance combinés	123
II	Annexe II: Exemple de calcul	125

I Annexe I: Algorithme théorie de l'évidence pour aide à la décision

Nous proposons ici le détail de l'algorithme appliqué dans la procédure de décision (chapitre 3.4.5).

I.1 Données de base et conventions

Soit un système contenant L critères e_i ($i=1, \dots, L$). L'ensemble des critères E est alors défini par:

$$E=\{e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_L\}$$

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_i [$i=1, \dots, M$].

I.2 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 (belief degree). 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 $S(e_i)$.

I.3 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, ce qui 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 [74]. 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 ci-dessous).
- 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 et utilisé dans le cadre de ce projet. Pour la normalisation des poids, nous considérons la relation suivante :

$$1 = \sum_{i=1}^L \omega_i$$

La méthode de normalisation choisie 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 alors décomposée en deux parties :

$$m_{H,i} = \bar{m}_{H,i} + \tilde{m}_{H,i}$$

$$\bar{m}_{H,i} = 1 - \omega_i$$

$$\tilde{m}_{H,i} = \omega_i \left(1 - \sum_{n=1}^N \beta_{n,i} \right)$$

$\bar{m}_{H,i}$ est la première partie de la masse de probabilité non encore assignée à des degrés d'évaluation individuelle. $\tilde{m}_{H,i}$ 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.

I.4 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 récursive :

$\{H_n\}$:

$$m_{n,I(i+1)} = K_{I(i+1)} \cdot [m_{n,I(i)}m_{n,i+1} + m_{H,I(i)}m_{n,i+1} + m_{n,I(i)}m_{H,i+1}]$$

$$m_{H,I(i)} = \tilde{m}_{H,I(i)} + \bar{m}_{H,I(i)}$$

$n=\{1, 2, \dots, N\}$

$\{H\}$:

$$\tilde{m}_{H,I(i+1)} = K_{I(i+1)} [\tilde{m}_{H,I(i)}\tilde{m}_{H,i+1} + \bar{m}_{H,I(i)}\tilde{m}_{H,i+1} + \tilde{m}_{H,I(i)}\bar{m}_{H,i+1}]$$

$$\bar{m}_{H,I(i+1)} = K_{I(i+1)} \cdot [\bar{m}_{H,I(i)}\bar{m}_{H,i+1}]$$

$$K_{I(i+1)} = \left[1 - \sum_{t=1}^N \sum_{j=1, j \neq t}^N m_{t,I(i)} m_{j,i+1} \right]^{-1}$$

$$i=\{1, 2, \dots, L-1\}$$

I.5 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 :

$$\{H_n\}: \quad \beta_n = \frac{m_{n,I(L)}}{1 - \bar{m}_{H,I(L)}} \quad n=\{1, 2, \dots, N\}$$

$$\{H\}: \quad \beta_H = \frac{\bar{m}_{H,I(L)}}{1 - \bar{m}_{H,I(L)}}$$

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.

I.6 Théorie de l'Evidence: Exemple de calcul

L'algorithme pour le calcul selon la théorie de l'Evidence est la partie la plus complexe de la procédure mise en place. Des outils informatiques sont nécessaires pour réaliser de nombreuses itérations, une programmation VBA ayant été utilisée dans le cadre de ce projet. Afin d'illustrer la méthodologie et valider la procédure de calcul implémentée, nous proposons ici un petit exemple illustratif.

I.6.1 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. Relevons que l'évaluation selon le critère e_2 est incomplète ($\Sigma=0.8$).

