



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-1: Impacts sur les centrales d'enrobage

**Forschungspaket PLANET : EP-1: Auswirkungen auf die
Mischwerke**

**Research Package PLANET : WP-1: Impacts on asphalt
mixing plants**

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

Ammann Schweiz AG
A. Bieder, Dr. ès sc ETHZ
L. Boesiger, MSc Ing. Méc. ETHZ

**Projet de recherche VSS 2010/541 sur demande de l'Association suisse
des professionnels de la route et des transports (VSS)**

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-1: Impacts sur les centrales d'enrobage

**Forschungspaket PLANET : EP-1: Auswirkungen auf die
Mischwerke**

**Research Package PLANET : WP-1: Impacts on asphalt
mixing plants**

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

Ammann Schweiz AG
A. Bieder, Dr. ès sc ETHZ
L. Boesiger, MSc Ing. Méc. ETHZ

**Projet de recherche VSS 2010/541 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

Membres

N. Bueche, Dr. ès sc. EPF, EPFL-LAVOC

B. Schobinger, ing. civil dipl. EPF, EPFL-LAVOC

A. Bieder, Dr. ès sc ETHZ, Ammann

L. Boesiger, MSc Ing. Méc. ETHZ, Ammann

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	15
2 Centrales d'enrobage et enrobés tièdes.....	19
2.1 Généralités sur les centrales d'enrobage.....	19
2.1.1 Centrales discontinues	20
2.1.2 Centrales continues	21
2.1.3 Matériaux recyclés et additifs.....	22
2.2 Fabrication des enrobés tièdes en centrale d'enrobage	22
2.2.1 Introduction d'eau ou maîtrise de la teneur en eau	23
2.2.2 Introduction d'ajout solide	25
2.2.3 Introduction d'ajout liquide	26
2.3 Considérations énergétiques et émissions au poste d'enrobage	27
2.4 Emissions: Législation et valeurs limites.....	29
3 Enquête de consommation énergétique et émissions.....	31
3.1 Enquête préliminaire de consommation énergétique.....	31
3.2 Enquête PLANET: Objectifs.....	33
3.3 Enquête PLANET: Déroulement et résultats	33
3.3.1 Procédure et questionnaire	33
3.3.2 Analyse des résultats	33
4 Campagne de mesures d'émissions et de consommation d'énergie.....	39
4.1 Mesures préliminaires (faisabilité)	39
4.2 Campagne de mesures: Objectifs.....	40
4.3 Campagne de mesures: Données générales	40
4.3.1 Abréviations et nomenclature.....	40
4.3.2 Choix des centrales.....	41
4.3.3 Composants mesurés	43
4.3.4 Acquisition des données	44
4.4 Campagne de mesures: Centrale A.....	45
4.4.1 Informations générales.....	45
4.4.2 Résultats détaillés	46
4.4.3 Synthèse des résultats et observations	49
4.5 Campagne de mesures: Centrale B.....	52
4.5.1 Informations générales.....	52
4.5.2 Résultats détaillés	52
4.5.3 Synthèse des résultats et observations	54
4.6 Campagne de mesures: Centrale C	57
4.6.1 Informations générales.....	57
4.6.2 Résultats détaillés	58
4.6.3 Synthèse des résultats et observations	60
5 Analyse théorique de la consommation énergétique	63
5.1 Energie de chauffage des composants.....	63
5.2 Energie de chauffage du malaxeur	66

5.3	Analyse paramétrique de consommation énergétique et émissions	68
5.3.1	Etude d'un enrobé à chaud	68
5.3.2	Etude d'enrobés tièdes	70
5.3.3	Rendement théorique d'un poste d'enrobage	72
5.4	Considérations relatives à l'optimisation des centrales	73
6	Analyse coûts-bénéfices	77
6.1	Principe de l'analyse coûts-bénéfice	77
6.1.1	Base de l'analyse coûts-bénéfice	77
6.1.2	Etapes de réalisation de l'analyse coûts-bénéfice	77
6.2	Coûts relatifs à la production d'enrobés tièdes en centrale d'enrobage	79
6.2.1	Coûts des modifications du poste d'enrobage	79
6.2.2	Coûts d'exploitation additionnels	81
6.3	Construction de l'analyse coûts-bénéfice	81
6.3.1	Architecture de l'analyse coûts-bénéfice	81
6.3.2	Calculs économiques: Informations complémentaires	83
6.4	Exemples d'analyses coûts-bénéfices	83
6.4.1	Exemple 1	83
6.4.2	Exemple 2	84
7	Conclusions et recommandations	87
7.1	Conclusions	87
7.2	Recommandations et perspectives de recherche	89
	Annexes	91
	Glossaire	103
	Bibliographie	105
	Clôture du projet	107
	Index des rapports de recherche en matière de route	111

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 de quantifier les aspects inhérents 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-1 : Impacts sur les centrales d'enrobage » a pour objectif de fournir un bilan exhaustif au niveau des postes d'enrobage, ceci en considérant l'économie d'énergie ainsi que la diminution des émissions, mais également la prise en compte des aspects financiers et autres particularités relatives au contexte suisse.

Dans une première phase, une vaste analyse de la littérature relative à la fabrication des enrobés tièdes en centrale d'enrobage ainsi que l'étude de la consommation énergétique et des émissions ont été menées. Les aspects législatifs sont également abordés dans cette phase du projet.

Suite à cela, une enquête avec pour objet la perception des exploitants de postes d'enrobages suisses ainsi que la consommation d'énergie et les émissions a été menée. Cette enquête a notamment démontré la volonté des producteurs à s'engager dans les technologies tièdes, une large majorité des postes étant par ailleurs équipés pour la production de ces enrobés à faibles impacts. L'analyse des données (17 centrales) indique également une consommation énergétique moyenne de 91 kWh/t, avec un écart-type de 17 kWh/t qui traduit l'impact de différents paramètres (type de centrale, source énergétique, conditions météorologiques, recette, ...). Dans la mesure du possible, la source énergétique privilégiée est sans surprise le gaz.

La partie principale de la recherche a ensuite consisté en la réalisation de trois campagnes de mesures sur des postes d'enrobage représentatifs du parc suisse ; permettant ainsi de mieux appréhender et surtout quantifier les enjeux liés à la production des enrobés tièdes. Les résultats mettent en évidence des gains énergétiques de près de 30% lors de la production d'enrobé tiède, ceci comparativement à un enrobé à chaud. Les mesures d'émissions sont quant à elles plus complexes à analyser. Bien souvent, le rendement du brûleur est abaissé afin de diminuer les températures de production, ce qui a pour conséquence un processus de combustion qui ne s'effectue plus de manière optimale et donc une concentration plus élevée pour certains polluants. Il peut donc arriver que le poste d'enrobage effectue des économies d'énergie tout en produisant davantage d'émissions. Nous pouvons encore relever l'impact de l'ajout de RAP, avec une augmentation sensible des émissions (notamment CO, COT, SO₂). D'autres paramètres ayant un impact sur la consommation énergétique et les émissions et pouvant influencer la productivité du poste d'enrobage lors de la production d'enrobés tièdes ont également été mis en évidence.

Une analyse théorique de la consommation énergétique en centrale d'enrobage est finalement proposée avec une analyse de sensibilité de paramètres déterminants permettant ensuite de proposer un modèle global d'analyse coûts-bénéfices. Les différents calculs réalisés indiquent que de manière globale les enrobés tièdes sont légèrement plus coûteux lors de leur production, comparativement à des mélanges à chaud. Ces coûts ne peuvent être immédiatement compensés par les économies en agent énergétique (1.70-1.89 CHF/t). Cependant, considérant l'exonération possible de la taxe CO₂ ainsi que la multiplicité des procédés tièdes, un bilan financier équilibré lors de la production d'enrobés tièdes semble réaliste.

La réalisation de cette recherche a permis de détailler les étapes déterminantes pour la production d'enrobés tièdes dans une centrale suisse ainsi que les pistes en vue d'une optimisation énergétique d'un poste d'enrobage. La production d'enrobés tièdes en centrale d'enrobage est assurément une méthode permettant de contribuer de manière substantielle à la diminution de consommation énergétique ; le potentiel de réduction des émissions étant également élevé. Le choix de produire des enrobés tièdes dans le contexte suisse peut rapidement s'avérer rentable financièrement et les enrobés tièdes représentent une technique du futur dont l'implémentation en Suisse doit être encouragée.

Parmi les recommandations et perspectives futures, on relèvera la nécessité de fournir des guides et méthodes de bonne pratique relatifs à la production des enrobés tièdes, ceci afin de mieux informer l'ensemble des acteurs du domaine. D'autre part, la définition de valeurs limites d'émissions au poste d'enrobage méritent une réflexion approfondie ceci afin que les exigences soient en adéquation avec les développements technologiques actuels.

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-1: Auswirkungen auf die Mischwerke» hat als Ziel, eine umfassende Beurteilung und Bilanz bezüglich Asphaltemischanlagen zu machen. Dies erfolgt hinsichtlich Energieeinsparung, Emissionsreduktion und unter Berücksichtigung von wirtschaftlichen Aspekten und schweizerischer Besonderheiten.

In einer ersten Phase wurden umfangreiche Literaturanalysen im Zusammenhang mit der Herstellung von Niedertemperaturasphalten in Mischgutanlagen sowie eine Studien betr. Energieverbrauch und der Emissionen durchgeführt. Auch Rechtsvorschriften wurden in dieser Phase behandelt.

Im Anschluss daran wurde eine Umfrage unter Schweizer Mischgutbetrieben durchgeführt, insbesondere betreffend Energieverbrauch und Emissionen. Die Umfrage hat eine Bereitschaft der Mischgutproduzenten, sich für die Niedertemperaturtechnik einzusetzen, ergeben; eine grosse Mehrheit der Betriebe ist schon für Produktion dieses Mischguts ausgestattet. Daten aus 17 Anlagen deuten auf einen durchschnittlichen Energieverbrauch von 91 kWh/t hin. Aufgrund der verschiedenen Parameter (Anlagentyp, Energiequelle, Witterungsbedingungen, Rezept,...) resultiert eine Standard Abweichung von 17 kWh/t. Soweit verfügbar, wird wenig überraschend Erdgas als Brennstoff bevorzugt.

Der Hauptteil der Forschung bestand aus Messkampagnen an drei Mischanlagen, die als repräsentativ für die Schweizer Anlagenpopulation angesehen werden können. Die Messungen wurden durchgeführt, um die Herausforderungen bezüglich der Herstellung der Niedertemperaturasphalte besser nachvollziehen und vor allem um sie quantifizieren zu können. Die Resultate zeigen einen Energiegewinn von etwa 30% bei der Fabrikation von Niedertemperaturasphalten im Vergleich zu Heissmischgütern. Die Auswertung und Beurteilung der Emissionen sind komplexer. Sehr oft wird die Brennerleistung gesenkt, um die Herstelltemperatur zu senken. Dies hat zur Folge, dass der Verbrennungsvorgang nicht mehr optimal läuft und die Abgase höhere Mengen von bestimmten Schadstoffen enthalten. Es könnte also der Fall eintreten, dass die Anlage weniger Energie verbraucht, aber mehr Emissionen abgibt. Es wird auch auf die Auswirkung der Verwendung von RA (Recyclingasphalt) hingewiesen, der eine merkliche Erhöhung der Emissionen verursacht (insbesondere CO, TOC, SO₂). Weitere Parameter, die ebenfalls einen Einfluss auf Energieverbrauch, Emissionen und die Produktivität der Anlage haben, wurden im Rahmen dieser Studie ebenfalls untersucht.

Schlussendlich wird eine theoretische Analyse des Energieverbrauchs in Mischanlagen mit einer Sensitivitätsanalyse der entscheidenden Parametern vorgeschlagen. Dies mit dem Ziel, ein globales Modell einer Kosten-Nutzen-Analyse vorzuschlagen. Die verschiedenen Berechnungen deuten auf höhere Herstellungskosten von Niedertemperaturasphalten im Vergleich mit Heissmischgütern hin. Diese Kosten können nicht sofort mit Einsparungen durch den reduzierten Energieverbrauch ausgeglichen werden (1.70-1.89 CHF/t). Jedoch scheint es realistisch, dass bei der einer Vielzahl von existierenden Niedertemperaturverfahren und bei einer Befreiung der CO₂-Gebühren eine ausgeglichene finanzielle Bilanz bei der Herstellung von Niedertemperaturasphalten erreicht werden kann.

Die Durchführung dieser Forschung erlaubte die Detaillierung der entscheidenden Phasen der Herstellung von Niedertemperaturasphalten in Schweizer Anlagen und deren energetische Optimierung. Die Herstellung von Niedertemperaturasphalten kann den Energieverbrauch und die Emissionen erheblich reduzieren. Der Entscheid, Niedertemperaturasphalte in der Schweiz herzustellen, könnte sich schnell auch als finanzieller Gewinn erweisen. Diese Produkte sind eine Zukunftstechnik, deren Implementierung in der Schweiz unterstützt werden sollte.

Unter den Empfehlungen und Entwicklungsperspektiven wird die Notwendigkeit von Leitfäden und Verfahren zur Erreichung einer guten Herstellungsqualität verlangt. Damit sollen alle Akteure in diesem Bereich besser informiert werden. Andererseits sollten die Emissionsgrenzwerte überdacht und besser definiert werden, um zu garantieren, dass die Anforderungen mit den heutigen technologischen Entwicklungen übereinstimmen.

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 ecological 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 objective of the current research "WP-1 : Impacts on asphalt plants" is to provide a comprehensive report at the level of asphalt plants while considering the economy and the energy factors as well as the reduction of the emissions while taking into account the financial aspects and other relative features to the Swiss context.

In the first phase, an extensive literature study on production of warm mix asphalts in asphalt plants as well as the energy consumption and the emissions has been conducted. Legal aspects have also been included in this phase.

Moreover, an investigation with the purpose of perception of operations in the Swiss asphalt plants as well as the energy consumption and the emissions has been conducted. This analysis in particular has demonstrated the willingness of the producers to engagement in the warm mix technologies. A majority of the plants has already been equipped for production of the low impact mixtures. The analysis of the data (17 plants) indicated an average energy consumption of 71 kWh/t with a standard deviation of 17 kWh/t which demonstrate the impact of different parameters (type of asphalt plant, energy source, weather conditions, recipe, etc.). Wherever possible, the preferred energy source is with no doubt gas.

The main part of the research is the three measurement campaigns on asphalt plant representatives of the Swiss park, which allows a better understanding regarding the quantification of the particular issues related to the production of warm mixtures. The results highlight energy savings of approximately 30% in the production of warm mix asphalts as compared to hot mixtures. The analysis of the emissions is one of the most complex to conduct. Generally in the asphalt plant, the efficiency of the burner is lowered in order to reduce the temperature of the production. This results in a combustion process which does not function in an optimal way and therefore can lead to a higher concentration of certain emissions. It may therefore happen that the asphalt plant produces more emissions while saving energy. We need to mention the impact of adding RAP which increases significantly the emissions (including CO, COT, SO₂). Other parameters that have impact on energy consumption and emissions and can influence the efficiency of the asphalt plant during the production of warm mix asphalt have also been highlighted in this research.

A theoretical analysis of the energy consumption in the asphalt plant is proposed with a sensitivity analysis of the determined parameters which allows proposing a global model of cost benefit analysis. The different calculations performed indicated that in general the warm mix asphalts are more costly in the production as compared with the hot mixtures. These costs cannot be immediately compensated by the savings in the energy sources (1.70-1.89 CHF/t). However, considering a possible exemption from the CO₂ tax as well as the multiplicity of warm processes, a balanced comprehensive report during producing warm mixtures seems realistic.

The outcomes from this research has allowed to analyze in detail the stages of the production of warm mixtures in a Swiss central as well as the possible ways of energy optimization in an asphalt plant. The production of warm mix asphalt in the asphalt plant is certainly a method which allows a contribution to reduction of energy consumption in a sustainable manner, with high potentials of reduction in the emissions. The choice to produce warm mix asphalt in the Swiss context can be financially profitable while the

warm mixtures represent a future technique of implementation which has to be encouraged to be used in Switzerland.

Between the recommendations and the future perspectives, we can highlight the necessity to provide the guides and methods of best practice regarding the production of the warm mix asphalts in order to better inform the group of actors in the domain. Moreover, the definition of the emission limits in the asphalt plant deserves a future reflection in order to make the requirements consistent with the actual developing technologies.

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 [34]. 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. Concernant la RS-1 relative aux centrales d'enrobage, des liens spécifiques ont été établis avec la recherche relative au bilan énergétique et écologique qui concerne principalement les aspects relatifs à l'analyse du cycle de vie, ainsi que la recherche RS-5 relative au développement du modèle global d'évaluation.

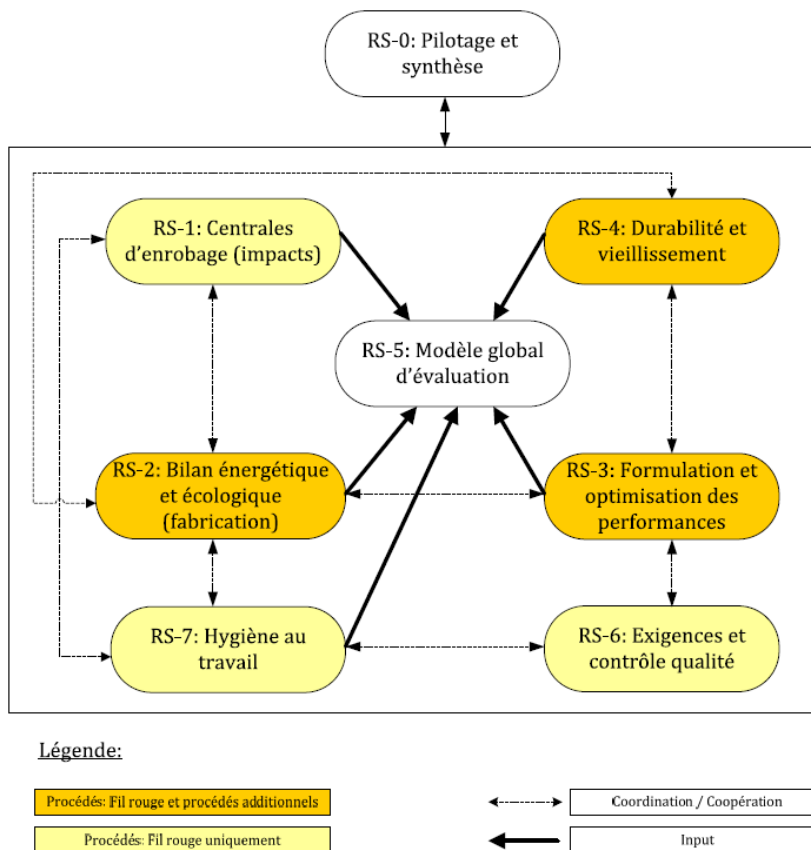


Fig. 1 Organigramme paquet de recherche PLANET [34]

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 [34].
- 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

Sur l'ensemble du cycle de vie d'un enrobé, la production au poste d'enrobage est une des étapes les plus gourmandes en énergie et à laquelle une partie importante des émissions peut être imputée. Ainsi, l'impact de la production d'enrobés tièdes sur le poste d'enrobage doit être soigneusement étudié.

L'objectif global de la recherche PLANET RS-1 consiste à évaluer l'impact de la production d'enrobés tièdes sur les centrales d'enrobage. Il est en particulier attendu la prise en compte des aspects suivants:

- Etude de la consommation énergétique et des émissions.
- Mise en évidence des modifications nécessaires au poste d'enrobage.
- Prise en compte du contexte et de l'expérience suisse dans le domaine (type de postes, cadences de production, taille du marché, ...).
- Proposer aux acteurs du domaine de la construction routière des bases scientifiques et techniques fiables pour la fabrication et la bonne pratique relative aux enrobés à faibles impacts énergétiques et écologiques en Suisse.

Une vue générale du projet de recherche RS-1 est proposée dans la figure 2; les différentes étapes de travail étant détaillées dans la suite du chapitre.

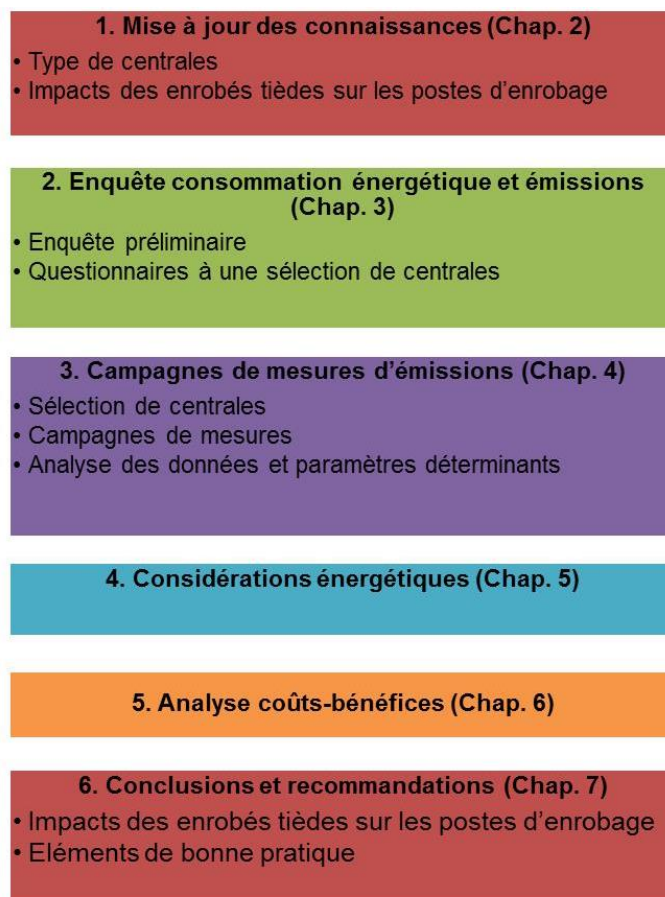


Fig. 2 Schéma général recherche RS-1

Mise à jour des connaissances

Cette première étape de travail a pour objectif de fournir les bases relatives aux centrales d'enrobage et à leurs principes généraux. Des considérations relatives à la

consommation énergétique au poste d'enrobage et aux émissions ainsi que des informations issues de la réglementation sont également attendues.

Enquête consommation énergétique et émissions

Une enquête relative à la perception des enrobés tièdes dans le contexte suisse est attendue. Pour cela, une sélection de centrales sera contactée et données relatives à la production, consommation énergétiques, mesures d'émissions et positionnement par rapport aux enrobés tièdes seront récoltées. Ces résultats permettront notamment d'identifier le positionnement des producteurs d'enrobés vis-à-vis des technologies à faibles impacts énergétiques et écologiques, ainsi que positionner les postes d'enrobage suisses comparativement aux données issues de la littérature entre autre.

Campagnes de mesures d'émissions

L'organisation de campagnes de mesures d'émissions constitue de cœur de la recherche. Ces campagnes doivent permettre de mettre en évidence de manière concrète l'impact de la production d'enrobé tiède sur la consommation énergétique et les émissions au poste d'enrobage. Pour cela, des centrales partenaires, représentatives du contexte suisse, seront approchées. Les mesures étant réalisées dans le cadre de productions "courantes" des centrales d'enrobage, le choix des enrobés tièdes/chauds produit est indépendant des partenaires du projet. Nous pouvons relever ici que des informations complémentaires relatives aux émissions mesurées en poste d'enrobage pourront être obtenues dans le rapport RS-2 du présent projet de recherche [46] dans lequel les mesures réalisées lors de la construction des planches d'essais sont discutées.

Considérations énergétiques

L'objectif de ce chapitre consiste à déterminer de manière théorique la consommation énergétique lors de la production d'enrobés bitumineux. Les résultats des calculs doivent dans un premier temps permettre de mettre en évidence l'impact de la production d'enrobés tièdes, mais également fournir des éléments relatifs à l'optimisation énergétique des postes d'enrobage au-travers de différentes analyses de sensibilité. La mise en place d'un modèle théorique de calcul de consommation énergétique au poste d'enrobage doit aussi permettre d'évaluer l'ampleur des pertes par une comparaison avec l'énergie effectivement fournie au poste d'enrobage lors de la production d'une tonne d'enrobé bitumineux.