Tab. 18 Exemple de calcul – Matrice de décision

Critère	Mauvais	Faible	Moyen	Bon	Excellent
Energie (e1)			0.5	0.5	
Emissions (e2)				0.8	
Coûts (e3)		0.3	0.7		

Critères e_i $i=1, 2, 3$ ($L=3$)

Degrés d'évaluation H_n $n=1, 2, 3, 4, 5$ ($N=5$)

I.6.2 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 $m_{n,i}$:

$$m_{1,1}=0 \quad m_{2,1}=0 \quad m_{3,1}=0.25 \quad m_{4,1}=0.25 \quad m_{5,1}=0$$

$m_{1,2}=0$	$m_{2,2}=0$	$m_{3,2}=0$	$m_{4,2}=0.20$	$m_{5,2}=0$
$m_{1,3}=0$	$m_{2,3}=0.075$	$m_{3,3}=0.175$	$m_{4,3}=0$	$m_{5,3}=0$

Les masses de probabilités non assignées sont également calculées :

$m_{H,1}=0.50$	$\tilde{m}_{H,1}=0$	$\bar{m}_{H,1}=0.50$
$m_{H,2}=0.80$	$\tilde{m}_{H,2}=0.05$	$\bar{m}_{H,2}=0.75$
$m_{H,3}=0.75$	$\tilde{m}_{H,3}=0$	$\bar{m}_{H,3}=0.75$

I.6.3 Algorithme d'agrégation

i=1

$$\begin{aligned}
 K_{I(2)} &= [1 - m_{1,I(1)}m_{2,2} + m_{1,I(1)}m_{3,2} + m_{1,I(1)}m_{4,2} + m_{1,I(1)}m_{5,2} + \\
 &\quad m_{2,I(1)}m_{1,2} + m_{2,I(1)}m_{3,2} + m_{2,I(1)}m_{4,2} + m_{2,I(1)}m_{5,2} + \\
 &\quad m_{3,I(1)}m_{1,2} + m_{3,I(1)}m_{2,2} + m_{3,I(1)}m_{4,2} + m_{3,I(1)}m_{5,2} + \\
 &\quad m_{4,I(1)}m_{1,2} + m_{4,I(1)}m_{2,2} + m_{4,I(1)}m_{3,2} + m_{4,I(1)}m_{5,2} + \\
 &\quad m_{5,I(1)}m_{1,2} + m_{5,I(1)}m_{2,2} + m_{5,I(1)}m_{3,2} + m_{5,I(1)}m_{4,2}]^{-1} \\
 &= [1 - 0.20 \cdot 0.25]^{-1} = 1.053
 \end{aligned}$$

$$m_{1,I(2)} = K_{I(2)}[m_{1,1}m_{1,2} + m_{H,1}m_{1,2} + m_{1,1}m_{H,2}] = 0$$

$$m_{2,I(2)} = K_{I(2)}[m_{2,1}m_{2,2} + m_{H,1}m_{2,2} + m_{2,1}m_{H,2}] = 0$$

$$m_{3,I(2)} = K_{I(2)}[m_{3,1}m_{3,2} + m_{H,1}m_{3,2} + m_{3,1}m_{H,2}] = 0.210$$

$$m_{4,I(2)} = K_{I(2)}[m_{4,1}m_{4,2} + m_{H,1}m_{4,2} + m_{4,1}m_{H,2}] = 0.368$$

$$m_{5,I(2)} = K_{I(2)}[m_{5,1}m_{5,2} + m_{H,1}m_{5,2} + m_{5,1}m_{H,2}] = 0$$

$$\tilde{m}_{H,I(2)} = K_{I(2)}[\tilde{m}_{H,1}\tilde{m}_{H,2} + \bar{m}_{H,1}\tilde{m}_{H,2} + \tilde{m}_{H,1}\bar{m}_{H,2}] = 0.026$$

$$\bar{m}_{H,I(2)} = K_{I(2)}[\bar{m}_{H,I(1)}\bar{m}_{H,I(2)}] = 0.395$$

$$m_{H,I(1)} = 0.026 + 0.395 = 0.421$$

i=2

$$\begin{aligned}
 K_{I(3)} &= [1 - m_{1,I(2)}m_{2,3} + m_{1,I(2)}m_{3,3} + m_{1,I(2)}m_{4,3} + m_{1,I(2)}m_{5,3} + \\
 &\quad m_{2,I(2)}m_{1,3} + m_{2,I(2)}m_{3,3} + m_{2,I(2)}m_{4,3} + m_{2,I(2)}m_{5,3} + \\
 &\quad m_{3,I(2)}m_{1,3} + m_{3,I(2)}m_{2,3} + m_{3,I(2)}m_{4,3} + m_{3,I(2)}m_{5,3} + \\
 &\quad m_{4,I(2)}m_{1,3} + m_{4,I(2)}m_{2,3} + m_{4,I(2)}m_{3,3} + m_{4,I(2)}m_{5,3} + \\
 &\quad m_{5,I(2)}m_{1,3} + m_{5,I(2)}m_{2,3} + m_{5,I(2)}m_{3,3} + m_{5,I(2)}m_{4,3}]^{-1} \\
 &= [1 - 0.210 \cdot 0.075 + 0.368 \cdot (0.075 + 0.175)]^{-1} = 1.121
 \end{aligned}$$

$$m_{1,I(3)} = K_{I(3)}[m_{1,2}m_{1,3} + m_{H,2}m_{1,3} + m_{1,2}m_{H,3}] = 0$$

$$m_{2,I(3)} = \dots = 0.035$$

$$m_{3,I(3)} = \dots = 0.301$$

$$m_{4,I(3)} = \dots = 0.309$$

$$m_{5,I(3)} = \dots = 0$$

$$\tilde{m}_{H,I(3)} = \dots = 0.022$$

$$\bar{m}_{H,I(3)} = \dots = 0.332$$

$$m_{H,I(3)} = \dots = 0.354$$

I.6.4 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 calculées.

Annexe II: Exemple de calcul

Fig. 71 Exemple de calcul: Résultat ICV enrobé REF-HOT

Glossaire

Terme	Signification
AC T	Enrobé bitumineux dense pour couche de base (AC T)
AC EME	Enrobé bitumineux dense à module élevé (AC EME)
ACB	Analyse coûts-bénéfices (ACB)
ACC	Analyse du cycle des coûts (ACC)
ACV	Analyse du cycle de vie (ACV)
LCA	Life Cycle Analysis (LCA)
AFS	analyse de flux de substance (AFS)
BEES	Building for Environmental and Economic Sustainability (BEES)
CMA	Cold Mix Asphalt (CMA)
CHF	Franc suisse (CHF)
CH ₄	Méthane (CH ₄)
CO	monoxyde de carbone (CO)
CO ₂	Dioxyde de carbone (CO ₂)
COV	Composés organiques volatiles (COV)
EAPA	European Asphalt Pavement Association (EAPA)
EBT	Enrobé basse température (EBT)
ECRPD	Energy Conservation in Road Pavement Design, Maintenance and Utilisation (ECRPD)
ECORCE2	ECO comparateur Routes Construction Entretien (ECORCE2)
EF	Ecofacteur (EF)
EIE	Etude d'impact sur l'Environnement (EIE)
EIO	Economic Input-Output model (EIO)
EPFL	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
EPS	Environmental Priority Strategies in Product Design (EPS)
FNTF	Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTF)
GB	Grabe bitume (GB)
GES	gaz à effet de serre (GES)
HFC	Hydrofluorocarbones (HFC)
H ₂ O	Eau (H ₂ O)
HWAM	Procédé semi-tièdes dont le principe de base consiste à utiliser l'humidité contenue dans les fractions de sable (HWAM)
IDS	Intelligent Decision System (IDS)
IFSTTAR	Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR)
ISO	Organisation Internationale de la Normalisation (ISO)
IVL	Recherche Environnementale suédois (IVL)
LAVOC	Laboratoire des voies de circulation (LAVOC)
LAMSADE	Laboratoire d'analyse et de modélisation de systèmes pour l'aide à la décision (LAMSADE)
LCI	Life Cycle Inventory (LCI)
MAUT	Multi attribute utility theory (MAUT)