Analyse coûts-bénéfices

Le choix de l'équipement (ou non) d'une centrale d'enrobage avec des technologies tièdes repose bien souvent sur un calcul économique de la rentabilité de la solution proposée. Ainsi, quelques pistes en vue d'une réalisation d'analyse coûts-bénéfices (ACB) sont attendues dans cette partie de la recherche

Conclusions et recommandations

Les conclusions et recommandations attendues doivent concerner d'une part l'implémentation des enrobés tièdes dans une centrale d'enrobage suisse, mais également des pistes de réflexion afin d'optimiser le processus de fabrication des enrobés dans son ensemble. Ces différents éléments permettront de fournir les bases dans le but de la création d'une base de bonne pratique pour la mise en place des enrobés tièdes.

1.3 Les enrobés tièdes

Nous proposons ici un très bref descriptif relatif aux enrobés tièdes. On pourra suggérer de consulter les références [10, 34] 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.

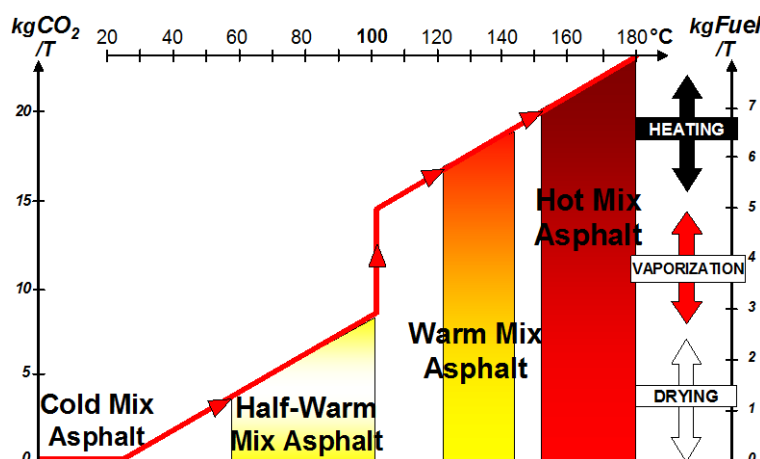


Fig. 3 Classification des différents types d'enrobés tièdes (Source: LEA-CO, Eiffage T. P.)

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 [10, 34] :

- 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 [10] ainsi que dans [34].

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 Centrales d'enrobage et enrobés tièdes

Nous proposons dans ce chapitre une mise à jour des connaissances sur la base de la littérature, en traitant les aspects suivants:

- Généralités sur les centrales d'enrobage: Processus de fabrication en fonction du type de centrale.
- Particularités relatives à la production des enrobés tièdes en centrale d'enrobage: modification de poste, coûts.
- Consommation énergétique et émissions au poste d'enrobage.
- Aspects législatifs relatifs aux émissions.

2.1 Généralités sur les centrales d'enrobage

Les enrobés bitumineux sont fabriqués dans des centrales (ou postes d'enrobage) pouvant être fixes ou mobiles. Selon les données 2014 de l'EAPA (European Asphalt Pavement Association), la Suisse possède 142 centrales dont 3.5% sont des centrales mobiles. Relevons encore que selon cette même source 80 postes (56%) sont équipés pour l'ajout de fraisat d'enrobé à chaud et à froid. Dans la suite de ce document, nous nous concentrerons sur les centrales fixes, les postes mobiles représentant des cas marginaux dans le contexte suisse.

Nous pouvons distinguer deux grandes familles de postes d'enrobage soit les centrales continues et les centrales discontinues. Les centrales discontinues (appelées également 'batch plant') sont très présentes en Suisse car le marché est composé de nombreux clients qui commandent un tonnage relativement faible. De plus, le nombre de recettes fournies par ces centrales est élevé (largement plus de 100 recettes pour certaines centrales).



Fig. 4 Exemple de centrales continues et discontinues (Source: Ammann)

Le principe de base de la fabrication des enrobés consiste à produire un matériau uniforme et homogène constitué d'un squelette granulaire enrobé et rigidifié par une matrice en bitume. La clé du processus de fabrication réside dans le choix de la matrice : le bitume. En effet, cet hydrocarbure à l'avantage d'être "liquide" à haute température (150 - 180°C) et "solide" à température ambiante. Le processus de fabrication des enrobés réside donc dans le fait de mélanger et malaxer du bitume liquide avec la partie minérale. Cette partie minérale est également chauffée et séchée afin d'éviter un choc thermique avec le bitume ou un moussage incontrôlé du bitume avec l'humidité présente dans la partie minérale. Le processus de fabrication des enrobés est décrit plus précisément dans les chapitres suivants, ceci en distinguant les deux familles de postes d'enrobage. Ces considérations ne se veulent pas exhaustives mais ont pour but de fournir les informations de base nécessaires à la compréhension de la suite du document.

2.1.1 Centrales discontinues

Comme indiqué précédemment, les centrales discontinues constituent la grande majorité des postes d'enrobage suisses et dans le monde. Ces centrales permettent notamment de garantir une bonne qualité ainsi qu'une flexibilité maximale dans la production (changement rapide des recettes). La discontinuité est liée au fait que les enrobés sont produits par gâchées toutes les 40 à 50 secondes environ.

Un schéma général de centrale discontinue est présenté dans la figure 5. Les principaux éléments constitutifs d'une centrale de ce type sont les suivants [4, 13, 24]:

- Le pré-doseur dont le rôle est de stocker une quantité limitée de granulats selon leur fraction granulométrique. Il permet également de régler la quantité de granulats qui sera ensuite acheminée vers le tambour sécheur.
- Le tambour sécheur qui permet de sécher et monter en température les granulats. Il est composé d'un tube en acier rotatif complété par un brûleur d'un côté et d'une aspiration pour les gaz et poussières de l'autre.
- Le dépoussiéreur qui permet de récupérer le filler contenu dans les gaz sortant du tambour sécheur. Le filler ainsi récupéré est réintroduit dans le système au niveau du malaxeur.
- L'unité de crible et de stockage qui permet le triage exacte des granulats en fonction de leur classe granulométrique et le stockage des dits matériaux à chaud (resp. tiède). C'est au bas de l'unité de stockage que sont pesés les granulats qui sont ensuite introduits dans le malaxeur.
- Le malaxeur qui assure la fabrication et l'homogénéité des enrobés en malaxant les granulats, le filler et le bitume. Le malaxage se fait en gâchées quelques tonnes (dépend du type de centrale).
- Le parc à liant qui comprend les cuves de bitumes et le système d'acheminement de celui-ci jusqu'au malaxeur.
- Les trémies de stockage qui permettent le stockage et l'isolation thermique des gâchées d'enrobés avant leurs chargement sur les camions.
- La cabine de pilotage qui assure le bon fonctionnement de l'ensemble des installations.

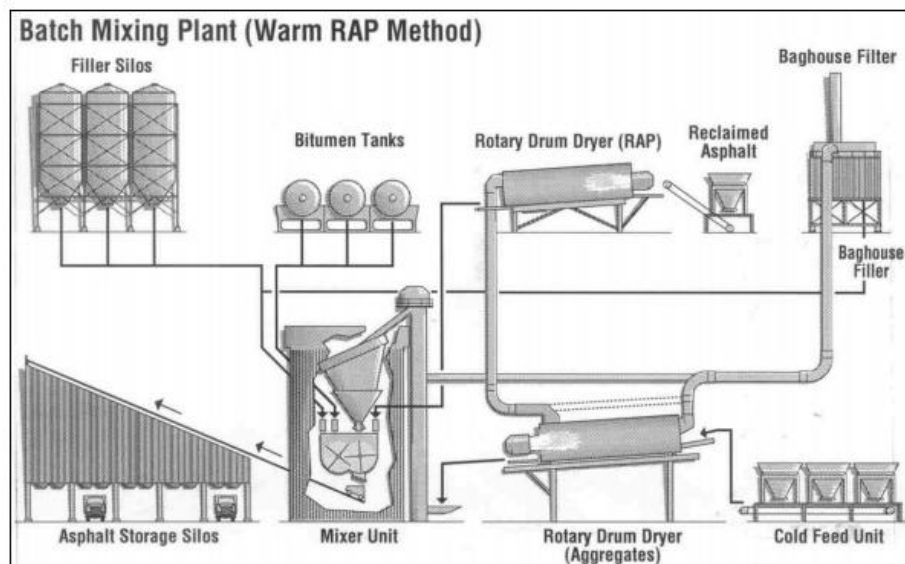


Fig. 5 Processus de fabrication d'un enrobé en centrale discontinue [13]

Le processus de fabrication d'un enrobé type dans les centrales discontinues, se fait de la façon suivante: La première étape consiste à pré-doser la partie minérale de l'enrobé puis à la sécher pour enfin augmenter sa température jusqu'à environ 150°C - 180°C (parfois davantage). Ce chauffage, séchage se fait dans un tambour rotatif équipé d'un brûleur fonctionnant avec diverses formes d'énergie selon leur conception (fioul, gaz naturel, GPL). A la sortie du tambour, la partie minérale est criblée puis stockée à chaud. Parallèlement à la mise en température du sable et des granulats, se trouve le système

de stockage et d'injection du bitume. Comme le bitume est très visqueux à température ambiante il doit être stocké à chaud dans des cuves spécialement équipées. Lors de la préparation de l'enrobé, la partie minérale, le filler (partie minérale très fine) et le liant ainsi que d'autre ajout éventuels (RAP, dopes, fibres,...) sont introduits dans le malaxeur. Une fois tous les composants de l'enrobé réunis, ils sont alors malaxés en gâchées qui seront ensuite stockées à chaud avant d'être chargées sur un camion et transportées sur chantier.

2.1.2 Centrales continues

Le principe des centrales continues consiste à fonctionner sans interruption du cycle de production; le rythme de production n'étant pas divisé en gâchées comme pour le cas des centrales discontinues. Une illustration de centrale continue est proposée dans la figure 6; les principaux éléments constitutifs étant les suivants [4, 13, 24]:

- Le pré-doseur.
- Le tambour sécheur enrobeur (TSE) qui permet de sécher et monter en température les granulats dans un premier temps et avec l'incorporation du bitume et du filler permet ensuite de malaxer le tout afin de constituer l'enrobé final.
- Le dépoussiéreur.
- Le parc à liant.
- Les trémies de stockage.
- La cabine de pilotage.

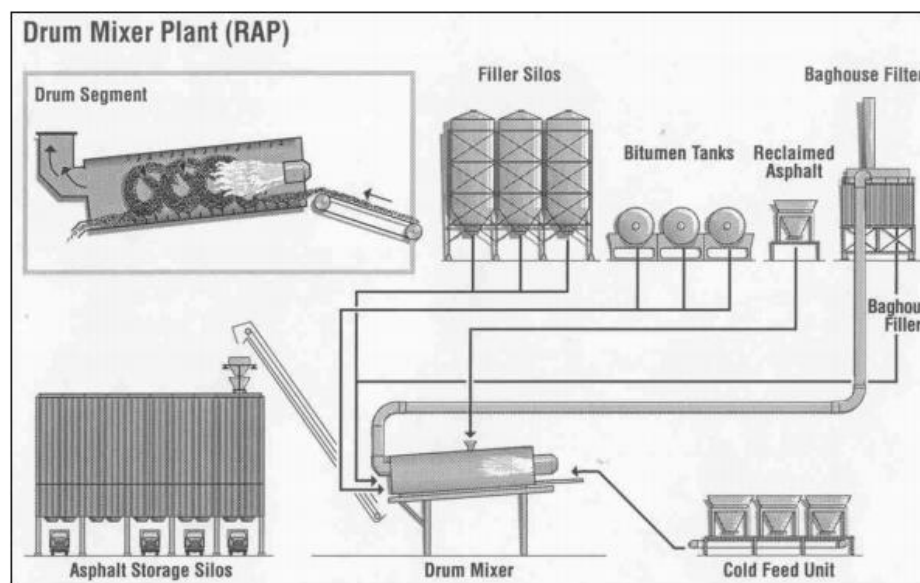


Fig. 6 Processus de fabrication d'un enrobé dans une centrale continue [13]

Le processus de fabrication d'un enrobé dans les postes continus est le suivant: La première étape consiste à doser la partie minérale (sable et granulats) afin de garantir l'exactitude de la recette. Une fois l'ensemble de la partie minérale constituée, elle est alors séchée et mise en température à environ 150 - 180°C dans un tambour sécheur enrobeur (TSE). Le TSE consiste donc à sécher et mélanger le matériau en même temps puisque le filler, le bitume ainsi que les autres additifs éventuels seront injectés dans la seconde partie du TSE. Ainsi, à la sortie du tambour sécheur enrobeur, l'enrobé est malaxé et prêt à être stocké pour être transporté et déchargé sur les camions. Dans un certain nombre de centrales continues il est possible que le malaxage ne se fasse pas dans le tambour sécheur enrobeur mais dans un malaxeur séparé installé directement à la suite de ce premier tambour.

En raison de l'absence de tour de mélange ou élévateur comparativement à une centrale discontinue, ce type de poste d'enrobage est donc simplifié. Notons encore que la durée de malaxage doit rester constante dans le cas de centrales continues, cette durée

pouvant être adaptée au type de produit dans un poste discontinu. Ce type de centrale semblera particulièrement adapté lorsque une production continue est requise et des coûts d'exploitation réduits, ceci tout en garantissant une qualité constante des granulats (pas de crible).

2.1.3 Matériaux recyclés et additifs

Indépendamment du type de poste (continu, discontinu), du fraisat d'enrobé (RAP) peut être incorporé de deux façons soit à froid ou à chaud. L'ajout du RAP lors de la production d'enrobé bitumineux est effectuée soit juste avant l'injection du bitume dans le cas de centrales continues (dans le TSE) ou alors directement dans le malaxeur dans le cas de centrales discontinues.

Pour ce qui est de l'incorporation du RAP à froid, le principe consiste à cribler la matière et la transporter au niveau de l'unité d'incorporation dans le mélange. Le pourcentage de RAP qu'il est possible d'incorporer selon cette technique est sensiblement plus faible lors d'un ajout à chaud de fraisat d'enrobé. Pour l'incorporation du RAP à chaud, il est nécessaire d'effectuer un réchauffage du fraisat dans un tambour parallèle spécialement dédié aux granulats recyclés, ceci avant d'être incorporés au mélange. Cette technique a été développée afin d'ajouter une proportion plus importante de fraisat d'enrobé, des taux pouvant atteindre 70% étant relativement fréquents.

Etant donné leur proportion faible comparativement au reste des composants (en général, quelques pourcents de la masse de bitume), les additifs divers (dope, fluxant, cire, fibres, ...) sont généralement ajoutés au niveau de la zone de malaxage. Ils ne sont pratiquement jamais mis en température. Seuls les additifs liquides peuvent être incorporés d'une autre manière soit directement dans la ligne de bitume au niveau de la zone du malaxeur. Notons encore que selon les additifs, il est également possible d'acheter des liants directement modifiés, simplifiant encore davantage la procédure au poste d'enrobage.

2.2 Fabrication des enrobés tièdes en centrale d'enrobage

Comme détaillé en introduction ainsi que dans le rapport relatif au projet initial PLANET [34], l'abaissement de 20 à 60°C de la température de fabrication des enrobés au poste d'enrobage nécessite quelques adaptations ou modification du processus de fabrication, ceci afin de conserver une viscosité suffisante permettant un malaxage optimal des composants. Pour permettre cela, il existe différentes méthodes (voir chapitre 1.3), les principales étant les suivantes:

- Introduction d'eau ou maîtrise de la teneur en eau afin d'effectuer un moussage du bitume.
- Introduction d'additifs solides (zéolite, cire, pellets, ...).
- Introduction d'additifs liquides (additif chimique).

L'ensemble des détails relatifs à ces différentes technologies pourront être trouvées dans la littérature spécialisée dont [7, 9, 10, 12, 17, 21, 23, 25] que l'on pourra recommander.

Nous proposons dans un premier temps un tableau de synthèse indiquant pour une série (non-exhaustive) de procédés les modifications en centrales d'enrobage et une estimation des coûts associés. Ces données sont reprises du projet initial [34]

Procédé	Compagnie	Principe	Coûts	Modifications centrale
3E-LT®	Colas-Sacer (France)	Modif. Séquence, additif avec liant de base	Equivalent à celui des enrobés traditionnels	Mineures voire nulles
3E-DM®	Colas (France)	Dope	Equivalent à celui des enrobés traditionnels	Système stockage et dosage mousse bitume – ligne bitume
3E-DB®	Colas (France)	-	Equivalent à celui des enrobés traditionnels	Système stockage – ligne bitume
Advera®	PQ Corporation (USA)	Zéolithe, dope selon le type d'agrégats	zéolithe : env. 1.35 US\$ /kg Coûts modifications centrale : 5'000 – 40'000 US\$	Mineures (idem Aspha-min)
Aspha-min®	Eurovia (Allemagne)	Zéolithe	0.60\$/lb d'Aspha-min, Coûts modifications centrale : 5'000 – 40'000 US\$	Mineures pour discontinues – Légères pour centrales continues
Double Barrel Green®	Astec Industrie Inc. (USA)	Moussage bitume	114'760 US\$ (prix du système 2008)	Embouts Double Barrel à installer sur système d'injection du bitume existant
Sasobit®	Sasol Wax (Af. Sud)	Cire Fischer-Tropsch	5.20 CHF/kg de pastilles // 2'000 €/tonne	Mineures (rampe) voire nulle (Sasobit ajoutée au liant)
Asphaltan B®	Romonta (Allemagne)	Cire	n.a.	Mineures voire nulles
Licomont BS 100®	Clariant (Suisse)	Cire	2.50 €/kg	Mineures voire nulles
Végécol®	Colas (France)	Liant modifié	Env. 4-5 fois plus cher que liant traditionnel	Mineures voire nulles
Compogreen®	Screg (France)	Liant modifié	n.a.	Mineures voire nulles
Evotherm ET®	MeadWestva-co Asphalt Innovations (USA)	Additif chimique	7-10% plus cher que liant traditionnel, coûts modif centrale 1'000 – 5'000 US\$	Mineures (Cuve/camion pour Evotherm ET/point d'injection) voire nulles
Revix®	Mathy techn. & Inc and Paragon technical services (USA)	Additif chimique	n.a.	Mineures voire nulles
Ecoflex®	SCREG (France)	Additif avec liant de base	n.a.	Mineures voire nulles
Ecolastic®	SCREG (France)	Liant modifié	n.a.	Mineures voire nulles
Rediset WMX®	AKZO Nobel (Pays-Bas)	Additif (solide)	n.a.	Mineures voire nulles
Cecabase RT®	Ceca (groupe Arkema) (France)	Additif chimique	n.a.	Mineures voire nulles
Mexphalte RM®	Shell (Pays-Bas)	Liant modifié	n.a.	Mineures voire nulles
Classe-S®	Shell (Pays-Bas)	Liant modifié	Enrobé final 10 à 30% moins cher	Mineures voire nulles
WAM-Foam®	Shell, KoLo Veidekke (Norvège) BP (Etats-Unis)	Moussage bitume	Modification centrale : 60'000 – 85'000 US\$	ligne pour bitume dur, système pour mousse, air comprimé,...
EBE (LEA)®	Fairco Eiffage T.P. (LEA-Co) (France)	Maîtrise teneur eau	Enrobé : Comparable aux enrobés à chaud - Modifications centrale : 75'000 – 100'000 US\$	Montage rampes, pompe volumétrique, contrôle humidité
LT Asphalt®	Nynas (Pays-Bas)	Moussage bitume	n.a.	Modifications processus séchage, enrobage, ligne injection bitume
LEAB®	BAM (Pays-Bas)	Moussage bitume	n.a.	Système moussage, centrale disc. uniquement

Fig. 7 Procédés tièdes et impacts sur la centrale d'enrobage (tiré de [34])

Dans la suite du chapitre, nous proposons quelques considérations spécifiques relatives aux modifications nécessaires et aux coûts au poste d'enrobage pour la fabrication des principales familles d'enrobés tièdes. Nous pouvons également rappeler que des considérations additionnelles relatives aux coûts seront discutées au chapitre 6 relatif à l'analyse coût-bénéfice.

2.2.1 Introduction d'eau ou maîtrise de la teneur en eau

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

Le principe global de l'introduction d'eau ou maîtrise de la teneur en eau pour la production d'enrobés tièdes consiste à provoquer un moussage du bitume favorisant ainsi sa maniabilité et abaissant la viscosité dans le domaine des températures de fabrication et de pose. La technologie repose donc le principe que, à pression atmosphérique, un volume donné d'eau va augmenter d'un facteur 1.67 lors de son passage en vapeur. La répartition du bitume et son adhésion sur l'ensemble des granulats est ainsi plus homogène.

La technique la plus fréquente et adaptable à tous les types de postes d'enrobages, consiste à effectuer un moussage du bitume. Pour cela, une unité de moussage est installée le long de la ligne à bitume, juste avant l'arrivée du bitume dans le malaxeur. Une certaine quantité d'eau est injectée dans le bitume (environ 2-4% en général),

engendrant ainsi un moussage du bitume. Un schéma global d'injection de bitume est proposé dans la figure 8. Nous pouvons relever que la quantité d'eau injectée, la pression d'eau ainsi que la forme des buses pour l'injection d'eau sont autant de paramètres déterminants. De même, le processus d'entretien et nettoyage du système ne doit pas être négligé.

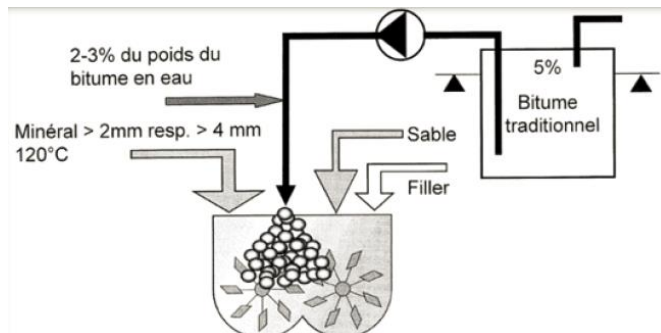


Fig. 8 Schéma unité de moussage du bitume (Source: USIRF)

Afin de garantir un meilleur enrobage et optimiser l'adhésivité liant-granulat, certains procédés utilisent deux bitumes soit un premier bitume "mou" et un second bitume "dur" qui sera moussé. De plus, selon les techniques de moussage, il peut être recommandé d'ajouter des additifs comme les dopes d'adhésivité. Ces ajouts s'incorporent, là également, au niveau de la zone de malaxage au moyen de doseurs volumétrique, de pompes ou de manière manuelle.

Les coûts d'investissement liés à cette technologie sont de l'ordre de 30'000 US\$ à 70'000 US\$ pour une unité de moussage standard (WAM-Foam®) et peuvent s'élever jusqu'à près de 120'000 US\$ pour le cas du Double Barrel Green®. Rappelons ici qu'un comparatif des technologies sur la seule base des coûts ne serait pas recommandé, chaque technique possédant ses propres caractéristiques. Pour certaines technologies, il existe de plus certaines royalties à payer en sus, les montant pouvant être de 0.3 US\$/t ou 5'000 US\$/année.

De nombreux producteurs proposent des unités de moussage du bitume. Nous pourrions par exemple mentionner de manière non exhaustive le système WAM-Foam® initialement développé par Shell, Ammann Foam® (Ammann), Double Barrel Green® (Astec Industrie Inc.), Aqua-Black® (Maxam), Ultrafoam GX® (Gencor) ou encore Meeker Warm Mix Foam® (Meeker).