NTA	Niedertemperaturasphalt (NTA)
NO _x	Oxyde d'azote (NO _x)
N ₂ O	Oxyde nitreux (N ₂ O)
O ₃	Ozone (O ₃)
PA	Procédés additionnels (PA)
PACK	Procédé avec package d'additif (PACK)
PaLATE	Pavement Lifecycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects (PaLATE)
PCI	Pouvoir calorifique inférieur (PCI)
PCS	Pouvoir calorifique supérieur (PCS)
PFC	hydrocarbures perfluorés (PCF)
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE)
PLANET	Potentiel et analyse des enrobés tièdes (PLANET)
PRG	Potentiel de réchauffement global (PRG)
GWP	<i>Global Warming Potential (GWP)</i>
REF-HOT	Référence à chaud (REF-HOT)
RS	Recherche spécifique (RS)
SETAC	Société de Toxicologie et de Chimie Environnementale (SETAC)
SEVE	Système d'Evaluation des Variantes Environnementales (SEVE)
SF6	Hexafluorure de soufre (SF6)
SN	Normes suisses (SN)
TRACI	Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts (TRACI)
UF	Unité fonctionnelle (UF)
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)
WAX	Procédé utilisant de la cire (WAX)
ZEO	Procédé utilisant de la zéolite (ZEO)

Bibliographie

Normes

- [1] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2013), « **Mélanges bitumineux - Spécifications des matériaux – Partie 1: Enrobés bitumineux** » *SN 640431-1-NA*.
- [2] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2008), « **Evaluation des projets d'infrastructure routière du point de vue du développement durable; norme de base** », *SN 641800*.

Documentation

- [3] Bueche N., Dumont A.-G. et Angst C. (2009), « **Projet initial - Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques** », *Rapport VSS 2008/502. VSS. Zürich*.
- [4] Bueche N. (2011), « **Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques** ». *Thèse EPFL N° 5169*.
- [5] Jolliet, O., M. Saadé, et al. (2005), « **Analyse du cycle de vie - comprendre et réaliser un écobilan** », Lausanne.
- [6] Consoli, F., D. Allen, et al. (1990), « **Guidelines for Life-Cycle Assessment: A "Code of Practice"** », *Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC)*.
- [7] 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*.
- [8] 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.
- [9] 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*.
- [10] Bueche N., Dumont A.-G., Schobinger B. et al. (2016), « **PLANET RS-1: Impacts sur les centrales d'enrobage** », *Rapport VSS*.
- [11] Hertig, J.-A. (2006), « **Etudes d'impact sur l'environnement** », *Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR)*.
- [12] 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*.
- [13] Harvey, J., N. Santero, et al. (2010), « **Pavement life cycle assessment workshop** », *University of California Pavement Research Center (UCPRC)*.
- [14] Blomberg, T. (2000), « **The increasing importance of environmental thinking through life cycle assessment** », *Eurasphalt & Eurobitume Congress 2000, Barcelona (Spain): 12*.
- [15] Stripple, H. (2001), « **Life cycle assessment of a road - A pilot study for inventory analysis** », *Swedish Environmental Research Institute (IVL): 96, Gothenburg (Sweden)*.
- [16] Häkkinen, T. et K. Mäkelä (1996), « **Environmental impact of concrete and asphalt pavement** », *Technical Research Center of Finland (VTT): 95, Espoo (Finland)*.
- [17] 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*.
- [18] 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*.
- [19] Bilal, J. et M. Chappat (2003), « **Développement durable: La route écologique du futur, analyse du cycle de vie** », *Colas: 40, Paris (France)*.
- [20] 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*.
- [21] Cholava, R. (2009), « **ECRPD Project - WP6 - Life Cycles Evaluation** »
- [22] Mroueh, U.-M., P. Eskola, et al. (1999), « **Life cycle assessment of road construction** », *Finnish National Road Administration: 59*.
- [23] Jullien, A., A. Ventura, et al. (2004), « **Life Cycle Inventory of Reclaimed Asphalt Pavement** ». *Eurasphalt & Eurobitume Congress 2004, Vienna (Austria): 13*.

- [24] Meil, J. (2006), « **A life cycle perspective on concrete and asphalt roadways: embodied primary energy and global warming potential** », *Athena Institute*: 68, Ottawa (Canada).
- [25] 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.
- [26] Zapata, P. et J. Gambatese (2005), « **Energy Consumption of Asphalt and Reinforced Concrete Pavement Materials and Construction** », *Journal of Infrastructure Systems*.
- [27] 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.
- [28] Horvath, A. et C. Hendrickson (1998), « **Comparison of Environmental Implications of Asphalt and Steel-Reinforced Concrete Pavements** », *Transportation Research Record N°1626*: 9.
- [29] 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.
- [30] Blomberg, T., N. Boussad, et al. (1999), « **Partial life cycle inventory or "Eco-profile" for paving grade bitumen** », *Eurobitume. Report 99/007*: 14.
- [31] Nikkonen, J. (1996), « **The life-cycle assessment of bitumen** », *Eurasphalt & Eurobitume Congress 1996, Strasbourg (France)*: 11.
- [32] Stripple, H. (2000), « **Life Cycle Inventory of Asphalt Pavements** », *Swedish Environmental Research Institute (IVL)*: 84, Gothenburg (Sweden).
- [33] Bilal, J. et M. Chappat (2003), « **Développement durable: La route écologique du futur, analyse du cycle de vie** », *Colas*: 40, Paris (France).
- [34] Anderson, J., C. Weiland, et al. (2011), « **Greenroads Manual v1.5** », *University of Washington*: 488.
- [35] De Visscher J., Anastasio S. et al. (2015), « **Energy efficient materials and technologies and their impact on sustainability** », *EDGAR Project. CEDR Call 2013*.
- [36] M. Wayman, J. De Visscher et al. (2015), « **Recommended Product Category Rules for bituminous materials and technologies** », *EDGAR Project. CEDR Call 2013*.
- [37] Bueche N., De Visscher J. et al. (2015), « **Demonstration of the methodology to assess sustainability** », *EDGAR Project. CEDR Call 2013*.
- [38] Muench, S. T. (2010), « **Roadway Construction Sustainability Impacts: A Review of Life Cycle Assessments** », *Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D.C.*: 18.
- [39] 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.
- [40] Bueche, N. et A.-G. Dumont (2009), « **IRF Greenhouse Gas Calculator - Analysis and validation** », *EPFL-LAVOC*: 40, Lausanne (Suisse).
- [41] 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*.
- [42] Bilal, J., V. Grosshenny, et al. (2008), « **Caractéristiques environnementales des matériaux routiers** », *Revue générale des routes et aérodromes N°865*: 8.
- [43] Angst C., Grolairma F., Liechti J., Gaschen A. et al. (2016), « **PLANET RS-2: Energetische und ökologische Bilanz der Aufbereitung von Niedertemperaturasphalten** », *Rapport VSS*.
- [44] 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.
- [45] Frischknecht, R., N. Jungbluth, et al. (2004), « **The ecoinvent Database: Overview and Methodological Framework** », *The International Journal of Life Cycle Assessment*: 7.
- [46] Frischknecht, R. et G. Rebitzer (2005), « **The ecoinvent database system: a comprehensive web-based LCA database** », *Journal of Cleaner Production* 13: 7.
- [47] 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)*.
- [48] 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.
- [49] Benzakour M. R. (2012), « **Inventaire du cycle de vie et analyse multicritère d'enrobés bitumineux contenant du fraïset de recyclage** », *Master EPFL-LAVOC*.
- [50] Boustead, I. (2005), « **Eco-profiles of the European Plastics Industry - Crude Oil** », *PlasticsEurope*: 19.
- [51] 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.