Fig. 9 Unité de moussage du bitume Double Barrel Green (Source: NCAT, Auburn)



Fig. 10 Unité de moussage du bitume Ammann [33]

La maîtrise de la teneur en eau est un procédé dont l'objectif final est identique à celui de l'injection d'eau discutée précédemment, le concept de base étant d'utiliser l'eau contenue dans les fractions fines afin d'effectuer le moussage du liant. Outre l'utilisation de l'humidité "naturelle" et donc l'économie d'énergie relative au séchage des granulats, cette technique permet notamment de s'affranchir d'un système spécifique d'injection d'eau. Ce principe est appliqué par les enrobés LEA® où une partie du sable (environ 25-30%) est maintenue humide (environ 6%) et froide et injectée directement dans le malaxeur. Les modifications principales pour cette technique concernent une ligne d'incorporation séparée pour le sable (tapis roulant) avec un système de contrôle de l'humidité (sonde hygrométrique) de celui-ci et si nécessaire injection d'eau (débitmètre et système d'arrosage). Des appareils de mesure de la température sont également requis. Le cas échéant, il est également nécessaire de modifier la séquence d'enrobage et donc adapter le système de commande de la centrale (figure 11). Dans [34], les auteurs indiquent des coûts de modification de la centrale de 75'000 à 100'000 US\$ (état 2009).

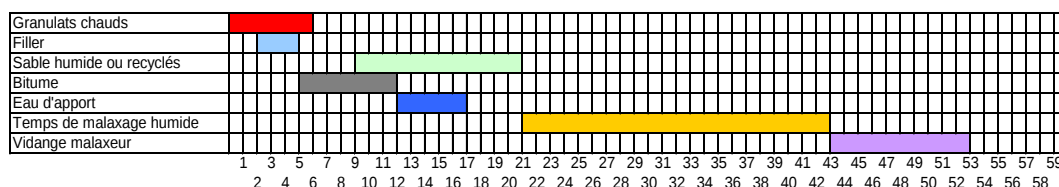


Fig. 11 Exemple de séquence d'enrobage pour enrobé avec maîtrise de la teneur en eau [10]

Nous pouvons encore relever que les techniques à base de zéolithe ont également pour objectif de réaliser un moussage du bitume, le mode de fabrication en poste d'enrobage étant cependant davantage lié à celui avec ajout d'additif solide.

2.2.2 Introduction d'ajout solide

L'introduction d'ajout solide comme la zéolithe, la cire ou des pellets peut être réalisée sur tous les types de centrales. Pour cela, des lignes spécifiques peuvent être utilisées, ou alors des sacs thermo fusibles pouvant être jetés directement dans le malaxeur. Les modifications à la centrale peuvent être nulles (pour des productions ponctuelles par exemple) ou alors il s'agira principalement de l'organisation d'un silo de stockage et système de pesage/transport acheminant le produit au niveau de la zone de malaxage. Selon les additifs (cire par exemple), il est également possible d'utiliser une ligne de bitume existante en utilisant un bitume déjà additivé mais cela "monopolise" la ligne en question.

Les coûts d'investissements pour ce genre de technique varient entre 0 et 40'000 US\$, ceci selon les installations. De plus, le coût relatif à l'additif doit être pris en compte par le producteur. Ces coûts étaient estimés à 1.35 US\$/kg pour la zéolithe et 5.20 CHF/kg de cire Fischer –Tropsch (état 2008). Relevons que la tendance générale est à la diminution

des coûts des additifs pour enrobés tièdes (augmentation de l'offre); les prix varient également sensiblement d'un pays à l'autre.



Fig. 12 Sacs thermo fusibles (Source: Bitume Québec, Canada)

Comparativement aux unités de moussage du bitume, l'utilisation d'additifs solides (ou liquides) permet de sensiblement diminuer les modifications nécessaires au poste d'enrobage. De plus, le choix de l'additif peut être varié par le producteur d'enrobé au gré de ses expériences. Corollaire de cela, les additifs ont un certain coût à la tonne sensiblement plus élevé que celui de l'eau utilisée dans un processus de moussage du bitume. Le choix final doit donc être effectué sur la base d'une balance globale qui sera introduite au chapitre 6.

2.2.3 Introduction d'ajout liquide

Les conséquences de l'incorporation d'ajout liquides sont globalement comparables à celles de l'ajout d'additifs solides. En règle générale, l'ajout se fait directement dans le malaxeur par un circuit spécifique dédié à l'additif. Le système d'incorporation d'ajout liquide est donc composé de réservoirs, pompes et doseur volumétrique (module de dosage) comme illustré dans la figure 13. Cette opération peut également faire manuellement dans le cadre de productions exceptionnelles, mais cela sera généralement pas recommandé notamment pour des questions de sécurité et maîtrise de la production (séquence d'enrobage). Comme précédemment, il est également possible d'utiliser une ligne de bitume existante avec le recours à un liant déjà modifié.

Les coûts d'investissements pour ce genre de technique varient entre 0 et 100'000 US\$ suivant les installations mises. Par exemple, [22] rapporte des coûts de modifications inférieurs à 5'000 US\$ avec la technologie Evotherm®. Finalement, le coût relatif aux additifs devra également être pris en considération.

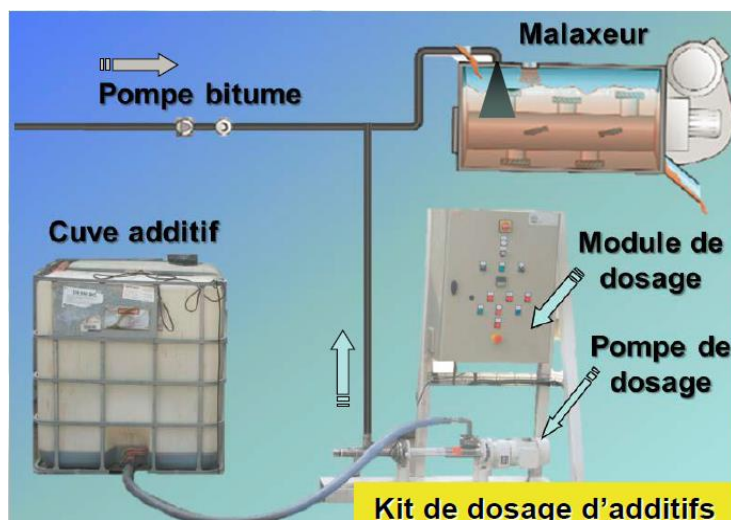


Fig. 13 Schéma kit de dosage en additifs (Source: USIRF, France)

2.3 Considérations énergétiques et émissions au poste d'enrobage

Nous proposons ici une synthèse de quelques considérations énergétiques et environnementales issues de la littérature. Ces éléments seront ensuite mis en perspective avec les valeurs effectives mesurées sur les centrales d'enrobage du parc suisse qui feront l'objet de la suite du rapport.

De nombreuses données relatives à la consommation énergétique en centrale d'enrobage peuvent être trouvées dans la littérature. Les informations relatives aux émissions sont quant à elles moins fréquentes ceci notamment en raison de l'investissement nécessaire pour la réalisation des mesures. Quelques exemples de données issues de la littérature sont proposés dans le Tab. 1; données qui seront également utilisées plus loin afin de corréler les résultats de l'enquête relative aux centrales d'enrobage (chapitre 5).

Tab. 1 Consommation énergétique et émissions – Données de la littérature [13]

Auteur, année	Ref	Energie	Enrobé	Energie [MJ/t]	Emissions CO ₂ /t	kg
Stripple, 2000	[24]	Fioul, électricité	Chaud	276.00	19.58	
Stripple, 2001	[23]	Fioul, électricité	Chaud	321.00	22.50	
Ventura, Monéro et al. 2009	[27]	Gaz, électricité	Chaud	189.00	9.02	
Ventura, Monéro et al. 2009	[27]	Gaz, électricité	Tiède	87.60	3.18	
Abdo, Agnesina et al. 2005	[35]	-	Chaud	251.70	-	
Groz, Alvarez et al. 1996	[36]	-	Chaud	260.43	-	
Cholava, 2009	[37]	Gaz, électricité	Chaud	285.85	18.95	
Chappat et Bilal, 2004	[38]	-	Tiède	234.00	20.00	
Gonzalez, Ligier et al. 2009	[39]	Gaz	Tiède	181.04	13.40	
Gonzalez, Ligier et al. 2009	[39]	Gaz	Chaud	227.18	15.60	

Nous pouvons effectuer les commentaires suivants relatifs à la consommation énergétiques:

- La moyenne de consommation énergétique des enrobés à chaud est de 259 MJ/t et l'écart-type de 42 MJ/t soit un coefficient de variation de 16%.
- La variabilité des données de consommation énergétique est relativement élevée, ceci en raison des nombreux facteurs influençant cette consommation. De manière globale, [34] propose des valeurs allant de 276 MJ/t à 389 MJ/t pour un enrobé à chaud alors que l'EAPA [13] propose des valeurs standards situées entre 252 MJ/t et 360 MJ/t. Dans une enquête portant sur plus de 200 centrales du Royaume-Uni [20], rapporte une consommation énergétique plus importante, allant de 252 MJ/t à 540 MJ/t ; la valeur moyenne pondérée étant de 403 MJ/t. Ceci illustre la grande variabilité de la consommation énergétique des centrales d'enrobage. Ceci sera également observé plus loin dans l'analyse des mesures relatives aux postes d'enrobage suisses.
- Les données disponibles pour les enrobés tièdes sont moins nombreuses. La consommation moyenne d'énergie selon les données du Tab. 1 est de 168 MJ/t, cette valeur devant être prise avec précaution étant donné le faible nombre de données et la variabilité préalablement discutée qui dépendra notamment du type de centrale, son dimensionnement, des conditions atmosphériques et de la production étudiée.
- Pour les enrobés avec moussage du bitume, nous pouvons relever que [16] rapporte une diminution de la consommation énergétique de 30 à 40% pour un enrobé WAM-Foam® dont la température de production est abaissée entre 43 °C et 63 °C comparativement à la variante à chaud. Un résultat comparable est obtenu par [31]. Toujours dans le cadre de la production d'un enrobé WAM-Foam® [18] indique une diminution de consommation énergétique de 25 à 30% alors que [15] rapporte une baisse de 18% comparativement à un enrobé de référence à chaud. Avec la technologie de moussage du bitume Double Barrel Green® et un enrobé produit à

environ 100°C, L'étude [14] indique une baisse de la consommation d'énergie de 24% ce qui représente une économie financière de 0.76\$/tonne d'enrobé produit.

- Dans le cas d'enrobé ave ajout d'additif solide, nous pouvons mentionner que [16, 31] rapportent une diminution de consommation énergétique de 30% avec l'ajout de zéolithe, 20% avec l'adjonction de cire. Dans [5], l'auteur évalue quant à lui la diminution de consommation énergétique à 30%.
- Pour le cas d'ajout d'additifs liquides, nous pouvons relever l'expérience de [16] qui indique une diminution de la température de production située entre 50 et 75 °C, la consommation énergétique baissant également de 50 à 75%. Ce gain énergétique semble cependant relativement élevé. Les gains annoncés par [11] sont quant à eux de 16.5% alors que l'étude [19], basée sur deux expériences *in situ* rapporte une diminution de consommation énergétique de 23% et 31%.
- Bien que l'ampleur des économies d'énergie soit variable, il apparaît assurément que la production d'enrobé tiède permet de sauver au moins 20% d'énergie, cette économie pouvant de manière réaliste atteindre 50% selon le type d'enrobé tièdes considéré.

Nous pouvons effectuer les commentaires suivants relatifs aux émissions en centrale d'enrobage:

- Les valeurs individuelles d'émissions du Tab. 1 ne peuvent être directement comparées ceci en raison de conditions d'exploitation sensiblement différentes. Seule une comparaison effectuée sur le même poste d'enrobage pourra permettre une comparaison objective.
- De manière globale, les émissions produites lors de la fabrication d'enrobés tièdes sont de diverses natures [8]: Les gaz à effet de serre (CO₂) proviennent de la combustion incomplète d'agents énergétiques comme le fioul, le gaz naturel,... Les polluants atmosphériques (CO, SO₂, NO_x,...) proviennent de la combustion incomplète ou de résidu présent dans les différents agents énergétiques. Les composés organiques (COT) proviennent principalement de l'échauffement des RAP.
- Dans une étude de cas, [18] propose des résultats de mesures d'émissions lors de la production et de la pose d'un enrobé WAM-Foam® produit à 120-125 °C, comparativement à un enrobé à chaud de référence (180 °C). Les réductions d'émissions mesurées dans la cheminée de la centrale d'enrobage sont de 35% environ pour le CO₂, 8% pour le CO alors que les oxydes d'azotes (NO_x) sont réduits de 60% environ. Des réductions de 25-30% peuvent également être obtenues pour les poussières et émissions de SO₂. Toujours sur la base de cette même technologie, une étude menée par [17] rapporte une baisse des émissions de CO₂ de 31% et une réduction de 62% pour les NO_x. Des résultats avec la technologie du Double Barrel Green® sont proposés par [14] qui indique une baisse de 10% pour le CO₂, le CO et les NO_x. En revanche, les auteurs rapportent une légère augmentation des émissions de SO₂. D'autres études, [15, 29] rapportent des baisses significatives de l'ordre de 20 à 40% dans les niveaux de CO₂ mesurés et entre 50 et 60% de baisse pour les niveaux de COT.
- Des données relatives à l'ajout de zéolithe sont rapportées par [17] qui indique une diminution des émissions de fumée de 75 à 90% suivant la température de production.
- Dans le cas d'additifs liquides, les travaux de [11, 6] effectuées avec des additifs chimiques indiquent une baisse des émissions de CO₂ de 5 à 30% et une baisse drastique des émissions de fumées. L'étude [6] rapporte également une diminution des émissions de polluant atmosphérique comme la poussière (25%), de NO₂ (31%) et de CO (36%); les COT diminuant de 22%. L'étude [19] considère l'utilisation de Cecabase® et elle rapporte une diminution des émissions de COT de 83% par rapport à un enrobé chaud traditionnel.
- D'une manière générale, les différentes études considérées indiquent une diminution des émissions de CO₂ d'environ de 10 à 35%. Une seule étude fait mention d'une augmentation (légère) des émissions d'un polluant (SO₂).

2.4 Emissions: Législation et valeurs limites

Nous proposons finalement quelques considérations concernant les valeurs limites et à la législation relatives aux émissions d'un poste d'enrobage.

La législation en matière d'émissions est généralement propre à chaque pays et à ses engagements internationaux. En Suisse, la politique climatique est largement influencée par la loi sur le CO₂ et par les engagements liés au Protocole de Kyoto.

En Suisse, la loi sur le CO₂ dont la première version date de 1999 [34] concerne uniquement les émissions de CO₂ dues à l'utilisation énergétique des carburants et combustibles fossiles. Selon cette loi (version du 23.12.2011), l'objectif est: *"D'ici à 2020, les émissions de gaz à effet de serre réalisées en Suisse doivent être globalement réduites de 20 % par rapport à 1990"*. Ainsi, la loi sur le CO₂, tout comme le protocole de Kyoto, est un moyen permettant de réduire les émissions de gaz à effet de serre et ainsi respecter les engagements de la Suisse dans le domaine climatique. De nombreux autres outils et mécanismes existent comme par exemple le commerce de quotas d'émissions, la loi sur l'énergie, la redevance poids lourds liée aux prestations (RPLP), etc.

Ces lois font état d'objectifs de réduction globaux à l'échelle de la nation. Les valeurs limites d'émissions pour un processus unitaire donné sont fixées par l'Ordonnance sur la protection de l'air OPair [2]. Pour les installations stationnaires (centrales d'enrobage), cette loi demande des mesures et contrôles des émissions tous les deux ou trois ans selon les cas ainsi que lors de la construction de nouvelles installations. Les mesures sont effectuées selon une procédure stricte fixée par l'Office Fédérale de l'Environnement, des Forêts et du Paysage (ancien nom de l'OFEV). L'intensité des émissions est exprimée sous la forme de concentration (mg/m³), débit massique (g/h) ou facteur d'émissions (kg/t), en fonction des caractéristiques de l'installation et plus particulièrement du débit massique.

Le Tab. 2 donne un exemple de valeurs limites issues de l'Annexe 1 (Limitation préventive générale des émissions) de l'OPair [2] soit les valeurs limites générales d'émissions pour installations stationnaires. Nous pouvons observer que les valeurs limites d'émissions relatives aux centrales d'enrobage ne sont (vraisemblablement) pas concernées par les Annexes 2 (Limitation complémentaire et dérogatoire des émissions pour certaines installations spéciales), 3 (Limitation complémentaire et dérogatoire des émissions pour les installations de combustion) et 4 (Normes relatives aux installations de combustion, aux machines de chantier et à leurs systèmes de filtres à particules ainsi qu'aux engins de travail) de ce texte.

Tab. 2 Valeurs limites d'émissions selon l'OPair [2]

Composé	Limite	Commentaire
Poussières totales	20 mg/m ³	Si débit massique ≥ 200g/h (art. 41)
Oxydes de soufre (SO ₂)	250 mg/m ³	Sous forme de gaz ou de vapeur ; si débit massique ≥ 2500 g/h (art. 61/62)
Oxydes d'azote (NO _x)	250 mg/m ³	Sous forme de gaz ou de vapeur ; si débit massique ≥ 2500 g/h (art. 61/62)
Carbone organique total, plus. classes (COT)	150 mg/m ³	Sous forme de gaz, de vapeur ou de particules ; si débit massique ≥ 3000 g/h (art. 71/72)

Les valeurs limites indicatives indiquées ci-dessus peuvent faire l'objet de réglementations spécifiques notamment par les organismes cantonaux (Services de l'environnement et de l'énergie) ou fédéraux et elles doivent donc être considérées à titre indicatif. Par exemple, sur la base de l'art. 4 de [2] qui dit *"Lorsqu'il s'agit d'émissions pour lesquelles la présente ordonnance ne contient aucune limitation ou pour lesquelles une limitation déterminée n'est pas applicable, l'autorité fixe une limitation préventive dans la mesure où cela est réalisable sur le plan de la technique et de l'exploitation, et*

économiquement supportable.", certaines administrations appliquent alors une valeur limite d'émissions (COT par exemple) spécifique (par ex. 50 mg/Nm³ pour COT).

Dans [24], l'auteur discute également des valeurs limites et de la législation pour les centrales d'enrobage dans différents pays alors que l'EAPA [13] propose une enquête des valeurs limites ou valeurs typiques d'émissions au sein des pays européens. Bien qu'une comparaison entre pays soit complexe, il ressort globalement:

- Pour les poussières, la limite se situe généralement entre 20-50 mg/Nm³ pour un taux d'oxygène de 17% comme référence de base pour les centrales d'enrobage (Nm³ = mètre cube normal, unité de débit permettant de comparer des mesures effectuées dans différentes conditions en les ramenant aux conditions normatives 0 °C et 1 bar).
- SO₂, NO_x : Les valeurs limites se situent généralement entre 350 et 500 mg/Nm³, selon les paramètres et la méthode de mesure utilisée. La législation suisse est donc plus sévère pour ces émissions.
- CO, CO₂ : Les valeurs typiques de CO se situent entre 350 et 1000 mg/Nm³ selon l'agent énergétique, le réglage du/des bruleur(s) et/ou l'utilisation de matériaux recyclés. Il n'y a pas de valeurs limites pour les émissions de CO₂ dans les pays européens ainsi que pour la Suisse. Il en va de même pour le CO selon l'annexe 1 de l'OPair). On pourra cependant trouver certaines directives suisses dans lesquelles une valeur limite de 500 mg/Nm³ est définie.

3 Enquête de consommation énergétique et émissions

3.1 Enquête préliminaire de consommation énergétique

Un large questionnaire a été circulé dans le cadre du projet PLANET. Afin de récolter quelques informations préliminaires, une enquête préliminaire relative à la consommation énergétique des postes d'enrobage suisses a été menée dans le cadre des travaux de thèse de N. Bueche [10]. Nous reprenons ci-après les principaux éléments observés.

De nombreuses publications proposent des données de consommation énergétique, certaines informations ayant été discutées préalablement au chapitre 2.3. Les données issues de la littérature constituent autant de cas particuliers ceci car la consommation énergétique d'une centrale d'enrobage dépend de nombreux facteurs parmi lesquels : température extérieure, humidité de l'air, type et âge de la centrale, calibration et puissance du brûleur, énergie(s) utilisée(s), type d'enrobé produit, cadence de production, isolation de la centrale, période de la journée, taux d'humidité des granulats,...

L'enquête préliminaire a été menée auprès de différentes centrales d'enrobage; les résultats étant synthétisés dans le Tab. 3 et le Tab. 4.

Tab. 3 Résultats enquête préliminaire centrales d'enrobage suisses: Consommation énergétique (partie 1/2)

N°	1	2	3
Type de centrale	Ammann Uniglobe 2000	Hotstock	Disc. 200t/h
Enrobé	Chaud	Chaud	Chaud
Nbre recettes	Env. 40	45	110
Année ref.	2007	2008	2009
Production [t/an]	64'430	50'410	65'162
Durée prod. [mois]	10	10	10
Fioul [kWh/t]	-	-	-
Gaz [kWh/t]	82.9	86.0	81.5
Electricité [kWh/t]	5.5	7.0	5.6
Total [kWh/t]	885	93.0	87.1
Total [MJ/t]	318.6	334.8	313.5

Tab. 4 Résultats enquête préliminaire centrales d'enrobage suisses: Consommation énergétique (partie 2/2)

N°	4	5	6	7
Type de centrale	Hotstock 160 t/h	Disc. 200t/h	Disc.	Disc. 320 t/h
Enrobé	Chaud	Chaud	Chaud	Chaud
Nbre recettes	>100	>100	150	-
Année ref.	2008	2009	2008	2009
Production [t/an]	88'661	93'341	24'860	19'324
Durée prod. [mois]	11	11	10	10
Fioul [kWh/t]	-	-	-	-
Gaz [kWh/t]	100.3	93.2	108.0	92.3
Electricité [kWh/t]	4.04	3.87	9.72	11.05
Total [kWh/t]	104.4	97.0	117.8	103.3
Total [MJ/t]	375.7	349.4	423.9	372.0

Nous pouvons relever les éléments suivants:

- Les centrales sont toutes de type discontinu.
- Une seule donnée concernant des mesures de consommation énergétique avec enrobé tiède est disponible (centrale N°7). Cette donnée concerne un enrobé avec ajout d'eau pour moussage du bitume.
- Pour les enrobés à chaud, la consommation énergétique varie entre 84 kWh/t et 118 kWh/t. La moyenne est de 99 kWh/t (356 MJ/t) et l'écart-type de 11 kWh/t (40 MJ/t). Le coefficient de variation est donc de 11%.
- La majorité des centrales utilisent de l'énergie électrique afin de faire fonctionner les moteurs et parfois également pour le maintien en température des cuves à bitume. Cette énergie représente en moyenne 7% de l'énergie totale, sauf dans le cas de la centrale N°3 où la consommation d'énergie électrique représente 18% du total. Les agents énergétiques principaux sont le gaz et le fioul (fuel); l'utilisation du gaz étant généralement dominante. La figure 14 résume la consommation énergétique des centrales étudiées (*=enrobé tiède).

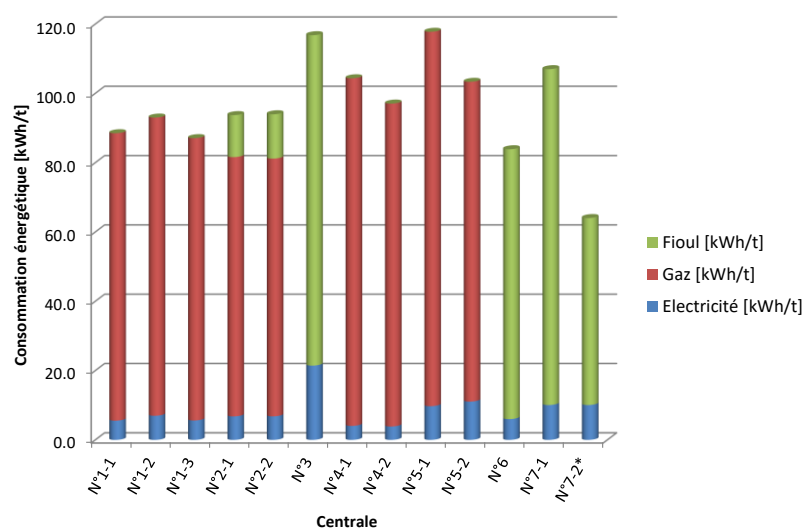


Fig. 14 Synthèse consommation énergétique des centrales selon enquête préliminaire

Quelques données relatives aux émissions des postes d'enrobage ont également été récoltées lors de cette même enquête préliminaire (Tab. 5) Relevons que ce genre de données est difficile à obtenir car relativement peu de mesures sont effectuées. De plus, ces mesures sont souvent réalisées dans le cadre du contrôle de routine des installations (tous les 3 ans selon la législation fédérale) et les propriétaires des centrales ne les communiquent pas toujours très volontiers.