-
- [52] EAPA (2007), « **Environmental Guidelines on Best Available Techniques (BAT) for the Production of Asphalt Paving Mixes** », *European Asphalt Pavement Association (EAPA)*: 55, Brussels (Belgium).
-
- [53] Maystre, L. Y., J. Pictet, et al. (1994), « **Méthodes multicritères ELECTRE** », *Presses Polytechniques et Universitaires Romandes*, Lausanne (Switzerland).
-
- [54] 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)*.
-
- [55] Bouyssou, D., D. Dubois, et al. (2006), « **Concepts et méthodes pour l'aide à la décision 1: Outils de modélisation** ».
-
- [56] Mena, S. B. (2004), « **Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision** », *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment (BASE)* 4: 10.
-
- [57] Schärli, A. (1985), « **Décider sur plusieurs critères** », *Presses Polytechniques Romandes*.
-
- [58] Bouyssou, D., D. Dubois, et al. (2006), « **Concepts et méthodes pour l'aide à la décision 3: Analyse multicritère** », *Hermès - Lavoisier*.
-
- [59] Tille, M. (2000), « **Choix de variantes d'infrastructure routières: méthodes multicritères** », *Génie civil. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*: 388, Lausanne.
-
- [60] 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.
-
- [61] Sayagh, S. (2007), « **Approche multicritère de l'utilisation de matériaux alternatifs dans les chaussées** », *Structures et Matériaux, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*.
-
- [62] 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.
-
- [63] 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.
-
- [64] Roy, B. (1991), « **The outranking approach and the foundations of Electre methods** », *Theory and Decision* 31: 24.
-
- [65] 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.
-
- [66] 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.
-
- [67] 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.
-
- [68] Simos, J. (1989), « **L'évaluation environnementale: Un processus cognitif négocié** », *Génie rural, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*: 340, Lausanne.
-
- [69] Simos, J. (1990), « **Evaluer l'impact sur l'environnement - Une approche originale pour l'analyse multicritère et la négociation** », *Presses Polytechniques et Universitaires Romandes*.
-
- [70] Janez, F. et A. Appriou (1996), « **Théorie de l'Evidence et cadres de discernement non exhaustifs** », *Traitement du signal* 13(N°3): 14.
-
- [71] Klein, L. et A. Lawrence (2004), « **Sensor and Data Fusion: A Tool for Information Assessment and Decision Making** », *S. P. Monograph*: 319.
-
- [72] 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.
-
- [73] Yang, J.-B. (2001), « **Rule and utility based evidential reasoning approach for multiattribute decision analysis under uncertainties** » *European Journal of Operational Research* 131: 31.
-
- [74] 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.
-
- [75] Wang, Y.-M., J.-B. Yang, et al. (2006), « **Environmental impact assessment using the evidential reasoning approach** », *European Journal of Operational Research* 174: 29.
-
- [76] 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.
-
- [77] Bueche N., Dumont A.-G. et al. (2016), « **PLANET RS-3: Formulation et optimisation des performances** », *Rapport VSS*.
-
- [78] Raess, E. et M. Pittet (2008), « **Réduction de la consommation d'énergie des enrobés bitumineux** », *EPFL-LAVOC*: 45, Lausanne (Suisse).
-

Clôture du projet



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

RECHERCHE DANS LE DOMAINE ROUTIER DU DETEC

Version du 09.10.2013

Formulaire N° 3 : Clôture du projet

établi / modifié le : 23.05.2016

Données de base

Projet N° : VSS 2010/545

Titre du projet : Projet PLANET RS-5: Modèle global d'évaluation

Echéance effective : Mai 2016

Textes :

Résumé des résultats du projet :

La présente recherche « RS-5 : Modèle global d'évaluation » se situe au cœur du projet PLANET. L'objectif est le développement et l'implémentation d'un modèle d'évaluation multicritère permettant de classer différentes technologies d'enrobés bitumineux sur la base de critères qualitatifs et quantitatifs. Ce modèle doit finalement permettre d'identifier la meilleure variante d'enrobé ainsi que quantifier la solidité de la solution proposée pour assister dans le processus décisionnel.