Tab. 5 Résultats enquête préliminaire centrales d'enrobage suisses: Emissions

N°	1	2	6	7
Type de centrale	Uniglobe 200	Hotstock	Discontinue	Discontinue 320 t/h
Enrobé	Chaud	Chaud	Chaud	Chaud
Année ref.	2008	2008	2006	-
NO ₂ [mg/m ³]	97±10	15	58	-
NO ₂ [g/h]	2200±300	468	-	-
SO ₂ [mg/m ³]	5±5	-	-	-
SO ₂ [g/h]	100±100	-	-	-
CO [mg/m ³]	173±17	>1105	339	-
CO [g/h]	3900±500	>34777	-	-
Poussières [mg/m ³]	16±2	2	-	-
Poussières [g/h]	350±60	69	-	-
CO ₂ [%]	5.0±0.5	3.5	5.2	4.3
O ₂ [%]	13.2±0.9	16.2	14.1	-

Nous pouvons observer:

- De manière générale, une campagne de mesures en adéquation avec la législation requiert la réalisation de trois mesures de 30 mn minimum au cours desquelles la centrale doit produire à pleine capacité. Les valeurs mesurées sont ensuite moyennées.
- Le débit volumique et les poussières sont mesurés par échantillonnage alors que les éléments suivants sont mesurés en continu: température, oxygène, dioxyde de carbone, monoxyde de carbone, oxydes d'azote (NO et NO₂), dioxyde de soufre.
- Par convention, les valeurs des concentrations et des volumes sont exprimées à l'état sec, aux conditions normales de température et pression (0 °C et 1013 mbar).
- Les données d'émissions concernent uniquement les enrobés à chaud. La variabilité des mesures sur les différentes centrales est importante, tout particulièrement en ce qui concerne le monoxyde de carbone (CO).

3.2 Enquête PLANET: Objectifs

Sur la base de l'étude préliminaire discuté au chapitre précédent, une large enquête a été menée auprès de producteurs suisses et étrangers d'enrobés bitumineux, ceci avec pour objectif de:

- Caractériser les centrales (modèle, énergie, ...) et leurs caractéristiques de production (matériaux, tonnages, etc).
- Evaluer la consommation énergétique et les émissions des différents postes d'enrobage.
- Evaluer la production d'enrobé tièdes et son évolution au fil des années.
- Etudier le positionnement des producteurs au sujet des enrobés tièdes et de la perspective d'implémentation au sein des centrales d'enrobage.

3.3 Enquête PLANET: Déroulement et résultats

3.3.1 Procédure et questionnaire

Au total, une trentaine de centrales d'enrobages ont été approchées afin de répondre à ce questionnaire; environ 20% des postes d'enrobage étant situés dans des pays voisins à la Suisse.

Les différentes centrales choisies pour cette analyse ont la particularité de produire des enrobés tièdes ou sont en train d'étudier une production potentielle d'enrobés tièdes.

Un exemplaire du questionnaire est fourni en Annexe au présent rapport; le questionnaire était globalement décomposé en cinq parties:

- Partie I – Information sur la centrale
- Partie II – Production et matériaux
- Partie III – Production d'enrobés tièdes
- Partie IV – Consommation d'énergie
- Partie V – Mesures d'émissions

Parmi les questionnaires envoyés, 17 centrales suisses ont répondu (24 centrales contactées), ce qui représente un taux de réponses de 70%. Une seule centrale étrangère a répondu au questionnaire (Allemagne), le taux de réussite étant donc de 10%.

3.3.2 Analyse des résultats

Le degré d'exhaustivité des réponses varie selon les centrales considérées, certains postes ne possédant pas (ou peu) d'informations relatives à leur consommation énergétiques et aux émissions. Par ailleurs, aucune des centrale n'a été en mesure de

fournir des informations spécifiques à la consommation d'énergie durant la production d'enrobés tièdes ceci généralement en raison de l'absence de compteurs séparés.

Une synthèse des principales données fournies par les postes d'enrobage est présentée dans les figures 15 et 16 dans les tableaux 6 et 7, chaque centrale possédant un identifiant unique et anonyme. Différentes informations qualitatives ont également été recueillies, ces éléments étant discutés dans la suite du rapport. Nous pouvons également relever que les données relatives aux émissions seront traitées de manière séparée dans la suite de ce chapitre.

Tab. 6 Enquête PLANET : Données générales relatives aux centrales

Centrales	Type	Année de construction	Nombre de cuves de bitume	Capacité nominale [t/h]	Sources d'énergie du brûleur	Puissance du brûleur [MW]	Nbre recettes HMA / WMA	HMA + RAP chaud	HMA + RAP froid	WMA + RAP chaud	WMA + RAP froid
01	Cont.	1994	6	220	Fioul	-	100 / 2		X		X
02	Cont.	2009	6	320	Fioul	-	100 / 30	X	X	X	X
03	Disc.	1999	4	120	Fioul	9.3	34 / 0				
04	Disc.	1982	4	100	Fioul	9.4	34 / 0				
05	Cont.	2011	8	320	Fioul + GPL	24 et 20	130 / 10	X		X	X
06	Disc.	2006	7	200	Gaz naturel	15.5 et 7.4	100 / 0		X		
07	Disc.	1972	14	300	Gaz naturel	24.5 et 13.9	200 / 2	X			
07	Disc.	1992	14	300	Gaz naturel	20 et 5.5	200 / 2	X			
08	Disc.	-	3	200	Gaz naturel	-	50 / -	X	X		
09	Cont.	-	-	100	Gaz naturel	-	15 / -	X	X		
10	Disc.	2011	6	200	Gaz naturel	15.5	80 / 50	X	X	X	
11	Cont.	2004	7	260	Gaz + Fioul	-	-	X	X	X	
12	Disc.	2003	9	200	Fioul naturel	2.5	160 / 160	X	X	X	X
13	Disc.	2011	5	200	Gaz naturel	16	70 / 2		X		X
14	Disc.	-	4	200	Gaz naturel	-	-				
15	Disc.	-	4	200	Gaz naturel	-	-	X	X		
16	Disc.	2009	6	140	Gaz naturel	-	130 / 120	X	X	X	X
17	Disc.	1983	6	200	Gaz naturel	19	30 / 9	X	X	X	
ALL	Cont.	1998	3	160	-	10	55 / 0		X		

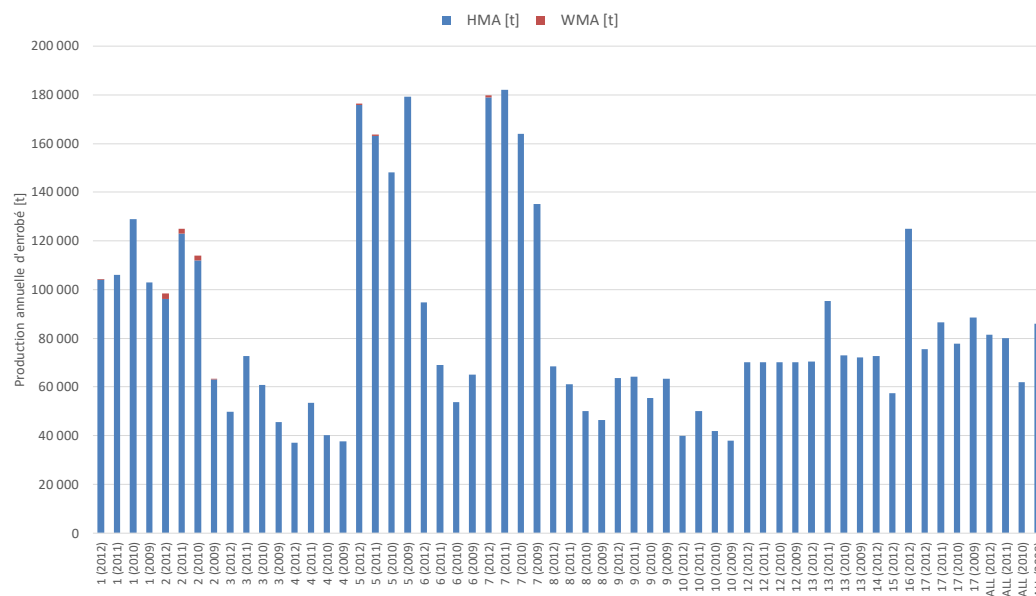


Fig. 15 Enquête PLANET : Données relatives à la production annuelle des centrales

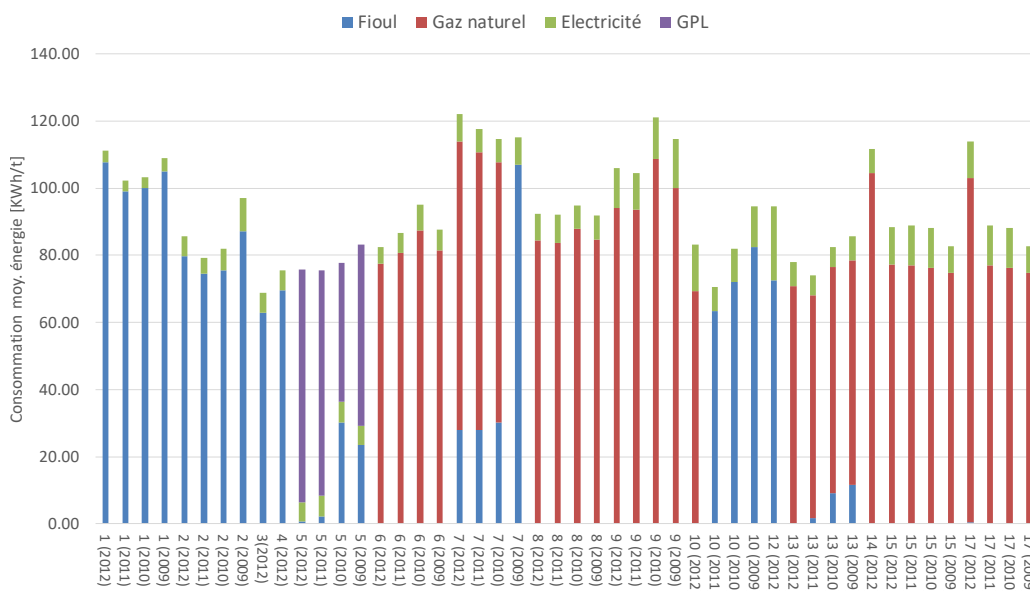


Fig. 16 Enquête PLANET : Données relatives à la consommation énergétique moyenne des centrales

Tab. 7 Enquête PLANET : Répartition de la production selon le type de couche

Centrales	Année	Couche de roulement [%]	Couche de liaison [%]	Couche de base [%]	Couche de fondation [%]	Autre [%]
01	2009	36.8	0.1	55.4	0.2	7.5
	2010	32.0	8.2	45.3	7.2	7.3
	2011	32.1	9.5	51.7	4.4	2.3
	2012	30.4	9.9	54.0	2.1	3.6
02	2009	42.9	13.5	41.0	0.1	2.5
	2010	38.7	15.5	39.7	2.6	3.5
	2011	44.3	3.8	42.1	6.7	3.0
	2012	51.2	1.3	37.9	2.6	7.0
03	2011	40.0	30.	29.9	0.1	-
	2012	44.5	27.8	27.8	0.0	0.0
04	2011	49.6	21.5	21.5	7.3	0.0
	2012	45.5	16.3	16.3	21.8	0.0
05	2009	33.5	6.3	53.8	6.1	0.3
	2010	35.7	3.7	55.9	4.3	0.4
	2011	44.1	2.9	50.2	2.3	0.4
	2012	36.4	2.6	53.4	2.9	4.7
10	2011	30.0	34.0	34.0	2.0	0.0
	2012	30.0	34.0	34.0	2.0	0.0
12	2012	21.0	32.0	13.0	32.0	2.0
13	2012	70.0	2.0	27.0	1.0	0.0
16	2012	20.0	20.0	30.0	30.0	0.0
ALL	2010	0.0	61.0	0.0	39.0	0.0
	2011	0.0	81.0	0.0	19.0	0.0
	2012	0.0	75.0	0.0	25.0	0.0

Divers éléments peuvent être mis en évidence sur la base des données recueillies pour les 17 centrales d'enrobage ci-dessus.

- Une proportion de 30% des centrales qui ont répondu au questionnaire sont des centrales continues.
- Le "taux de production" des centrales d'enrobages, soit la différence entre la production effective et la production théorique maximale, ne dépasse jamais 50% ; la moyenne se situant à 25% environ. En d'autres termes la quantité d'enrobé produite est sensiblement inférieure à la capacité de production de la centrale. Différents facteurs expliquent ce résultat parmi lesquels la multiplicité des recettes qu'une centrale peut (doit) proposer à ses clients, parfois plus de 200. De plus, les tonnages sont souvent relativement faibles et la production par conséquent très largement discontinuée. Ce passage d'une recette à l'autre est un aspect très important des postes d'enrobage, et ceci tout particulièrement dans le cas de productions tièdes. Ainsi, l'unité de production d'une centrale d'enrobage sera dimensionnée afin de pouvoir fournir les matériaux souhaités en heure de pointe, tout en étant conscient que le poste sera surdimensionné pour la majorité de la période d'exploitation.
- De manière générale, la production d'enrobé tiède ne dépasse pas quelque pourcent de la production totale (maximum 4%). Ces enrobés sont en effet un marché relativement "nouveau" en Suisse et les producteurs ne sont pas encore équipés de manière systématique. Il est intéressant de mettre ce taux de 4% d'enrobé tiède en perspective avec les statistiques de l'EAPA qui indiquent pour la Suisse une part

d'enrobé tiède (enrobé dont la température de production est située entre 100 °C et 150 °C selon définition EAPA) de 16% en 2012, 18% en 2013 et 6% en 2014 (Source: Asphalt in Figures, EAPA).

- Pour les centrales produisant des enrobés tièdes, ces enrobés sont généralement destinés à des couches de base ; certains postes indiquant également l'utilisation d'enrobés tièdes pour les couches de roulement (centrales 5, 7, 12, 17)

Sur la base des données fournies par les différents postes d'enrobage, la consommation énergétique peut être calculée (année de référence 2012). Les résultats sont représentés dans la figure 16. Nous pouvons observer:

- La consommation moyenne d'énergie est de 91 kWh/t (329 MJ/t). les valeurs oscillant entre 69 kWh/t (248 MJ/t) et 122 kWh/t (439 MJ/t). L'écart-type de consommation énergétique est de 17 kWh/t (59 MJ/t) soit un coefficient de variation de 18%.
- Les données issues de l'enquête PLANET sont globalement consistantes avec les résultats de l'analyse préliminaire qui avait indiqué une consommation moyenne d'énergie de 99 kWh/t (356 MJ/t) et un écart-type de 40 MJ/t (11%). En comparaison avec les données issues de la littérature (chapitre 2.3), nous pourrions indiquer que [27] reporte des valeurs allant de 76.6 kWh/t à 108.0 kWh/t pour un enrobé à chaud ce qui est globalement comparable alors que [13] indique des valeurs allant de 70.0 kWh/t à 100.0 kWh/t ce qui est du même ordre de grandeur.
- Cette importante variabilité dans la consommation énergétique s'explique notamment par le degré de développement des différents postes d'enrobage. L'impact du type de poste d'enrobage semble davantage déterminant que celui du choix des agents énergétiques.
- L'électricité est bien souvent utilisée afin de maintenir en température les cuves à bitumes, alimenter les convoyeurs à matériaux ainsi que fournir l'alimentation de base aux ordinateurs, locaux du personnel ainsi que démarrage du poste d'enrobage. La consommation d'électricité représente entre 3 et 23% de la consommation totale d'énergie avec une moyenne à 9%. Si l'on compare cette valeur de 9% avec celle issue de l'enquête réalisée dans [10] qui sera discuté au chapitre 3.1, la valeur obtenues ici est supérieure de 2% les deux études aboutissant à des résultats comparables.

Une synthèse des éléments relatifs aux émissions en poste d'enrobage est proposée dans le Tab. 8 pour les centrales ayant fourni des informations. Il était en effet demandé, de manière optionnelle, les éventuels rapports relatifs aux mesures d'émissions.

Tab. 8 Mesures d'émissions des centrales d'enrobage (centrale PLANET)

Centrale	6	7	13	15
Source d'énergie	Gaz naturel	Gaz naturel	Gaz naturel	Gaz naturel
Type d'enrobé	Chaud	Chaud	Chaud	Chaud
O ₂	14.5%	15.5%	39.5 ppm	-
CO	162.5 mg/m ³	456 mg/m ³	49.4 mg/m ³	-
SO _x	-	-	-	-
NO _x	175 mg/m ³	44 mg/m ³	51 mg/m ³	79.9 mg/m ³
COT	-	127 mg/m ³	-	-
Poussière		1.0 mg/m ³	1.0 mg/m ³	16.2 mg/m ³

Le tableau ci-dessus indique des valeurs uniquement pour des centrales alimentées au gaz naturel. Globalement, les émissions de NO_x et de poussière sont dans le respect des valeurs législatives alors que les émissions de monoxyde de carbone présentent une variabilité élevée et bien souvent au-dessus des valeurs fournies dans l'ordonnance OPair. Cela indique que le processus de combustion au poste d'enrobage pourrait très certainement être davantage optimisé (processus de combustion imparfait). La valeur d'émissions de COT fournie est également supérieure aux valeurs de l'OPair. Nous pouvons finalement relever l'absence de données disponibles pour les particules PM-10.

En plus des données relatives aux émissions et à la consommation énergétique des postes d'enrobage, des informations complémentaires ont été demandées afin de mieux appréhender le positionnement des producteurs vis-à-vis des enrobés tièdes et de leur potentiel de développement. Nous résumons ci-après les principaux éléments relevés.

Les principales motivations encourageant les producteurs d'enrobés à se lancer dans les filières enrobés tièdes sont les suivantes:

- Considération écologique: 100% des sondés
- Stratégie de développement: 100% des sondés
- Considération économique: 90% des sondés
- Demande des clients: 40% des sondés
- Objectifs de réduction des émissions de CO2: 10 % des sondés

Les principaux critères de choix ayant poussé les centrales d'enrobages à produire concrètement des enrobés tièdes sont:

- Evaluation des coûts: 47% des sondés
- Potentiel de gains énergétiques: 47% des sondés
- Expériences des partenaires: 35 % des sondés
- Potentiel de réduction des émissions: 31% des sondés

Nous pouvons également relever:

- Le principal motif encourageant la production d'enrobés tièdes est sans surprise d'ordre financier (moins de consommation énergétique, moins d'émission, moins de taxes environnementales).
- Le second motif qui pousse les centrales à produire des enrobés tièdes est l'image positive véhiculée par le développement de technologie respectueuse de l'environnement (stratégie de marketing).
- Le questionnaire met également en évidence que la demande des clients (collectivités publiques en grande majorité) n'est pas un aspect déterminant.
- Les modifications faites au poste d'enrobage varient d'une centrale à l'autre. Cela peut aller d'aucune modification à une nouvelle centrale, ceci en passant par des modifications ponctuelles (mise en place d'une unité de moussage par exemple).
- Selon les différentes personnes interviewées, il ressort également: que les principaux avantages liés à la production d'enrobé tièdes sont dans un premier temps les économies d'énergie et d'émissions, mais également les meilleures conditions de travail liées à cette baisse de la température de fabrication et de pose. La principale difficulté mentionnée concerne la formulation et la difficulté de mise en place des recettes, ceci indépendamment de la technologie de production d'enrobé tiède utilisée.
- Il apparaît finalement que la grande majorité des centrales sondées pense que les enrobés tièdes ont un avenir en Suisse et qu'ils devraient être prochainement normalisés afin d'en favoriser leur utilisation.

4 Campagne de mesures d'émissions et de consommation d'énergie

Nous discutons dans ce chapitre la réalisation de mesures sur postes d'enrobage. Pour cela, une première étude de faisabilité est discutée (chapitre 4.1) avant l'analyse exhaustive des trois campagnes de mesures (chapitre 4.2 à 4.6). Comme il le sera détaillé plus loin, les différentes campagnes de mesures ont été réalisées lors de la production continue des postes d'enrobage (i.e. pas de productions particulières pour le projet). Cela permet de correspondre exactement aux conditions habituelles des postes d'enrobage, notamment dans le passage d'un type d'enrobé à un autre. Corollaire de cela, les produits fabriqués (choix de la technologie tiède) sont indépendants de l'organisme de recherche.

Nous pouvons finalement ajouter que des considérations complémentaires relatives à la consommation d'énergie et aux émissions au poste d'enrobage pourront être trouvées dans le rapport de la RS-2 [46] dans lequel les mesures réalisées durant la fabrication des enrobés des planches d'essais sont discutées.

4.1 Mesures préliminaires (faisabilité)

En préparation au projet PLANET et dans le cadre des travaux de [10], des mesures préliminaires ont été réalisées sur un poste d'enrobage situé dans le canton de Fribourg.

Cet essai de faisabilité a été effectué sur une centrale discontinue utilisant principalement du fioul ainsi que de l'électricité pour les moteurs de la centrale et le maintien en température des cuves à bitume. L'enrobé produit lors des mesures est un enrobé AC T 22S avec bitume 50/70. Deux variantes ont été produites soit un enrobé de référence à chaud et un enrobé tiède dont le bitume a été additivé par du Greenseal®. Le principe de cet additif, qui est également utilisé parfois comme dope d'adhésivité, consiste à agir chimiquement avec les molécules saturées du bitume. La teneur en additif est de 1% par rapport à la masse du bitume et la température de sortie visée pour l'enrobé tiède est de 120 °C.

Les résultats de la consommation énergétique relevée sont consignés dans le Tab. 9. On nous pouvons observer une diminution de 22% de la consommation énergétique (lectures sur compteurs) lors de la fabrication des enrobés tièdes.

Tab. 9 Mesures de consommation énergétique (test de faisabilité)

Paramètre	Enrobé à chaud	Enrobé tiède
Quantité produite [t]	71.64	328.68
Température sortie malaxeur [°C]	160	115
Consommation fioul [l/t]	7.39	5.69
Consommation électricité [kWh/t]	2.48	2.78
Energie totale [MJ/t]	305	238

Des mesures d'émissions ont également été réalisées lors de la production des enrobés; les composants suivants étant mesurés: carbone organique total (COT), CO, NO₂, O₂. La concentration en CO₂ est quant à elle calculée. L'humidité et la température des gaz sont également mesurées. Les mesures d'émissions ont été réalisées à la sortie du filtre, juste avant le passage dans la cheminée de la centrale avec une instrumentation comparable à celle utilisée lors de la campagne de mesures PLANET qui sera décrite dans la suite du chapitre. Nous pouvons relever les éléments suivants suite à cette première expérience:

- La température des gaz en sortie de filtre varie sensiblement selon le procédé, cette température allant de 50-70 °C dans le cas des enrobés tièdes à environ 100 °C lors de la production d'enrobé à chaud. Comme il le sera discuté plus loin, une diminution

de la température des gaz peut avoir pour conséquence un risque accru de condensation et/ou de corrosion. Un autre risque est le blocage du filtre.

- Lors de la production de l'enrobé à chaud, le rendement du brûleur est de 70 à 80%. Pour la production d'enrobé tiède, le rendement du brûleur est diminué à environ 40-45%. Cette diminution du rendement du brûleur a pour conséquence une combustion incomplète et une augmentation des émissions (COT) par rapport à la production d'enrobé à chaud.
- Les mesures étant effectuées à titre exploratoire, elles ne sont pas réalisées selon les protocoles suivis lors des opérations de contrôle d'installation (rendement de brûleur, nombre et durée des périodes de mesures).

4.2 Campagne de mesures: Objectifs

Alors que la première partie de la recherche est axée principalement sur l'analyse de la littérature dans le domaine ainsi que la réalisation d'une large enquête auprès de centrales d'enrobage, le présent chapitre a pour objet la réalisation de campagnes de mesures des émissions.

La campagne de mesure des émissions a pour objectif de proposer un exemple concret de mesures, prenant en considérations le parc de centrales existantes en Suisse. Les mesures sont effectuées lors de production « habituelle » des postes d'enrobage, les données nécessaires étant fournies par les exploitants. Des informations relatives à la consommation énergétique ainsi qu'aux émissions lors de la production d'enrobé tiède (LTA), comparativement à un enrobé traditionnel à chaud (HMA) sont attendues.

Les conditions d'exploitation, de développement (poste d'enrobage) et climatiques étant sensiblement différentes entre les centrales, les présentes mesures ne peuvent pas être utilisées afin d'effectuer un comparatif entre les postes d'enrobage. L'objet des mesures consiste à proposer différents cas pratiques, jugés représentatifs de la production des enrobés en Suisse (type de postes, cadences, recettes, etc.).

4.3 Campagne de mesures: Données générales

4.3.1 Abréviations et nomenclature

En préambule, il est utile de définir une liste de codes et abréviations relatifs au fonctionnement et caractéristiques du poste d'enrobage.

Tab. 10 Codes pour paramètres des centrales

	Anglais	Français	Unité
VA	Virgin Aggregate	Granulats d'apport (vierges)	-
RA	Recycling asphalt	Granulats bitumineux ou fraisat d'enrobé (RAP)	-
FI	Filter	Filtre	-
CH	Chimney	Cheminée	-
BL	Burner Load	Rendement brûleur	%
FR	Feed Rate	Débit matériel (granulats)	t/h
MT	Material Temperature	Température matériau	°C
RGT	Raw Gas Temperature	Température gaz brut	°C
CGT	Clean Gas Temperature	Température gaz épuré	°C

Tab. 11 Abréviations utilisées pour analyse des centrales

	Anglais	Français	Unité
VA BL	Virgin aggregate burner load	Rendement du brûleur du sécheur des granulats vierges	%
VA FR	Virgin aggregate feed rate	Débit de granulats vierges	t/h
VA MT	Virgin aggregate (hot) material temperature	Température des granulats vierges (chauds)	°C
RA BL	Recycling asphalt burner load	Rendement du brûleur du sécheur des granulats recyclés (RAP)	%
RA FR	Recycling asphalt feed rate	Débit de granulats recyclés (RAP)	t/h
RA MT	Recycling asphalt (hot) material temperature	Température des granulats recyclés (chauds)	°C
RA Ratio	RA [t/h] / (VA+RA) [t/h]		%
FI RGT	Filter raw gas temperature	Température gaz bruts du filtre	°C
FI CGT	Filter clean gas temperature	Température gaz épurés du filtre	°C

4.3.2 Choix des centrales

Les mesures ont été effectuées sur trois différents postes d'enrobages que nous appellerons A, B et C dans la suite du document. Les caractéristiques principales des postes d'enrobage sont indiquées dans le Tab. 12.

Tab. 12 Caractéristiques des centrales pour les mesures d'émissions PLANET

	Centrale A	Centrale B	Centrale C
Fabriqueur	Ammann	Ammann	Ammann
Type	Universal S 360	Universal HRT	1 : AMEU 2000 2 : A300 Hot Stock
Recyclage	RAH100, RAC	RAH60, RAC	RAH60, RAC
VA burner (type, puissance)	MIB-603, 24 MW	MIB-603, 24 MW	DIB-2, 18.6 MW
VA burner (énergie)	GPL	Gaz naturel	Gaz naturel
VA dryer	T27110	T27110	T2590
RA burner (type, puissance)	MIB-453, 12 MW	MIB-453, 12 MW	DIB-2, 5.9 MW
RA burner (énergie)	Gaz naturel	Gaz naturel	Gaz naturel
RA dryer	RT2780/150	RT25140	TM1990-R100
Filter	AFA 77	2 x AFA 48	LÜHR MWF 2,5/5,5/2,0 (54'000 m³/h)
Mixer	AMIX 3.6	AMIX 3.6	1 : MA(3) (2.5 t.) 2 : MA(4) (4.0 t.)
Mesures	28.08.2013 09.09.2013	14.10.2014	20.10.2014 21.10.2014

Note : RAH=recyclage à chaud, RAC= recyclage à froid

La centrale A est située à proximité de la ville de Berne, le long de l'autoroute A6. Cette centrale récente (2011) est équipée avec un système de recyclage à chaud (tambour parallèle) et froid ainsi que d'une unité de moussage du bitume (Ammann Foam®). Le brûleur de la centrale utilisé pour les granulats d'apport (vierges ; VA) fonctionne avec gaz de pétrole liquéfié (GPL ou LPG), alors que le brûleur pour RA utilise du gaz naturel comme source d'énergie. Pour ces deux brûleurs, un système au fioul (heating oil) peut également être utilisé en cas de nécessité.

La centrale B se situe dans le canton de Fribourg, dans la région de Payerne. Cette centrale très récente (2014) est à la pointe de la technologie actuelle dans le domaine.

Elle a notamment pour spécificité une chute verticale des granulats recyclés sur toute la hauteur de la tour, diminuant ainsi les risques de colmatage, alors que les granulats d'apport (vierges) tombent selon un plan incliné. La centrale permet d'effectuer du recyclage à chaud et à froid et possède un système de moussage du bitume pour la production d'enrobés tièdes (concept globalement comparable à celui de la technologie WAM-Foam®). Les différents brûleurs de cette centrale fonctionnent au gaz naturel, du fioul pouvant également être utilisé en cas de nécessité.

La centrale C se situe dans le canton de Vaud, à proximité de l'autoroute A1. Cette centrale possède deux tours, dont une est utilisée comme Hot Stock alors que la tour AMEU 2000 date de 1991. La centrale est équipée pour l'ajout de fraisat d'enrobé à chaud ainsi qu'à froid. Les brûleurs de la centrale fonctionnent au gaz naturel, du fioul pouvant également être utilisé en cas de nécessité. La centrale C est équipée d'une unité de moussage (Ammann Foam®) permettant de produire des enrobés tièdes.



Fig. 17 Photo centrale A



Fig. 18 Photo centrale B



Fig. 19 Photo centrale C

4.3.3 Composants mesurés

Les différentes mesures ont été réalisées par Ammann qui possède les équipements nécessaires ainsi que le personnel qualifié.

De manière générale, 4 composants ont été mesurés sur postes d'enrobage:

- Le carbone organique total (COT) inclut l'ensemble des composés carbonés volatiles en une seule masse et il correspond au carbone contenu dans la matière organique.
- Le monoxyde de carbone (CO) est un gaz incolore, inodore et très toxique pour les mammifères. Les émissions de CO proviennent de la combustion incomplète de combustibles carbonés (gaz naturel, hydrocarbures, charbon) et elles sont également accentuées par une alimentation par optimale en air. Les niveaux d'émissions sont donc déterminés par l'efficacité du procédé qui pourra varier selon le type de combustible utilisé.
- Les oxydes d'azote (NO_x) correspondent à l'ensemble des espèces chimiques dans lesquelles l'azote est lié à au moins un atome d'oxygène et dont le nombre d'oxydation est au moins égal à 2. Il s'agit par exemple du NO, NO_2 , N_2O_5 . L'oxyde d'azote (NO_x) est le gaz principal produit lors de la combustion associé à la pollution de l'air. Les quantités d'oxydes d'azote dépendent notamment du volume d'excès d'air, de la température de la flamme et du type de brûleur utilisé.
- Le dioxygène (O_2) est un composant de l'air ambiant qui joue le rôle de comburant dans le cadre de la réaction chimique de combustion, le combustible gazeux étant fréquemment un gaz.

Les éléments finalement mesurés ainsi que les unités associées sont consignés dans le Tab. 13.

Tab. 13 Composants mesurés sur les postes d'enrobage

Composant	Unité	Descriptif
TOC	ppm	Total Organic Carbon / carbone organique total (COT), concentration mesurée
TOC_s50	mgNM ³ (d18)@17%O ₂	Concentration (lissée) de COT dans des conditions standards de gaz sec*, à la référence de 17% O ₂
CO	ppm	Monoxyde de carbone, concentration mesurée
CO_s50	mgNM ³ (d18)@17%O ₂	Concentration (lissée) de CO dans des conditions standards de gaz sec*, à la référence de 17% O ₂
NO _x	ppm	Oxydes d'azote, concentration mesurée
NO _x _s50	mgNM ³ (d18)@17%O ₂	Concentration (lissée) de NO _x dans des conditions standards de gaz sec*, à la référence de 17% O ₂
O ₂ x 10	%O ₂ x 10	Concentration d'oxygène, multipliée par 10

* Les calculs sont effectués en supposant une humidité des gaz de sortie de 18% h.r. (code d18)

Bien qu'ils puissent fournir des informations complémentaires pertinentes, les éléments suivants n'ont pas été mesurés pour des raisons techniques et/ou coûts principalement:

- HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques)
- Particules fines
- SO₂
- NO

D'un point de vue organisationnel, le système de mesure est installé le jour précédent la campagne de mesures. Il est également utile de mentionner que les mesures ne sont pas effectuées de manière strictement conforme à la normalisation [2]. Pour cela, la comparaison des mesures avec les valeurs seuils de la normalisation ne semble pas adaptée ici.

4.3.4 Acquisition des données

L'acquisition des données relatives au fonctionnement de la centrale (données de fonctionnement) a été effectuée par l'intermédiaire du système de contrôle 'as1 existant sur les postes utilisés. Les capteurs (température principalement) existant de la centrale sont donc utilisés, dans installation spécifique. Les données, enregistrées automatiquement, ont ensuite été exportées directement au format MS-Excel.

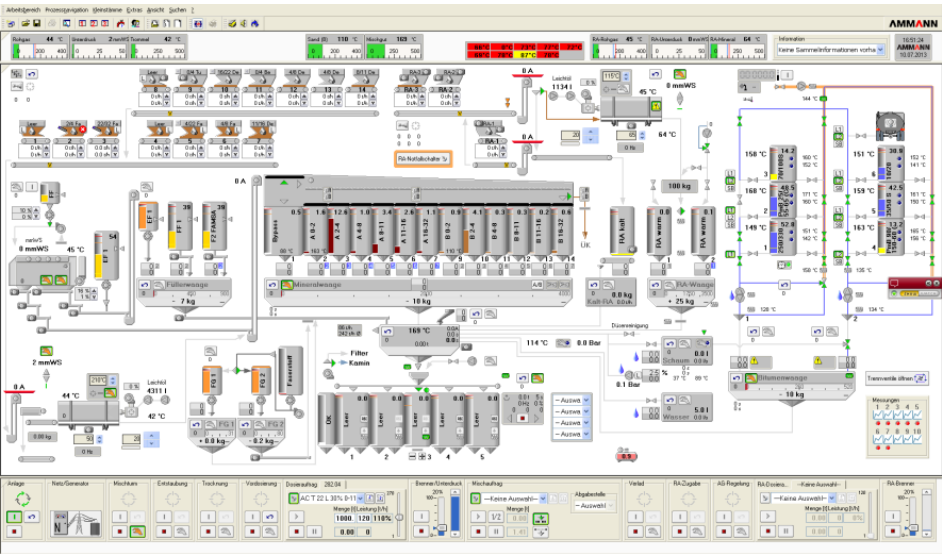


Fig. 20 Système de contrôle 'as1 (Source: Ammann)

Les données relatives aux composants chimiques ont été récoltées à l'aide d'appareils spécifiques devant être installés sur le poste d'enrobage :

- Température gaz, O₂, CO, NO_x : Infrared Multigas Analyzer MRU MGA5
- COT : Flame Ionization Detector SICK FID 3006



Fig. 21 Systèmes de mesure des émissions MRU MGA5 (gauche), SICK FID 3006 (milieu) (Source: Ammann)

La consommation d'énergie des postes d'enrobage est quant à elle obtenue par l'intermédiaires de compteurs existants.

4.4 Campagne de mesures: Centrale A

Pour les différentes campagnes de mesures, nous proposons tout d'abord quelques considérations générales avant de détailler quelques résultats et mesures spécifiques jugés intéressants ou représentatifs. Dans une dernière phase, une synthèse des mesures et observations pour la centrale concernée est proposée.

Dans la mesure du possible, la pose des différents enrobés a également été suivie. Les différences observations ne mettent pas en évidence de différence significative entre les enrobés tièdes et les mélanges à chaud, que ce soit pour l'aspect de l'enrobé bitumineux ou son processus de pose. Des considérations relatives aux performances mécaniques des enrobés posés ne font pas l'objet de la présente recherche, ces éléments étant davantage considérés dans le cadre des RS-3 (formulation), RS-4 (performances à long terme) et RS-6 (planches d'essais, procédure de suivi des enrobés).

4.4.1 Informations générales

Deux journées de productions ont été analysées pour la centrale A, avec lors de chaque journée des productions d'enrobé tiède (LTA) et d'enrobé à chaud (HMA):

- 28.08.2013 : Production de 80 t d'enrobé, gâchée test LTA et HMA.
- 09.09.2013 : Production de 600 t d'enrobé en vue d'un chantier sur l'autoroute A6 (Spiez-Thoune). La production de l'enrobé tiède a été effectuée en différentes phases, entrecoupées de productions d'enrobé à chaud.

Lors des deux journées d'analyse, une petite production d'enrobé a été effectuée avant le début des mesures, avec pour conséquence une centrale chauffée lors du début des mesures.

Les enrobés suivants ont été fabriqués lors de ces campagnes de mesures:

- Enrobé tiède (LTA) : AC MR11, bitume PmB 45/80-65 CH-E (Shell Cariphalte®), avec 1.5% de chaux hydratée.
- L'enrobé tiède a été fabriqué par la technique de moussage du bitume Ammann Foam® qui utilise un seul, avec une injection d'eau de 4% (déterminée de manière

empirique) et une pression pour l'injection de 2.4-2.5 bars (max 6 bars). Relevons encore que les buses d'injection ont été changées le jour précédent la campagne de mesures.

- Enrobé à chaud (HMA) : AC MR11, bitume PmB 45/80-65 CH-E, avec 1.5% de chaux hydratée.

Nous pouvons ajouter que les enrobés ne contiennent pas de granulats d'asphalte et la proportion de granulats 8/11 est de 80% ; la teneur en bitume étant de 2.8%/E. L'enrobé produit (tiède et chaud) possède finalement un aspect comparable et le processus de pose sur chantier est effectué de manière similaire par l'entreprise. Le matériau en sortie de poste est *a priori* satisfaisant.

Afin de maintenir un rendement élevé de la centrale, les exploitants travaillent habituellement avec des granulats vierges à température (élevée) constante, la réduction de température de l'enrobé final étant obtenue par l'ajout à froid de fraisat d'enrobé. La quantité de RAP ajoutée dépend donc de la température finale souhaitée. Dans le cadre des mesures PLANET, le processus a été légèrement modifié étant donné que la couche de roulement produite ne contient pas de RAP. Pour cela, les granulats vierges ont été chauffés à une température réduite, ceci afin de garantir une température de sortie de l'enrobé d'environ 120-130 °C.

Les données complémentaires suivantes relatives à la configuration de la centrale peuvent être relevées :

- Température des cuves à bitume : ~ 180-185 °C
- Température du bitume à l'entrée de l'unité de moussage : ~ 170 °C
- Température du bitume à la sortie de l'unité de moussage : ~ 145 °C
- Température des granulats vierges pour production LTA ~ 135 °C
- Température des granulats pour production HMA ~ 220 °C
- Température de l'enrobé à la sortie du malaxeur : ~ 125 - 130 °C

La centrale est équipée de deux compteurs relatifs à la consommation d'énergie ; le premier pour le brûleur des granulats vierges et le second pour le brûleur des granulats recyclés. Seul le premier compteur est pertinent dans le cadre de ces mesures.

4.4.2 Résultats détaillés

Nous proposons ci-après l'analyse de quelques résultats détaillés jugés représentatifs ou déterminants.

Mesures 28.08.2013

Les mesures ont été réalisées approximativement entre 06h30 et 10h00, la période de 06h38 à 7h19 correspondant à la production des enrobés tièdes (LTA) et la période de 07h43 à 10h00 à la production des enrobés à chaud (HMA).

Les données relatives aux paramètres propres à la centrale (données d'exploitation) sont représentées dans la figure 22. Nous pouvons relever les différences suivantes entre la production d'enrobé tiède et la production d'enrobé à chaud :

- Le rendement du brûleur à granulats vierges (VA BL) est d'environ 30% lors de la production LTA et environ 50% lors de la production de l'enrobé à chaud (HMA).
- La température moyenne des granulats vierges (VA MT) est d'environ 125-130 °C pour la production d'enrobé tiède, cette température étant de 200 °C pour la production d'enrobé à chaud. Ceci est cohérent étant donné les températures respectives de sortie de l'enrobé bitumineux.
- Les données relatives aux matériaux recyclés (RA) ne sont pas utiles ici, la recette étant sans ajout de RAP.

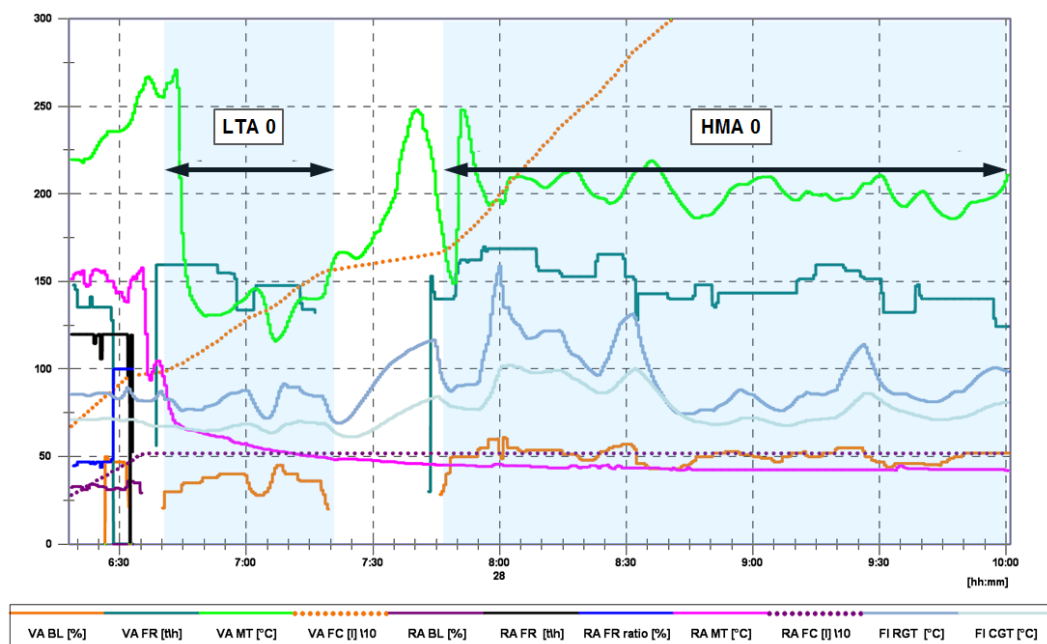


Fig. 22 Centrale A, mesures 28.08.2013 - Données d'exploitation

Le détail des émissions mesurées est disponible dans la figure 23 où nous pouvons remarquer une teneur en oxygène relativement stable de 20%. Une différence sensible entre enrobé tiède et chaud peut être observée pour les COT, la valeur moyenne étant approximativement deux fois plus élevée lors de la production d'enrobé tiède, comparativement à l'enrobé à chaud de référence. Ceci est probablement lié à un processus de combustion non optimal lors de la production des enrobés tièdes, ce qui peut également être observé à l'aide de la courbe d'évolution du monoxyde de carbone CO. Les oxydes d'azote restent quant à eux relativement stables durant la production des différents enrobés, aucune différence significative ne pouvant être mise en évidence.

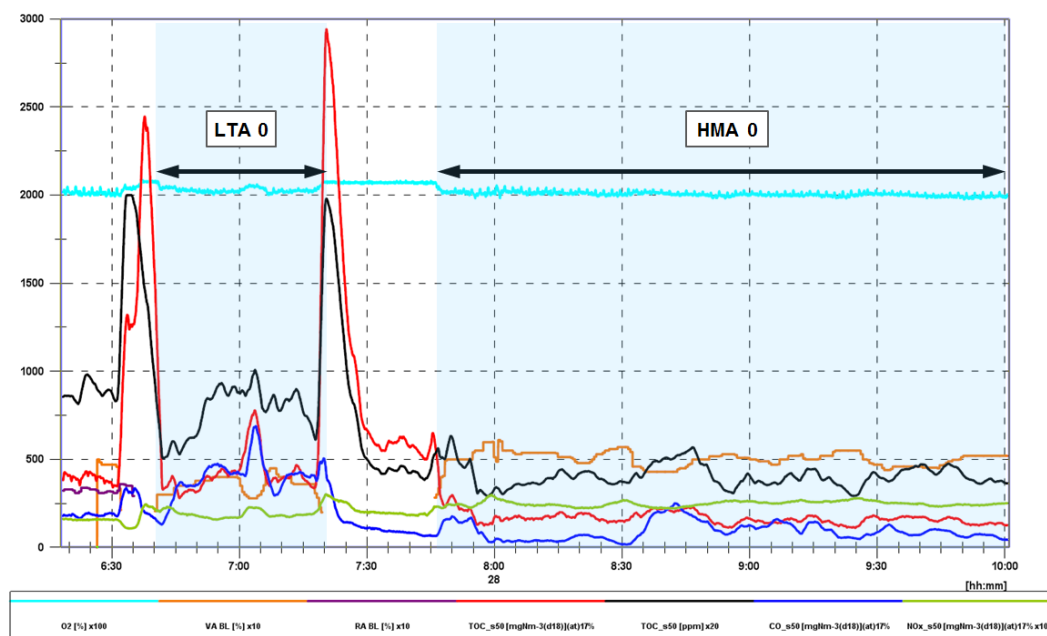


Fig. 23 Centrale A, mesures 28.08.2013 – Emissions mesurées

Mesures 09.09.2013

Le détail des mesures effectuées lors de la seconde journée de production sont présentés dans la figure 24 (données de fonctionnement de la centrale) et la figure 25 (émissions).