Le résultat principal du projet est le développement et la mise en place de la méthodologie d'évaluation multicritère appelée "modèle PLANET". Le modèle développé est construit selon une architecture en quatre niveaux d'évaluation pour lesquels on pourra relever :

- 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. Ces deux premiers niveaux ne prennent en compte que les critères quantitatifs.
- L'utilisation de méthodes multicritères spécifiques est concrétisée dès le troisième niveau d'analyse dans lequel des critères qualitatifs sont également intégrés. Le troisième niveau intègre également la notion de préférence et de critères flous selon une méthode d'agrégation partielle, ce qui permet notamment de proposer différentes échelles d'appréciation.
- 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.

L'application de cette méthode progressive permet en tout temps à l'utilisateur d'arrêter la procédure, mais également de vérifier la solidité de la solution trouvée, ceci par l'application d'une méthode additionnelle d'évaluation ainsi que par des analyses de sensibilité. Dans cette méthodologie, les émissions, l'énergie et les coûts sont pris en considération sur l'ensemble du cycle de vie, mais également les performances mécaniques de l'enrobé ainsi que des critères qualitatifs tels que la complexité du processus de fabrication et le potentiel de recyclabilité.

La méthodologie développée et implémentée a ensuite été appliquée lors d'un exemple consistant en la comparaison entre un enrobé tiède avec cire, un enrobé tiède avec additif chimique (agent tensio-actif), un enrobé tiède avec moutage du bitume, un enrobé semi-tiède et un mélange de référence à chaud. Les résultats obtenus montrent notamment la bonne performance globale de l'enrobé tiède avec additif chimique. A l'opposé, l'enrobé avec ajout de cire s'avère être fortement pénalisé par la quantité importante d'additif dont l'impact sur le cycle de vie ne peut être totalement compensé par de bonnes performances mécaniques (orniérage notamment). Outre le classement des variantes qui est propre à cet exemple, la mise en application de la méthodologie démontre la pertinence et l'apport d'un tel modèle dans l'aide à la décision pour le choix du type d'enrobé.

Le modèle s'avère finalement être un outil flexible et pertinent qui amène un support important pour l'aide à la décision. L'utilisation de ce modèle est également un important outil de promotion et dissémination des technologies à faibles impacts énergétiques et environnementaux, en fournissant une évaluation globale technique et objective.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Atteinte des objectifs :

L'objectif de la recherche RS-5 est le développement, la mise en place (implémentation) et la validation d'un modèle d'évaluation multicritère permettant de qualifier et classer différentes technologies d'enrobés bitumineux. Cet objectif a été atteint. Le modèle implémenté (MS-Excel, VBA) est par ailleurs gratuitement disponible pour tout utilisateur intéressé.

Déductions et recommandations :

Différentes pistes en vue d'un développement ultérieur du modèle PLANET sont évoquées. On peut par exemple citer la mise en place de procédures d'analyse de robustesse des solutions ainsi qu'une plus grande flexibilité dans le nombre de critères et de variantes étudiées.

La réalisation de ce projet a également mis en évidence différentes recommandations dans le domaine de l'évaluation environnementale des matériaux de chaussée parmi lesquelles:

- La mise à disposition de données de processus secondaires et procédés innovants et la création de bases de données spécifiques au domaine de la construction routière.
- L'établissement de méthodes d'évaluation de la qualité et des incertitudes des données utilisées dans les analyses environnementales.
- L'identification de méthodes de prise en compte et valorisation des matériaux recyclés dans les enrobés bitumineux. Intégration de la problématique relative au multi-recyclage.