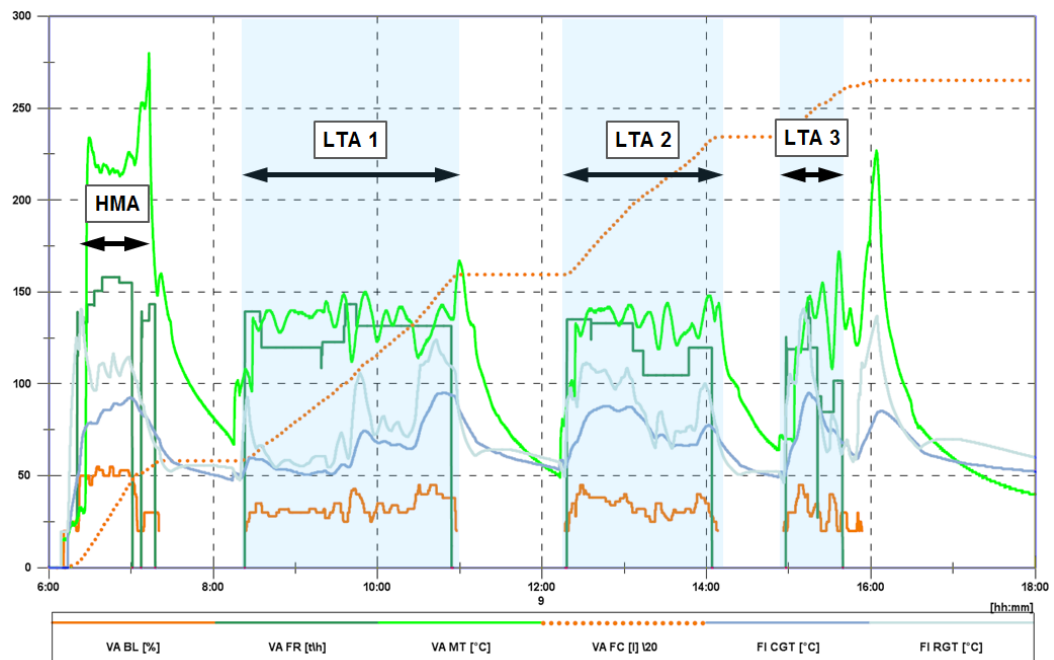


Fig. 24 Centrale A, mesures 09.09.2013 – Données d'exploitation

Les données d'exploitation indiquent, comme lors de la première journée de mesure, un rendement moyen du brûleur à granulats blancs (VA BL) plus élevé pour la production d'enrobé à chaud (environ 50%), comparativement aux enrobés tièdes (environ 30%). La diminution du rendement du brûleur permet de réduire la température de chauffage et ainsi produire des enrobés tièdes. Corollaire de cela, une potentielle combustion incomplète aura pour conséquence une augmentation des émissions dans l'atmosphère. La différence de température de chauffage des granulats entre enrobé à chaud (env. 220 °C) et tiède (env. 130 °C) peut également être relevée, la température pour l'enrobé à chaud étant légèrement supérieure à celle observée lors des premières mesures (28.08.2013). La différence de température des gaz dans le filtre (FI) peut également être observée, cette température étant légèrement moins élevée lors de la production d'enrobé tiède. Une diminution de la température des gaz pourra potentiellement engendrer de la condensation d'humidité dans les gaz suivie par un colmatage des filtres.

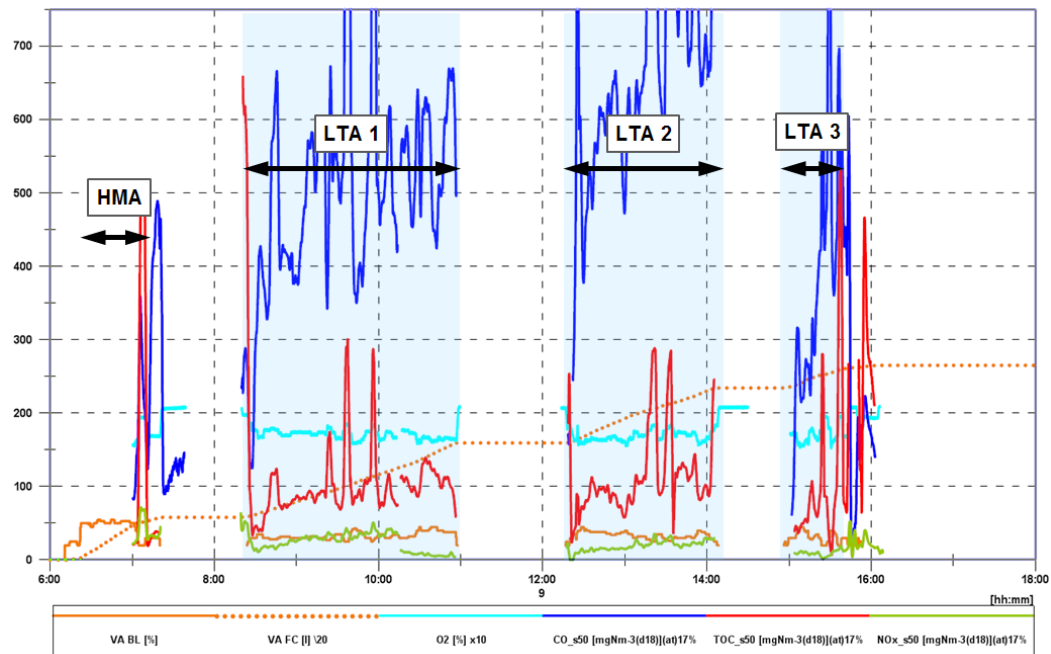


Fig. 25 Centrale A, mesures 09.09.2013 – Emissions mesurées

La mesure des émissions indique une teneur moyenne en oxygène légèrement inférieure que lors de la première mesure (28.08.2013), la teneur en O_2 étant d'environ 18%, ce qui est plus proche des conditions de référence de 17%. Comme précédemment, la teneur en CO est environ 3-4 fois plus élevée lors de la production des enrobés tièdes, comparativement à la référence à chaud, ce qui traduit un processus de combustion qui n'est pas optimal (combustion incomplète). Les données relatives aux TOC sont relativement difficiles à analyser de manière univoque sur la seule base de la figure 25, ceci en raison de l'importante variabilité. Il semble cependant que les COT soient davantage élevée lors des productions tièdes, comparativement à l'enrobé à chaud de référence.

4.4.3 Synthèse des résultats et observations

Une analyse détaillée des mesures brutes présentées ci-dessus est ensuite effectuée, les résultats étant consignés dans le Tab. 14. Nous pouvons ajouter que la recette HMA 0 est considérée comme référence de comparaison pour les deux jours de production (recettes identiques). Quelques mesures sur enrobé à chaud ont également été effectuées le 09.09.14, ces mesures n'étant pas exploitables (recette différente, faible durée de mesure, pas de données d'émissions) elles ne sont pas indiquées dans la suite.

Tab. 14 Synthèse des mesures centrale A (exploitation, émissions, énergie)

	HMA 0	LTA 0	LTA 1	LTA 2	LTA 3
EXPLOITATION					
Date mesures	28.08.14	28.08.14	09.09.14	09.09.14	09.09.14
Période mesures	07:43-10:00	06:38-07:19	08:19-10:57	12:16-14:07	14:58-15:39
Durée mesures	137 min	38 min	151 min	106 min	41 min
Débit moyen granulats	148 t/h	135 t/h	122 t/h	115 t/h	107 t/h
Débit granulats pendant mesures	339 t	85 t	306 t	203 t	73 t
Rdt moyen brûleur	49%	33%	32%	33%	31%
EMISSIONS					
O ₂	20%	20%	17%	17%	17%
CO @ air sec 17% O ₂	94 mg/Nm ³	383 mg/Nm ³	522 mg/Nm ³	748 mg/Nm ³	383 mg/Nm ³
NO _x @ air sec 17% O ₂	25 mg/Nm ³	19 mg/Nm ³	24 mg/Nm ³	20 mg/Nm ³	11 mg/Nm ³
COT @ air sec 17% O ₂	179 mg/Nm ³	531 mg/Nm ³	97 mg/Nm ³	109 mg/Nm ³	69 mg/Nm ³
ENERGIE					
Consommation totale GPL durant test	3'103 l	588 l	2'026 l	1'499 l	495 l
Consommation totale GPL durant test	1'676 kg	317 kg	1'094 kg	809 kg	267 kg
Consommation spécifique GPL	9 l/t	7 l/t	7 l/t	7 l/t	7 l/t
Consommation spécifique GPL	5 kg/t	4 kg/t	4 kg/t	4 kg/t	4 kg/t
Consommation totale d'énergie	64 kWh/t 100%	48 kWh/t 75%	46 kWh/t 72%	51 kWh/t 79%	47 kWh/t 73%

GPL : Gaz de pétrole liquéfié

Données GPL : pouvoir calorifique inférieur=12.87 kWh/kg, densité à 20°C=0.54 kg/l

Les mesures ont été réalisées dans des conditions climatiques et production (t/h) comparables. Nous pouvons rappeler que dans le cas d'une production d'enrobé tiède avec moussage du bitume (et sans ajout de RAP), la durée nécessaire par gâchée est légèrement supérieure à celle d'un enrobé à chaud classique.

Les données d'exploitation de la centrale indiquent un rendement moyen du brûleur de 49% dans le cas de la production à chaud, ce rendement étant de 32% pour la production d'enrobé tiède. On relèvera les valeurs quasi-similaires de rendement du brûleur, pour les deux journées de mesures. Le même brûleur étant utilisé, il est nécessaire d'abaisser le rendement afin de diminuer la température de sortie des matériaux. Une diminution de plus de 30% du rendement du brûleur n'est pas sans conséquence sur les émissions et la consommation énergétique ; les émissions étant de manière générale plus faibles lorsque le rendement du brûleur est élevé (meilleur processus de combustion).

La teneur en oxygène (O₂) lors des mesures du 28.08.14 était d'environ 20%, ce qui est élevé voir inhabituel. Une explication à cela peut-être le fonctionnement du ventilateur du tambour parallèle (pour RAP) durant la période de mesures, ceci afin de diminuer la température dans le tambour parallèle suite à la production du matin. Lors de la seconde journée de mesure, la teneur en oxygène est plus faible (18% O₂), ce qui indique que le ventilateur du tambour parallèle n'est vraisemblablement pas en fonction cette teneur en oxygène étant plus proche des conditions de références.

Les mesures d'émissions indiquent une nette augmentation des émissions de CO (caractéristique d'un processus de combustion incomplète) lors de la production d'enrobé tièdes. Les émissions de monoxyde de carbone augmentent en effet d'un facteur 4 à 8 (LTA 2). Cela indique un évident potentiel d'optimisation au niveau des brûleurs, dans le cas de fonctionnement à de plus faibles rendements.

Comme observé précédemment, les valeurs de NO_x sont relativement stables pour les différentes mesures, ces valeurs étant comparables à celles obtenues pour la centrale B (voir chapitre 4.5).

Les mesures de COT présentent davantage de variabilité. Si l'on fait abstraction de la mesure LTA 0, les émissions de COT semblent légèrement inférieures lors de la production des enrobés tièdes, comparativement à la production des enrobés à chaud. Cependant, les valeurs de COT pour les deux campagnes de mesures ne peuvent être directement comparées, ceci car le flux d'air n'a pas été mesuré.

Les mesures de consommation énergétique indiquent une diminution moyenne de 25% lors de la production d'enrobé tiède, comparativement à la production à chaud de référence. Ce gain n'est donc pas négligeable puisqu'il représente une diminution de 2 l/t soit 7 l/t au lieu de 9 l/t lors de la production de l'enrobé HMA.

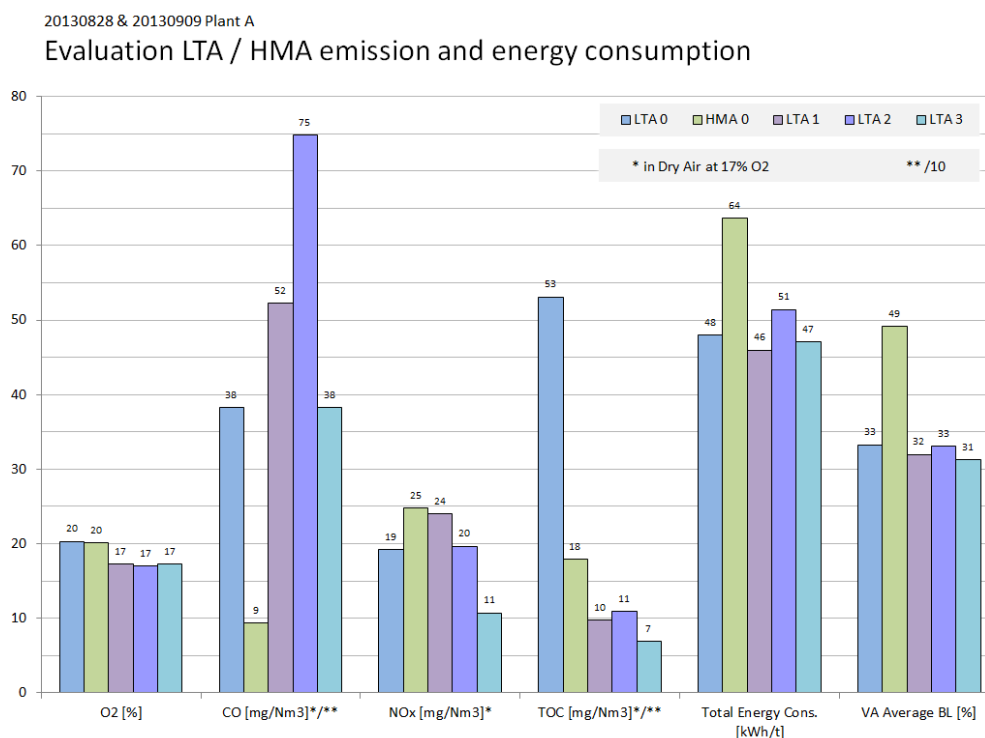


Fig. 26 Centrale A: Synthèse des mesures d'émissions et consommation énergétique

Nous pouvons encore relever que le séchage des granulats pour les productions d'enrobé tiède (LTA) engendre une température des gaz bruts dans la cheminée aux alentours de 50 °C, ce qui constitue une température critique avec risque de condensation et colmatage des filtres. Une augmentation de ces températures peut être atteinte par la réduction de la vitesse du tambour ce qui aura cependant des conséquences sur la qualité des matériaux produits.

Il est finalement utile de rappeler que ces mesures, effectuées dans le cadre du projet de recherche, ne sont pas à comparer avec des mesures d'émissions réalisées selon l'OPair, ceci car les conditions ne sont pas similaires.

D'un point de vue opérationnel, la production d'enrobé tiède augmente sensiblement le temps nécessaire par gâchée, ceci en raison du moussage du bitume. Une gâchée de 6 t nécessitera en effet 350 kg de bitume qui devront passer par l'unité de moussage. Le rendement de l'unité de moussage étant de 3.5 kg_{bit}/s, environ 100-104 s seront nécessaires au moussage du bitume, ceci pour chaque gâchée. La cadence de production dans le cas de production tiède, avec cette technologie de moussage du bitume, est donc d'environ 120-150 t/h, cette cadence de production étant de 400 t/h dans le cas de production à chaud standard. Un accroissement de la production horaire

peut cependant être obtenu par une augmentation de la puissance de la pompe à bitume (*i.e.* débit de bitume au-travers de l'unité de moussage). Il est également utile de relever que l'ajout de matériau recyclé peut s'avérer bénéfique pour la productivité de la centrale, ceci permettant de diminuer la quantité de bitume d'apport et par conséquent la durée nécessaire à son moussage.

4.5 Campagne de mesures: Centrale B

4.5.1 Informations générales

Les mesures sur la centrale B ont été effectuées le 14.10.2014. Par rapport à la centrale A, nous pouvons relever la présence de fraisat d'enrobé (50%/m, granulométrie 0/11).

La production tiède a été réalisée selon un procédé de moussage du bitume (W-ecophalt®), procédé dont le principe général est comparable à celui de la technologie WAM-Foam® développée par Shell et Kolo Veidekke (deux bitumes), sans ajouts d'additifs spécifiques. De manière générale, la centrale utilise une recette similaire pour les enrobés tièdes et chauds les teneurs en fraisat d'enrobé étant donc comparables. La production d'enrobé tiède est réalisée avec une température réduite des agrégats d'apport (VA) soit environ 120 ... 140 °C, les granulats de fraisat d'enrobé étant également chauffés à environ 120 – 140 °C.

Un joint de pompe à bitume défectueux ainsi qu'un problème de fermeture de la trappe du malaxeur ont nécessité l'arrêt de la production durant environ 45 minutes au cours de la campagne de mesures. En raison de ce retard, différents enrobés (LTA, HMA) ont donc été produits en alternance directe.

La production d'enrobé tiède (LTA) représente environ 1'200 t d'enrobé AC T 22 N (couche de portance). Les enrobés à chaud produits représentent quant à eux différentes recettes de la production journalière de la centrale soit AC T 22, AC 11, etc avec des teneurs en RA allant de 0% à 50%.

Comme précédemment, la consommation énergétique (relevé manuel des compteurs de gaz) a été suivie, les émissions suivantes étant mesurées : O₂, CO, NO_x, et COT.

L'enrobé fabriqué a ensuite été posé dans la région de Tavernes, soit à environ 1 h de transport de la centrale.

4.5.2 Résultats détaillés

Les données d'exploitation de la centrale sont représentées dans la figure 27 où nous pouvons observer les deux phases de production d'enrobés tièdes (LTA) ainsi que la production d'enrobé à chaud (HMA) qui ont fait l'objet des mesures. Nous pouvons notamment relever que l'enrobé à chaud a été produit sans RAP (RA FR ratio), la température de ces granulats recyclés étant en effet d'environ 120 °C lors des productions tièdes. Nous pouvons également observer que le rendement des brûleurs à granulats vierges est d'environ 20-40% lors des productions tièdes.

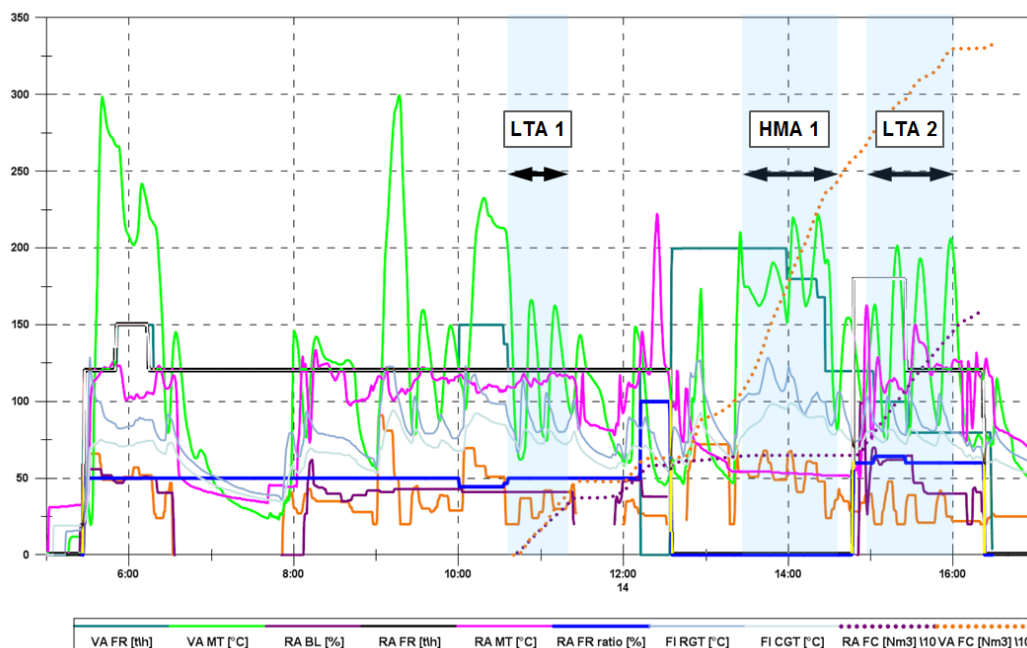


Fig. 27 Centrale B, mesures 14.10.2014 – Données d'exploitation

Les différentes émissions mesurées sont consignées dans la figure 28. Nous pouvons notamment observer que la teneur en oxygène se situe globalement entre 14% et 16%, légèrement inférieur que lors des mesures sur la centrale A.

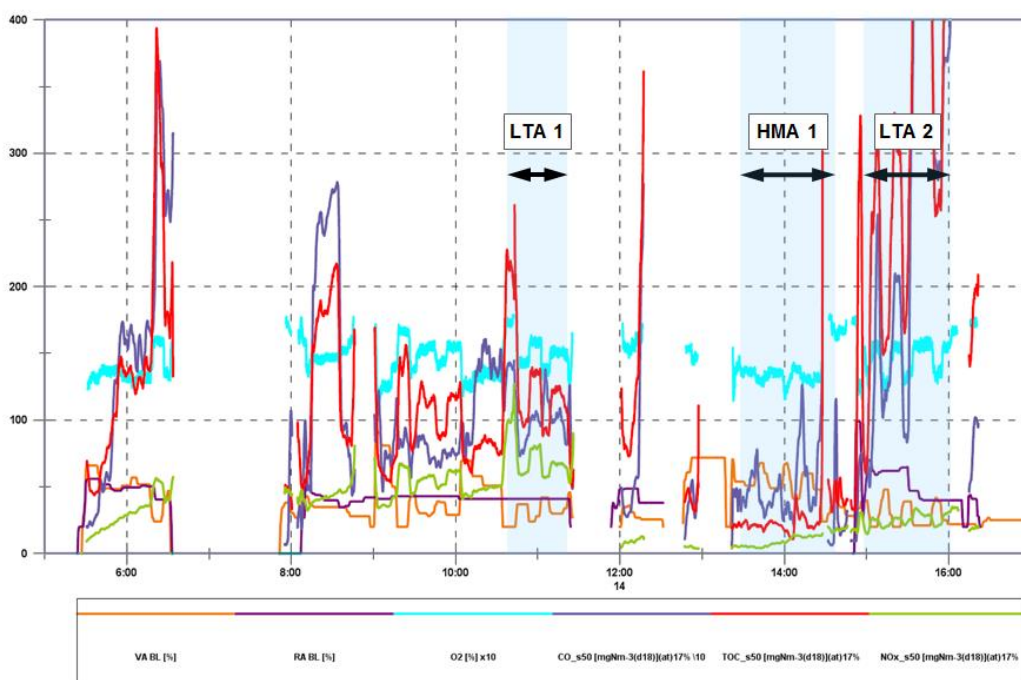


Fig. 28 Centrale B, mesures 14.10.2014 – Emissions mesurées

Le détail des mesures entre enrobé tiède (LTA1, 10:45-11:20) et enrobé à chaud (HMA1, 13:30-14:30) est proposé dans la figure 29. Nous pouvons observer:

- La température moyenne des granulats d'apport varie passablement plus lors de la production d'enrobé tiède; cette température oscillant globalement entre 60 °C et 160 °C.
- Comme il pouvait être attendu, le rendement du brûleur (VA BL) est plus élevé lors de la production d'enrobé à chaud (> 50%) que lors de la production d'enrobé tiède

(environ 20-40%). Cette différence de rendement peut être partiellement justifiée par l'utilisation des deux brûleurs (granulats vierges VA et granulats d'apport RA) lors de la production des enrobés tièdes.

- La production tiède étant faite avec l'ajout de RAP (50% selon donnée RA FR ratio), un rendement du brûleur à RAP est observé soit environ 45% (RA BL).
- Les émissions de COT semblent sensiblement plus élevées lors de la production d'enrobé tiède que lors de la production d'enrobé à chaud, de même que les émissions de NO_x. Ces différents résultats seront encore discutés dans la synthèse en fin de chapitre.
- Les tendances sont globalement comparables si l'on considère les données mesurées lors de la production de l'enrobé LTA2 comparativement à l'enrobé de référence à chaud.

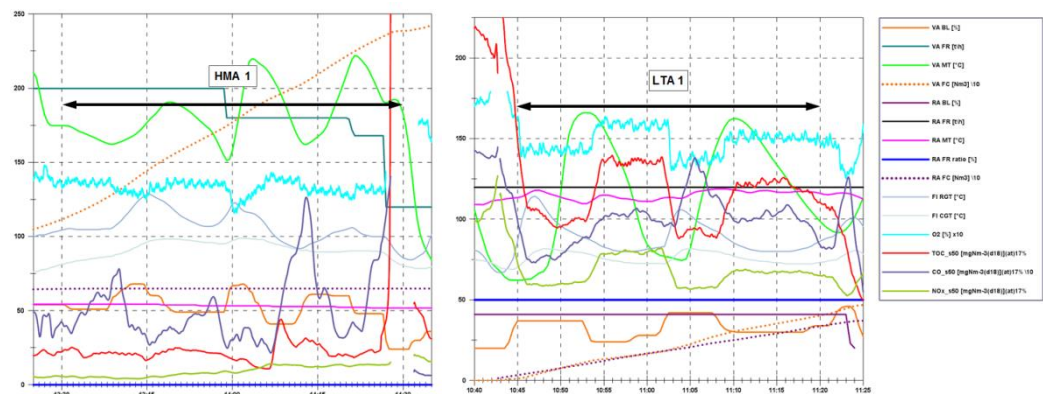


Fig. 29 Centrale B, mesures 14.10.2014 – Comparatif des émissions HMA (gauche) et LTA1 (droite)

4.5.3 Synthèse des résultats et observations

Une synthèse des différentes mesures effectuées sur la centrale B soit données d'exploitation, émissions et énergie est finalement proposée dans le Tab. 15 où il est utile d'observer que les conditions de réalisation des mesures sont *a priori* identiques pour l'ensemble des mélanges (même journée de production).

Tab. 15 Synthèse des mesures centrale B (exploitation, émissions, énergie)

	LTA 1	HMA 1	LTA 2
EXPLOITATION			
Date mesures	14.10.2014	14.10.2014	14.10.2014
Période mesures	10:45-11:20	13:30-14:30	15:00-16:00
Durée mesures	35 min	60 min	60 min
Débit moyen granulats	120 t/h	185 t/h	90 t/h
Débit granulats pendant mes.	70 t	185 t	90 t
Rdt moyen brûleur VA	33%	52%	26%
Ajout RAP	Oui	Non	Oui
Débit moyen RAP	120 t/h	-	145 t/h
Débit granulats pendant mes.	70 t	-	145 t.
Rdt moyen brûleur RAP	41%		53%
EMISSIONS			
O ₂	15%	13%	15%
CO @ air sec 17% O ₂	1194 mg/Nm ³	425 mg/Nm ³	1294 mg/Nm ³
NO _x @ air sec 17% O ₂	66 mg/Nm ³	7 mg/Nm ³	23 mg/Nm ³
NO @ air sec 17% O ₂	65 mg/Nm ³	6 mg/Nm ³	22 mg/Nm ³
COT @ air sec 17% O ₂	121 mg/Nm ³	20 mg/Nm ³	204 mg/Nm ³
ENERGIE			
Consommation GN brûleur VA durant test	381 Nm ³	1232 Nm ³	569 Nm ³
Consommation GN brûleur RAP durant test	294 Nm ³	-	676 Nm ³
Consommation totale GN durant test	675 Nm ³	1232 Nm ³	1245 Nm ³
Consommation totale GN durant test	544 kg	993 kg	1003 kg
Consommation spécifique GN	5 Nm ³ /t	7 Nm ³ /t	5 Nm ³ /t
Consommation spécifique GN	4 kg/t	5 kg/t	4 kg/t
Consommation totale d'énergie	49 (73%)	67 (100%)	53 (79%)

GN : Gaz naturel

Données GN : pouvoir calorifique inférieur=10.09 kWh/kg, densité à 20°C=0.806 kg/l

Une synthèse graphique des différents résultats est proposée dans la figure 30.

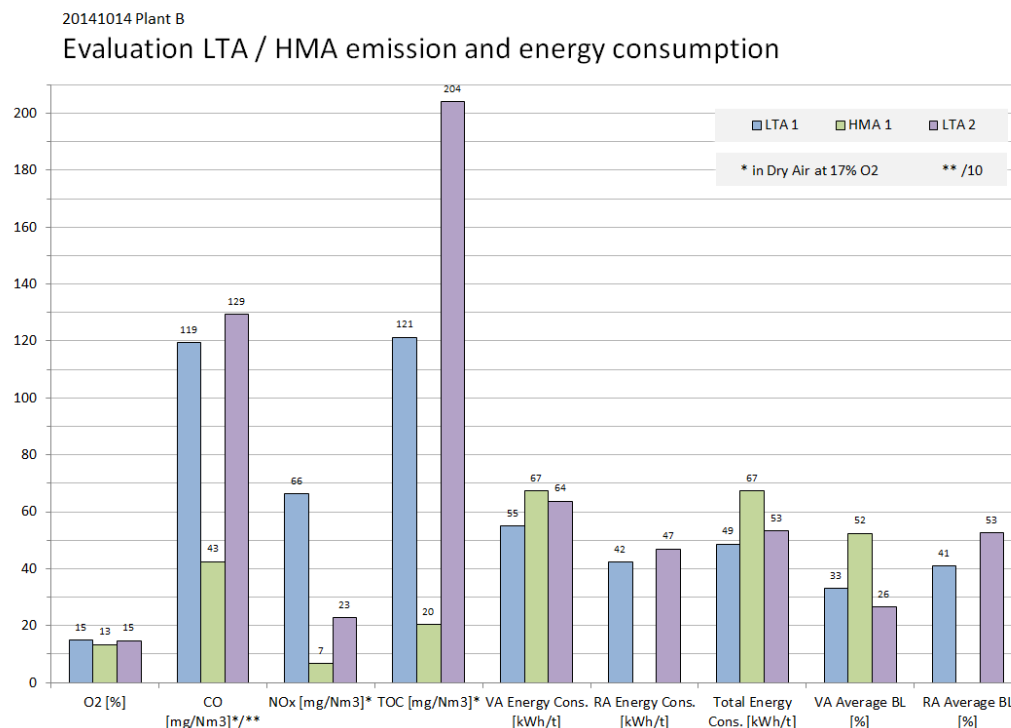


Fig. 30 Centrale B: Synthèse des mesures d'émissions et consommation énergétique

Dans un premier temps, il est utile d'indiquer qu'une comparaison directe entre les productions tièdes (LTA) et l'enrobé à chaud (HMA) ne peut être effectuée. En effet, en raison des contraintes d'exploitation à la centrale, les productions tièdes ont été effectuées avec ajout de fraisat d'enrobé (chauffé, tambour parallèle), la production à chaud étant quant à elle sans RAP.

Les données relatives à la consommation d'énergie indiquent tout de même une économie non négligeable lors de la production d'enrobé tièdes, le gain énergétique moyen représentant 24% (RAP à chaud dans l'enrobé tiède). De tels gains énergétiques ne sont donc pas négligeables.

Les mesures d'émissions sur la centrale B indiquent des émissions de COT sensiblement plus élevées lors de la production des enrobés tièdes (différence d'un facteur 6 à 10 selon la production considérée). Cela est cependant lié au fait que les enrobés tièdes ont été produits avec l'ajout de RAP (à chaud), contrairement à l'enrobé de référence qui ne contient pas de fraisat d'enrobé.

Le même phénomène peut être observé par la réalisation des mesures de monoxyde de carbone (CO) où la concentration en CO est environ trois fois plus élevée lors de la production d'enrobé tiède que lors de la production de l'enrobé de référence à chaud (sans RAP). Il est cependant difficile de déterminer si cette différence importante dans les émissions de CO est liée uniquement à un rendement plus faible du brûleur à granulats vierges ou alors à une combinaison avec les opérations liées à l'utilisation de RAP. Il semble cependant que les paramètres ou la configuration des brûleurs pourrait être optimisée afin de diminuer ces émissions lorsque le rendement est diminué.

Les émissions de NO_x amènent aux mêmes commentaires que celles de COT et CO à savoir une concentration sensiblement plus importante (facteur entre 3 et 9) lors de la production des enrobés tièdes. Les raisons à ces différences dans les émissions sont identiques à celles invoquées au sujet des monoxydes de carbone.

4.6 Campagne de mesures: Centrale C

4.6.1 Informations générales

Les mesures sur la centrale C ont été effectuées le 20 et le 21 octobre 2014, la centrale utilisant du gaz naturel comme source d'énergie et disposant par ailleurs d'un tambour parallèle pour l'ajout à chaud de RAP. Cette centrale présente la particularité de posséder deux tours de malaxage:

- Tour de malaxage TM1: Equipée avec une unité de moussage (un seul bitume) et pouvant produire des enrobés avec recyclage à chaud.
- Tour de malaxage TM2: Système "hot stock" permettant de produire des enrobés avec ajout à froid de fraisat.

La centrale est équipée avec un seul compteur à gaz qui comprend par conséquent la consommation énergétique de ses différents éléments. Par conséquent, les mesures énergétiques avec ce compteur ne permettent pas de séparer les contributions de chaque brûleur (granulats vierges, granulats recyclés) ainsi que du système de chauffage du bitume.

Nous pouvons finalement relever que le système de filtres utilisés (LÜHR) est équipé avec un "brûleur d'appoint" démarrant automatiquement dans le cas où la température des gaz d'échappement est trop basse évitant (diminuant) ainsi le risque de condensation au sein des filtres. Ce brûleur d'appoint, pas en fonction lors de la campagne de mesures, est alimenté au mazout.

Les recettes suivantes ont été produites lors de la campagne de mesures:

- LTA: Enrobé AC T 16N, moussage du bitume (un bitume, injection de 4% d'eau déterminée empiriquement, sans additifs ou dopes), 40% de RAP introduit à chaud.
- HMA: Différentes recettes et gâchées durant la journée de mesures. Au cours des mesures, le sécheur à granulats vierges était principalement utilisé afin de remplir le hot stock (0/11, 0/16, ...) mais toujours sans recyclage à chaud.

Nous pouvons finalement relever une augmentation de la durée de malaxage de 20 secondes environ lors de la production de tièdes vis-à-vis de la production d'enrobé à chaud traditionnel. L'enrobé tiède en sortie de poste d'enrobage présente une température d'environ 125°C (mesure laser), ce qui semble cohérent.

En plus des données relatives à la consommation énergétique et données opérationnelles, les émissions suivantes sont mesurées: O₂, CO, NO_x, et COT.

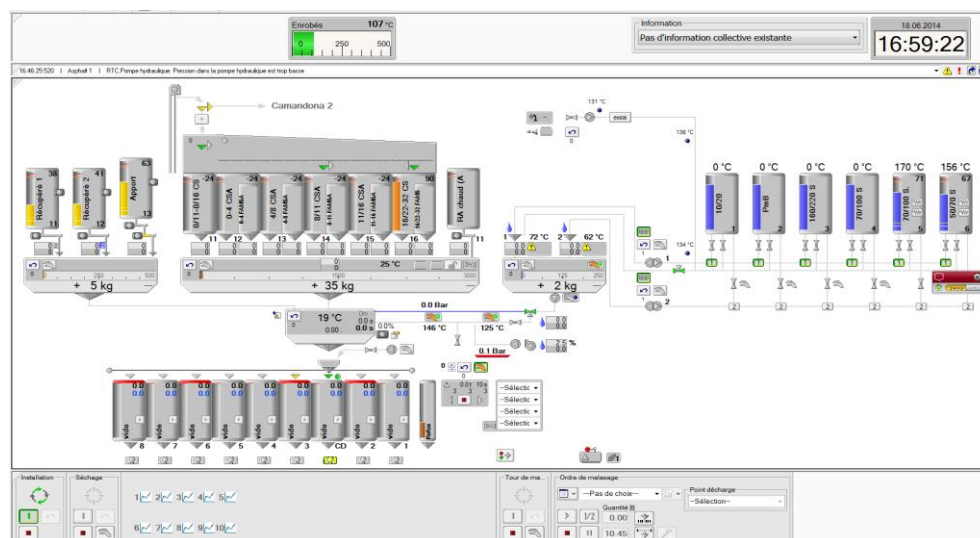


Fig. 31 Centrale C: Ecran de contrôle TM1 avec unité de moussage du bitume (Source: Ammann)

4.6.2 Résultats détaillés

Les données détaillées relatives au premier jour de production (20.10.2014) sont proposées dans la figure 32 pour les données d'exploitation et la figure 33 pour les émissions mesurées.

L'analyse des données d'exploitation illustre bien la différence de rendement du brûleur en fonction du type d'enrobé produit (VA BL). Nous pouvons estimer que le brûleur fonctionne à environ 35-40% de capacité lors de la production d'enrobé tiède, ce rendement étant plus proche de 50% environ pour la production d'enrobé à chaud. La différence de température dans les granulats d'apport (VA MT) entre enrobé tiède (environ 125 °C) et enrobé à chaud (175-200 °C) peut également être observée. La teneur en RAP (RA ratio) indique également que les enrobés à chaud mesurés ne contiennent vraisemblablement pas de fraisat. Comme mentionné précédemment, la température dans les filtres (FI) est un autre paramètre important. Si l'on considère la température des gaz épurés (FI CGT), nous pouvons observer que cette température est d'environ 70 °C lors de la production d'enrobé tiède alors que la production d'enrobé à chaud augmente la température des gaz d'échappement à approximativement 100 °C. Cette différence de température peut jouer un rôle important dans un éventuel processus de colmatage des filtres.

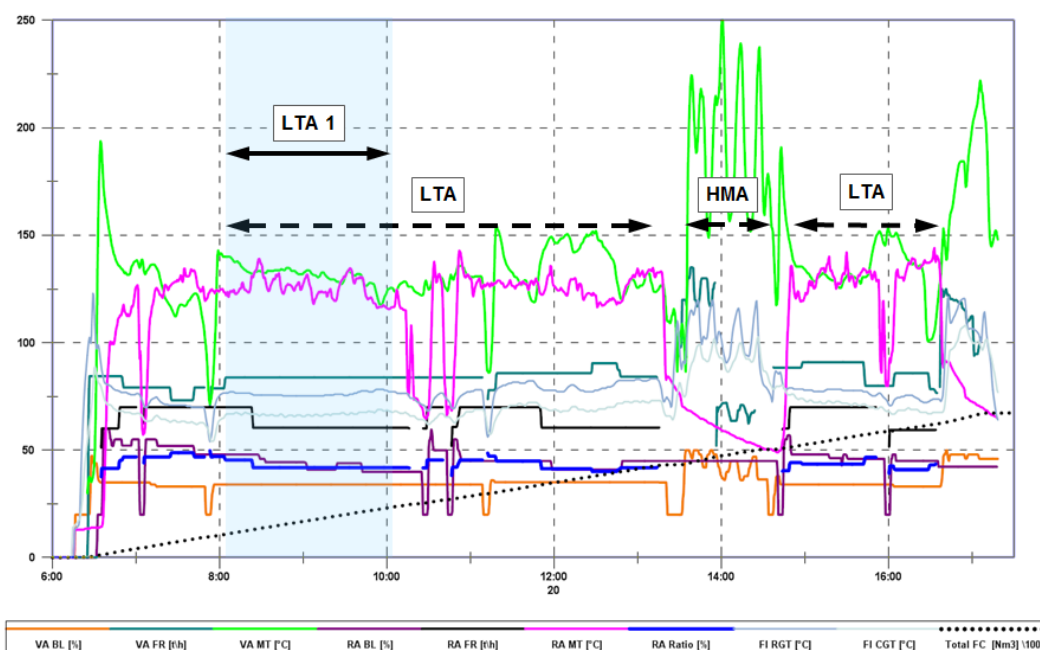


Fig. 32 Centrale C, mesures 20.10.2014 – Données d'exploitation

Les tendances observées dans les émissions mesurées indiquent des émissions de COT significativement plus importantes lors de la production d'enrobé tiède que lors de la production d'enrobé à chaud. Comme pour la centrale B, la raison principale à cette augmentation des COT est liée à l'utilisation de recyclé à chaud dans le tambour parallèle. L'ordre de grandeur de la différence ne peut être déterminé sur la seule base de la figure ci-dessous, les mesures devant être traitées et converties en conditions standard. De manière qualitative, il semble également que la concentration de NO_x soit comparable entre enrobé tiède et chaud, de même que la concentration en oxygène O₂.

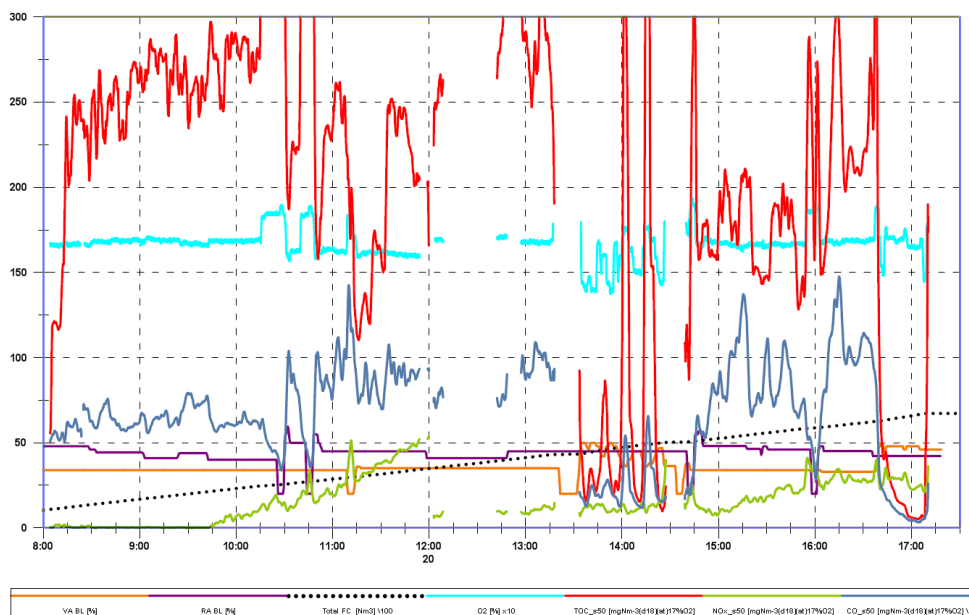


Fig. 33 Centrale C, mesures 20.10.2014 – Emissions mesurées

Une analyse du détail des mesures lors de la production LTA1 (08:10 – 10:10) met en évidence la température moyenne des granulats d'apport (VA MT) qui est d'environ 130-140 °C et des granulats de RAP (RA-MT) qui est légèrement plus faible soit environ 120-130 °C.

Les données d'exploitation du second jour de production (21.10.2014) sont disponibles dans la figure 34. Comme précédemment, nous pouvons observer la différence entre production d'enrobé tiède (LTA) et à chaud (HMA) notamment au niveau du rendement du brûleur (VA BL), de la température des granulats vierges (VA MT) et de la température dans les filtres (FI) qui est sensiblement différente. Nous pouvons également observer que la production HMA2 contient des granulats recyclés à chaud (taux de 50% environ) alors que la production HMA1 est effectuée sans RAP.

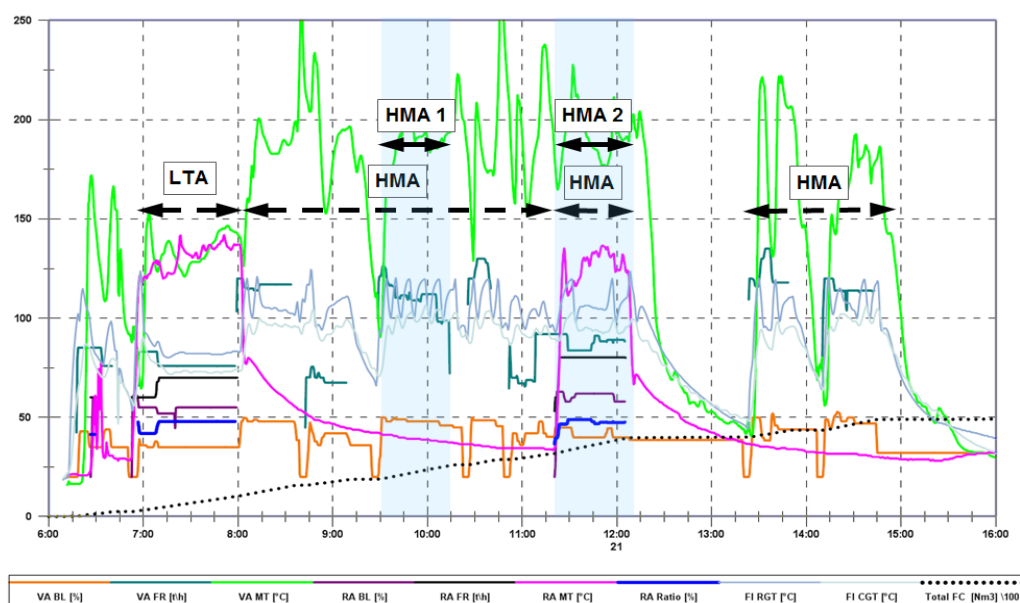


Fig. 34 Centrale C, mesures 21.10.2014 – Données d'exploitation

Certaines différences dans les émissions relatives aux productions d'enrobé à chaud avec (HMA2) et sans ajout de RAP à chaud (HMA) peut être observée dans la figure 35. La variabilité des émissions de COT ne permet pas de mettre en évidence une différence de manière univoque sur cette seule base, mais nous pouvons relever une légère diminution de la concentration en O₂ ainsi qu'une augmentation sensible des émissions de monoxyde de carbone CO, lors de la production d'enrobé avec RAP. Les émissions de NO_x semblent *a priori* légèrement plus élevées lors des mesures avec l'enrobé HMA2 (avec RAP)

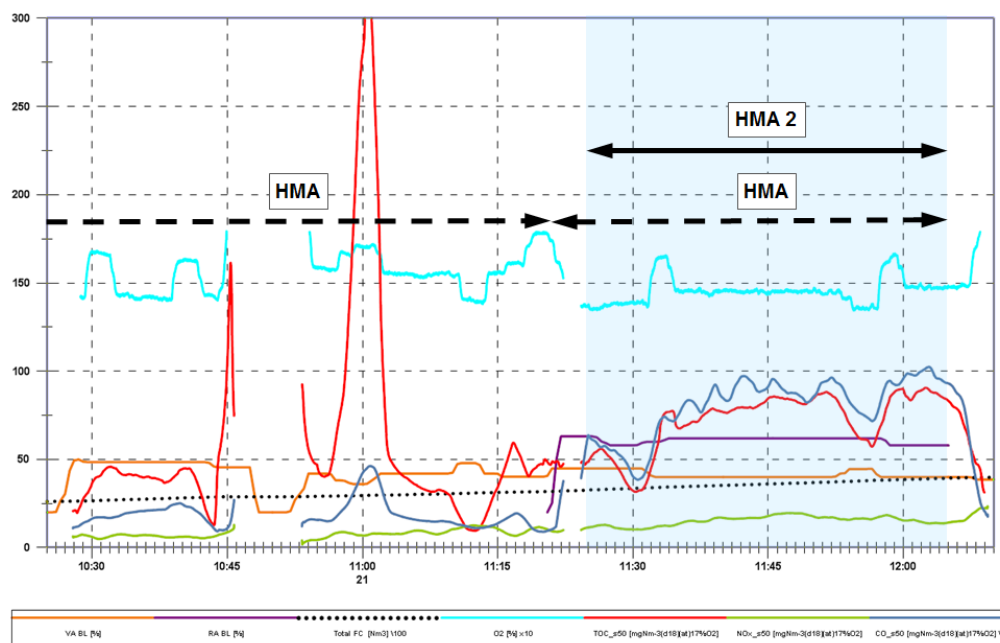


Fig. 35 Centrale C, mesures 21.10.2014 – Emissions des enrobés à chaud

4.6.3 Synthèse des résultats et observations

Une synthèse des différentes mesures, après analyse, est proposée dans le Tab. 16 où nous pouvons observer que les mesures relatives aux enrobés tièdes et à chaud ont été effectuées deux jours consécutifs.

De manière générale, trois différentes périodes de production ont été comparées:

- LTA1: production tiède avec ajout de RAP à chaud (i.e. tambour parallèle en service)
- HMA1: Production à chaud sans RAP (i.e. tambour parallèle arrêté)
- HMA2: Production tiède avec ajout de RAP à chaud (i.e. tambour parallèle en service)

Ainsi, des comparaisons entre variantes tièdes et à chaud ne peuvent être effectuées que sur la base de la comparaison entre les productions LTA1 et HMA2. Pour cette raison, la comparaison de la consommation énergétique totale sera basée sur ces deux productions.

Nous pouvons également relever que les données d'émissions mesurées lors de la production HMA1 n'ont pas pu être exploitées (fichier de données corrompu).