Publications :

- Bueche N. Evaluation et choix de technologies à faibles impacts. Formation Technique Bitume Québec. Montréal. Décembre 2015.
- Bueche N. & Dumont A.-G. Decision aid model for asphalt mixture choice. Transport Research Arena 2014. Paris. Avril 2014.
- Bueche N., Beyeler H.-P. & Am T. Schweizerische Erfahrung mit Niedertemperatur-Asphalt: Forschungsprojekt PLANET. Asphalt magazine (Allemagne). Janvier-Février 2013.
- Bueche N. Enrobés tièdes et contexte suisse: projet « PLANET ». Congrès SMI. Berne. Janvier 2013.
- Bueche N. & Dumont A.-G. Road construction with Reduced environmental Impacts: Performances and Innovative Evaluation Method. Greentech World Conference. Bailyun (Chine). Octobre 2012.
- Bueche N. Asphalt mixture choice: A decision-aid model. IRF Bulletin Environment & Climate Change. Mars 2012.
- Bueche N. Analyse des performances et des impacts des enrobés bitumineux tièdes. Magazine Route et Trafic. Février 2012.
- Bueche N. Évaluation des performances et des impacts des enrobés bitumineux tièdes. Thèse EPFL n° 5169. 2011.

Chef/cheffe de projet :

Nom : Dumont

Prénom : André-Gilles

Service, entreprise, institut : EPFL-LAVOC

Signature du chef/de la cheffe de projet :



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

RECHERCHE DANS LE DOMAINE ROUTIER DU DETEC

Formulaire N° 3 : Clôture du projet

Appréciation de la commission de suivi :

Evaluation :

L'objectif de la recherche PLANET RS-5 a été atteint. Le modèle attendu a été développé et implémenté. La méthodologie innovante d'analyse en quatre niveaux successifs permet finalement de proposer un outil pertinent et flexible fournissant un appui substantiel dans le processus de choix d'une technologie d'enrobé bitumineux.

L'exemple d'application relatif à la comparaison de différents enrobés tièdes illustre bien les résultats pouvant être attendus. Au-delà du seul classement des variantes, l'analyse de sensibilité permet d'évaluer dans quelle mesure le choix proposé est robuste.

Mise en oeuvre :

De manière générale, les résultats du paquet de recherche PLANET doivent servir de base pour l'intégration des enrobés tièdes au niveau de la normalisation suisse.

Les différentes considérations relatives à l'évaluation environnementale des chaussées ainsi que le modèle multicritère d'aide à la décision constituent un apport intéressant pour la mise en place d'une procédure standardisée de comparaison de variantes. Ainsi, il pourrait être envisagé d'exploiter les enseignements relatifs au modèle PLANET dans la perspective de création d'un guide ou outil (comparateur) pouvant être utilisé et reconnu par l'ensemble de la profession.

Besoin supplémentaire en matière de recherche :

Les besoins en matière de recherche concernent principalement le développement du modèle global d'évaluation et la création de bases de données spécifiques, indispensables à la réalisation de calculs à large échelle. Des méthodes d'évaluation de la qualité et pertinence des données utilisées sont également nécessaires.

Il est finalement nécessaire de poursuivre les efforts dans le but d'intégrer à la méthodologie les matériaux recyclés et autres techniques environnementales. La problématique du multi-recyclage doit également être davantage étudiée.

Influence sur les normes :

Les résultats de la recherche RS-5, soit le modèle global d'évaluation PLANET, peuvent permettre la mise en place de procédures standards et unanimement reconnues permettant le comparatif de variantes. Cette réflexion doit être intégrée dans les processus normatifs.

Président/Présidente de la commission de suivi :

Nom : Aeschlimann

Prénom : Heinz

Service, entreprise, institut : Aeschlimann Asphalt Engineering AG

Signature du président/ de la présidente de la commission de suivi :

Recherche dans le domaine routier du DETEC : Formulaire 3

Page 3 / 3

Index des rapports de recherche en matière de route

L'index actuel des rapports publiés dernièrement peut être téléchargé sur notre site www.astra.admin.ch (Recherche en matière de routes --> Downloads --> Formulaires).