Tab. 16 Synthèse des mesures centrale C (exploitation, émissions, énergie)

	LTA 1	HMA 1	HMA 2
EXPLOITATION			
Date mesures	20.10.14	21.10.14	21.10.14
Période mesures	08:10 – 10:10	09:35 – 10:13	11:25 – 12:05
Durée mesures	120	38	40
Débit moyen granulats	84 t/h	109 t/h	87 t/h
Débit granulats pendant mes.	168 t	69 t	58 t
Rdt moyen brûleur	34%	48%	37%
Ajout RAP	Oui	Non	Oui
Débit moyen RAP	62 t/h	-	80
Débit granulats pendant mes.	123 t	-	54
Rdt moyen brûleur RAP	43%	-	58%
EMISSIONS			
O ₂	17%	-	15%
CO @ air sec 17% O ₂	639 mg/Nm ³	-	808 mg/Nm ³
NO _x @ air sec 17% O ₂	2 mg/Nm ³	-	15 mg/Nm ³
COT @ air sec 17% O ₂	257 mg/Nm ³	-	72 mg/Nm ³
ENERGIE			
Consommation totale GN durant test	1232 Nm ³	576 Nm ³	660 Nm ³
Consommation totale GN durant test	993 kg	464 kg	532 kg
Consommation spécifique GN	4 Nm ³ /t	8 Nm ³ /t	6 Nm ³ /t
Consommation spécifique GN	3 kg/t	7 kg/t	5 kg/t
Consommation totale d'énergie	43 (72%)	84	60 (100%)

GN : Gaz naturel

Données GN : pouvoir calorifique inférieur=10.09 kWh/kg, densité à 20°C=0.806 kg/l

Une comparaison directe entre les différentes mesures est complexe, ceci car les régimes de production (t/h) ne sont pas toujours comparables. Cependant, sur la base des différentes mesures, nous pouvons relever que la consommation énergétique totale de la centrale est diminuée de 28% lors de la production d'enrobé tiède comparativement à une même production à chaud. La comparaison de la production avec (HMA 2) et sans recyclage à chaud (HMA 1) indique une économie d'énergie de 29% dans le cas d'ajout de RAP (teneur: 50%). La différence de consommation énergétique entre la production tiède (avec RAP) et la production à chaud sans RAP est de 49%.

Une comparaison des émissions entre les productions LTA1 et HMA2, toutes deux avec l'ajout de RAP à chaud, indique des émissions de COT sensiblement plus élevées lors de la production d'enrobé tiède (environ 3.5 fois plus). Sur la base de l'expérience acquise et de la littérature, il peut être supposé que les émissions de COT sont relativement faibles dans le cas de la production HMA 1, ceci en raison de l'absence de RAP. La concentration de CO est du même ordre de grandeur entre les deux productions étudiées, mais tout de même légèrement plus élevées lors de la production d'enrobé à chaud (+26%). Les concentrations de NO_x sont globalement faibles lors des mesures réalisées, les valeurs pour la production tiède étant même très faibles.

Une synthèse graphique des différents résultats est finalement proposée dans la figure 36.

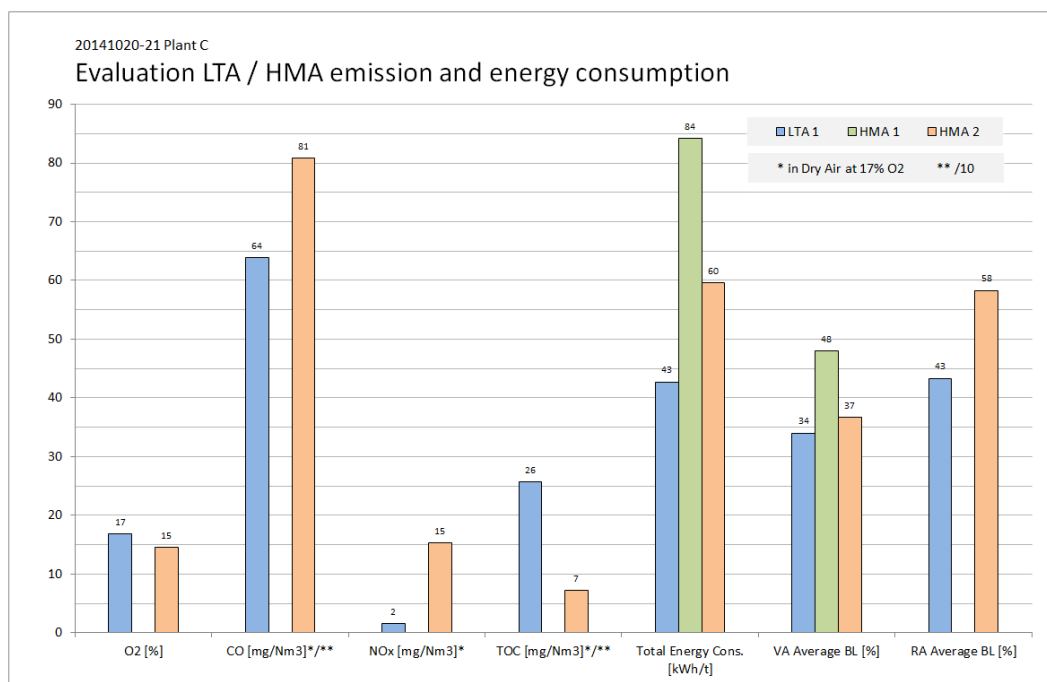


Fig. 36 Centrale C: Synthèse des mesures d'émissions et de consommation énergétique

5 Analyse théorique de la consommation énergétique

Les mesures en centrale d'enrobage, discutées au chapitre 4, permettent de fournir des informations pratiques et en adéquation avec le contexte suisse au niveau des postes d'enrobage (technologie, production, dimensionnement, climat, etc). Comme il l'a été discuté, une comparaison entre postes d'enrobages et types de productions tièdes est relativement complexe sur la seule base des mesures, ceci en raison de la variation des conditions cadres lors des mesures.

Ainsi, dans le but de fournir quelques éléments relatifs à la consommation d'énergie au poste d'enrobage, une analyse théorique est proposée dans le présent chapitre. Outre une estimation de la consommation théorique de l'énergie au poste d'enrobage, cette analyse doit permettre de mettre en évidence et quantifier les impacts de différents paramètres potentiellement déterminants et fournir des données nécessaires en vue de la réalisation d'une analyse coûts-bénéfices qui sera discutée plus avant au chapitre 6.

Le principe général des calculs réalisés ici consiste à déterminer la consommation énergétique, en KJ ou MJ par tonne d'enrobé produite (des kWh auraient également pu être utilisés). Les émissions théoriques sont ensuite calculées sur la base de la consommation énergétique et des sources d'énergie utilisées. Si nécessaire, le coût énergétique peut également être déterminé sur la base de l'énergie consommée, prenant en considération le prix des différentes énergies. Le principe général appliqué ici a consisté à séparer l'énergie totale en deux composantes soit l'énergie de chauffage des composants et l'énergie de chauffage du malaxeur. Ces aspects sont détaillés ci-dessous

Remarque:

Une partie des données présentées dans la suite de ce rapport sont issues des travaux de thèse de Nicolas Bueche, thèse EPFL N° 5169 "Evaluation des performances et des impacts des enrobés bitumineux tièdes". Pour des informations davantage détaillées, on pourra suggérer le rapport de thèse, téléchargeable gratuitement sur le site <http://library.epfl.ch/theses>.

5.1 Energie de chauffage des composants

Par composants, nous sous-entendons les granulats, le filler, le bitume ainsi que les éventuels additifs. L'énergie de chauffage des composants est déterminée par un calcul thermodynamique. Nous détaillons ici les hypothèses de base ainsi que les relations utilisées pour le calcul. L'implémentation des différentes équations a ensuite été réalisée dans le cadre du développement du modèle globale d'évaluation qui fait l'objet de la recherche RS-5 du présent projet PLANET [47].

Nous effectuons les hypothèses suivantes:

- Prise en considération d'additifs pour les technologies tièdes (cires, additifs chimiques, etc).
- Possibilité de travailler avec une fraction froide et une humidité résiduelle du sable.
- Prise en compte possible d'un rendement théorique afin de caler les calculs sur des mesures en centrale ou données de la littérature.
- Flexibilité permettant en tout temps à l'utilisateur de modifier les constantes et hypothèses de base.
- Les techniques par moussage du bitume via injection d'eau seront considérées par l'intermédiaire de la température des différents composants. Par de modélisation des buses d'injection d'eau.

L'évaluation des différents résultats obtenus devra donc prendre en compte les hypothèses et limites de la méthode de calcul. Le principe est fournir une estimation la

plus proche possible de la réalité; une modélisation exhaustive d'un poste d'enrobage devant bien évidemment permettre d'obtenir des résultats encore plus précis.

Les principales constantes sont répertoriées dans le Tab. 17 où l'on relèvera que les données relatives à la cire et à l'additif chimique sont issues du fournisseur de l'additif considéré.

Tab. 17 Constantes pour calcul de l'énergie de chauffage des composants

Constante	Unité	Valeur
Chaleur massique des granulats $C_{p_{gra}}$	kJ/kg·K	0.837
Chaleur massique du bitume $C_{p_{bit}}$	kJ/kg·K	2.093
Chaleur massique de l'eau $C_{p_{eau}}$	kJ/kg·K	4.185
Chaleur latente de vaporisation de l'eau L_v	kJ/kg	2256
Chaleur massique de la vapeur d'eau C_{p_v}	kJ/kg·K	1.83
Chaleur massique de la cire solide $C_{p_{cire,s}}$	kJ/kg·K	1.7
Enthalpie de fusion de la cire L_c	kJ/kg	240
Chaleur massique de la cire liquide $C_{p_{cire,l}}$	kJ/kg·K	2.3
Chaleur massique de l'additif chimique $C_{p_{add}}$	kJ/kg·K	2

Les données de base nécessaires afin de réaliser les différents calculs sont:

- Teneur en eau des granulats, du sable et du filler [%].
- Température initiale des granulats, du sable et du filler [°C].
- Température initiale du bitume [°C].
- Température finale des granulats, du sable et du filler [°C].
- Température finale du bitume [°C].
- Teneur en liant sur enrobé [%].
- Composition granulométrique.

Dans le cas d'enrobé tiède avec ajout de cire (FR-WAX) des données complémentaires concernant la température initiale et la température de fusion de la cire, ainsi que son dosage sont nécessaires. Ces données peuvent sensiblement varier selon le type de cire (Montan, Fischer-Tropsch, etc).

L'utilisation d'un enrobé avec additif chimique de type FR-PACK ou PA-PACK selon la dénomination au sein du projet PLANET requiert la connaissance de la température initiale de l'additif ainsi que son dosage.

Les calculs relatifs à un enrobé avec maîtrise de la teneur en eau (PA-HWAM selon terminologie du projet) nécessitent quant à eux des informations concernant la proportion de sable humide ainsi que l'humidité finale du sable avant enrobage.

Selon les bases de thermodynamique, l'augmentation d'énergie ΔQ associée au chauffage (augmentation de la température), sans changement d'état est calculée ainsi:

$$\Delta Q = m \cdot C_p \cdot (T_f - T_i)$$

Avec :

m	Masse [kg]
C_p	Chaleur massique du matériau [kJ/kg·K]
T_f	Température finale [°C ou °K]
T_i	Température initiale [°C ou °K]

Ainsi, l'énergie à apporter pour chauffer 100 kg de granulat de 15 °C à 160 °C est de 12.14 MJ.

L'augmentation d'énergie associée avec un changement d'état est calculée via l'utilisation de la chaleur latente soit par exemple fusion de la cire ou vaporisation de l'eau. Dans le cas de la vaporisation de l'eau l'énergie à apporter Q calculée avec la relation:

$$Q = m \cdot Lv(T)$$

Avec : m Masse [kg]
 $Lv(T)$ Chaleur latente de vaporisation à la température de transition T

Sur la base de la relation ci-dessus, la vaporisation de 10 kg d'eau requiert une énergie de 22.5 MJ, ce qui est près de deux fois plus élevé que l'énergie nécessaire à chauffer 100 kg de granulats de 15 °C à 160 °C.

Le calcul complet de l'énergie de chauffage des composants pour un enrobé donné consiste finalement à effectuer la somme des différentes énergies de chauffage, de vaporisation et de fusion et ceci pour l'ensemble des composants du mélange bitumineux.

Une fois implémentée, la méthode de calcul a été validée par comparaison avec des résultats de la littérature [40, 41] ainsi qu'en comparant avec d'autres calculateurs théoriques issus du domaine privé ou public (calculateur LEA-CO® par exemple). Nous pouvons également mentionner le calcul comparatif réalisé à l'aide du logiciel ECOROOT (version d'essai), propriété conjointe de ARTS (société d'étude et de recherche des Arts et Métiers ParisTech) et du CETE Ile de France (Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement) dont un exemple de résultat est présenté dans la figure 37.

ARTS
ASSOCIATION DE RECHERCHE
TECHNOLOGIE ET SCIENCES
BTE ET NTIC / PISTON

ECO ROOT

Direction régionale
et interdépartementale
de l'équipement
et de l'aménagement
ILE-DE-FRANCE
CETE Ile-de-France
Liberté • Égalité • Progrès
REPUBLIQUE FRANÇAISE

CARACTERISTIQUES THERMO-HYDRIQUES

Température de sortie: 155 °C
 Eau résiduelle: 0 % base enrobés secs
 Eau additionnelle: 0 % base enrobés secs

FORMULE
 AC T 22S - Chaud

Granulométrie	% base enrobés secs	% eau base sèche
0-2	23,5	5
2-4	11,7	2
4-8	17,4	2
8-11	6,5	2
11-16	12	2
16-22	20	2
Autre	0	0
Autre	0	0
Fines	4,5	1
Agrégats d'enrobé	0	0
Emulsion bitume	0	0
Bitume d'apport	4,4	

DEPENSE ENERGETIQUE ET EMISSION DE GES

Coût énergétique	172,3	MJ / tonne enrobés
Consommation fioul	4,8	kg fioul / tonne enrobés
Emission CO2 fioul	13,2	kg CO2 / tonne enrobés
Empreinte carbone fioul	3,6	kg C / tonne enrobés
Consommation gaz	3,5	kg gaz / tonne enrobés
Consommation gaz	4,8	Nm3 gaz / tonne enrobés
Emission CO2 gaz	9,5	kg CO2 / tonne enrobés
Empreinte carbone gaz	2,6	kg C / tonne enrobés

Nouvelle fiche
 Renommer cette fiche
 Supprimer cette fiche
 Imprimer

Paramètres conventionnels

Valider

Données d'entrée
 Résultats

Fig. 37 Exemple de résultat de calcul avec ECOROOT (tiré de [10])

La différence observée entre le logiciel et le calcul thermodynamique est inférieure à 10%, la différence s'expliquant notamment par la méthode appliquée. En effet, ECOROOT base les calculs sur la température de sortie souhaitée de l'enrobé et distingue les types d'enrobés uniquement sur la base de la température finale du mélange. Dans le cadre de notre recherche, la température initiale des composants est utilisée comme donnée d'entrée. Mentionnons encore que, dans sa version testée, l'outil ECOROOT ne permet par contre pas de considérer des additifs ou d'effectuer une affectation de l'énergie entre différentes sources pour le calcul des émissions.

Une approximation de la température du mélange final (T_{enr}) peut être faite à l'aide de la relation suivante :

$$T_{enr} = \frac{T_{bit} \cdot Cp_{bit} \cdot M_{bit} + T_{gra} \cdot Cp_{gra} \cdot M_{gra}}{Cp_{bit} \cdot M_{bit} + Cp_{gra} \cdot M_{gra}}$$

Avec :	T_{bit}	Température finale du bitume [°C]
	M_{bit}	Masse de bitume [kg]
	T_{gra}	Température finale des granulats [°C]
	M_{gra}	Masse des granulats [kg]

Il est utile de rappeler que ce calcul de la température du mélange est une approximation; relativement fiable pour le cas des enrobés à chaud et des enrobés tièdes avec cire ou additif chimique. Pour les enrobés semi-tiède ou avec ajout d'eau, la température calculée du mélange est mal ajustée, car le calcul ne prend pas en considération la température du malaxeur.

Un calcul exhaustif de la température de l'enrobé et son évolution est complexe. Différents modèles de calculs thermiques ont été développés afin de considérer l'évolution de la température dans l'enrobé lors de sa fabrication et de la pose. Nous pourrions mentionner les travaux de [42] où le modèle de calcul mis en place prend en compte la diffusion de la chaleur dans les granulats, le transfert de chaleur entre les granulats, le bitume et les parties fines ainsi que l'évaporation partielle de l'eau qui est largement dépendante des conditions extérieures. Nous pouvons également mentionner le logiciel « PaveCool », développé par le Minnesota Department of Transportation dont le but est d'assister dans le choix de la pose d'enrobé dans des conditions difficiles (température) par un calcul de l'évolution de la température dans l'enrobé. Plus récemment, des travaux réalisés par la société Eurovia ont été présentés par le Dr. Pouteau avec la mise en place d'un outil de gestion des températures allant du poste d'enrobage au compactage de l'enrobé [43].

5.2 Energie de chauffage du malaxeur

La grande majorité des calculs théoriques de consommation d'énergie relative aux enrobés bitumineux s'intéressent exclusivement à l'énergie de chauffage des granulats et évaporation de l'eau. Cette énergie représente en effet la part la plus élevée de la consommation énergétique totale et est également plus aisée à calculer.

Nous considérons ici l'énergie nécessaire au chauffage de l'air du malaxeur afin d'estimer par la suite sa contribution vis-à-vis de l'énergie totale et ainsi affiner le bilan théorique global. L'énergie de chauffage du malaxeur est différente selon la production d'un enrobé tiède ou d'un enrobé à chaud ceci car la température du malaxeur est différente (variation de son rendement).

Nous donnons ci-après les bases du calcul qui a été implémenté dans le modèle PLANET. Ces développements sont issus de notamment de discussions et échanges divers avec le M. J. A. Gonzalez Léon (Arkema).

Dans un premier temps, nous supposons que les granulats à l'entrée du malaxeur sont secs. L'énergie nécessaire à l'évacuation de l'eau provenant des granulats est prise en considération dans le calcul de l'énergie de chauffage des composants discuté précédemment. L'humidité présente dans le malaxeur est donc celle relative à l'humidité de l'air. Les données initiales requises sont :

• Débit d'air dans le malaxeur	Q_{air} [m³air/h]
• Cadence de production d'enrobé	P [tenr/h]
• Humidité de l'air en entrée	Ha [%]
• Température de l'air en entrée	T_{ent} [°C]
• Température de séchage	$T_{séch}$ [°C]

Différentes constantes sont également utilisées et elles sont consignées dans le Tab. 18

Tab. 18 Constantes pour calcul de l'énergie de chauffage du malaxeur

Constante	Unité	Valeur
Pression atmosphérique P_{atm}	Pa	101325
Masse molaire de l'eau M_{eau}	g/mol	18
Masse molaire de l'air M_{air}	g/mol	28.97
Constante universelle des gaz parfaits R	J/mol·K	8.314
Chaleur massique vapeur d'eau C_{pv}	kJ/kg·K	1.83
Chaleur massique air sec C_{pas}	kJ/kg·K	1.007

L'énergie totale de chauffage du malaxeur, ΔH_{tot} peut être exprimée comme la somme de l'énergie de chauffage de l'air dans le malaxeur et de l'énergie de chauffage de la vapeur d'eau éventuellement présente selon l'humidité de l'air. Elle sera exprimée par la relation suivante:

$$\Delta H_{tot} = \Delta H_{air} + \Delta H_{vap} \text{ [kJ/t}_{ent}\text{]}$$

Avec : ΔH_{air} Energie de chauffage de l'air [kJ/t_{ent}]
 ΔH_{vap} Energie de chauffage de la vapeur d'eau [kJ/t_{ent}]

L'énergie de chauffage de l'air ΔH_{air} est calculée avec:

$$\Delta H_{air} = m_{air,ent} \cdot C_{pas} \cdot (T_{sor} - T_{ent})$$

Avec : $m_{air,ent}$ masse d'air sec à l'entrée [kg/t_{ent}]
 T_{sor} Température de l'air à la sortie [°C]

La température de l'air en sortie T_{sor} est définie par l'expérience acquise lors de mesures en centrales soit: $T_{sor} = 0.8 \cdot T_{séch}$ [°C]

La masse d'air sec à l'entrée $m_{air,ent}$ est exprimée par :

$$m_{air,ent} = \frac{Q_{air}}{P} \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{M_{air}}{1000} \cdot \frac{P_{atm}}{(T_{ent} + 273.15)} \cdot (1 - C_{eau,kg})$$

Avec : $C_{eau,kg}$ Concentration d'eau dans l'air [kg_{eau}/kg_{air}]

Les différents paramètres de l'équation ci-dessus sont connus, à l'exception de la concentration d'eau $C_{eau,kg}$ qui est calculée avec la relation suivante:

$$C_{eau,kg} = \frac{C_{eau,mol} \cdot M_{eau}}{C_{eau,mol} \cdot M_{eau} + (1 - C_{eau,mol}) \cdot M_{air}}$$

Avec : $C_{eau,mol}$ Concentration d'eau dans l'air [mol_{eau}/mol_{air}]

$C_{eau,mol}$ peut être déterminé par :

$$C_{eau,mol} = \frac{P_{sat,e} \cdot H_a}{100 \cdot P_{atm}}$$

Avec : $P_{sat,e}$ Pression de vapeur d'eau à saturation à l'entrée du malaxeur [Pa]

La pression de vapeur d'eau à saturation à l'entrée du malaxeur $P_{sat,e}$ est définie par une relation empirique (approximation de Magnus-Tetens). Cette équation est issue de la relation de Clausius-Clapeyron décrivant de manière générale l'évolution de la pression d'équilibre en fonction de la température d'équilibre au cours d'un changement d'état d'un corps pur. Il vient:

$$P_{sat,e} = 610.78 \cdot e^{\frac{T_{ent}}{(T_{ent}+238.3)}} \cdot 17.2694$$

L'énergie de chauffage de la vapeur d'eau ΔH_{vap} est exprimée de la même façon que l'énergie de chauffage de l'air soit avec la relation:

$$\Delta H_{vap} = m_{eau,ent} \cdot C_{pv} \cdot (T_{sor} - T_{ent})$$

Avec : $m_{eau,ent}$ masse d'eau à l'entrée du malaxeur [kg/t_{enr}]

Les températures à l'entrée et à la sortie ont déjà été définies préalablement. La masse d'eau $m_{eau,ent}$ est finalement comme précédemment avec:

$$m_{eau,ent} = \frac{Q_{air}}{P} \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{M_{air}}{1000} \cdot \frac{P_{atm}}{(T_{ent} + 273.15)} \cdot C_{eau,kg}$$

5.3 Analyse paramétrique de consommation énergétique et émissions

Une fois les bases théoriques établies et implémentées, différents calculs de consommation énergétique peuvent être réalisés. Nous proposer ici différentes considérations, l'objectif global consistant à identifier et quantifier les aspects gouvernant la consommation énergétique au poste d'enrobage. Nous concentrons les calculs ci-après sur la consommation énergétique. On pourra cependant également déterminer les émissions ou les coûts énergétiques sur les bases des valeurs d'énergie calculées. Pour d'autres détails, on pourra également suggérer de consulter [44].

Les principales hypothèses et limites des calculs réalisés sont les suivantes:

- Système fermé, parfaitement calorifugé : Pas de pertes de chaleur et d'énergie.
- Hypothèses associées à la thermodynamique.
- Travail en flux continu i.e. pas de prise en compte du chauffage de la centrale et des cuves à bitume.
- Brûleur de centrale calibré et optimisé.
- Pas de prise en compte d'éventuels matériaux recyclés.
- La totalité de l'eau est évaporée : Humidité résiduelle de 0% dans l'enrobé (correspond à la réalité selon les observations issues du rapport RS-6 [49]).

5.3.1 Etude d'un enrobé à chaud

Sauf mention contraire, nous considérons par la suite que le système ne comporte pas de pertes (rendement théorique de 100%). Nous supposons ici un enrobé à chaud traditionnel de type AC T 22S tel que utilisé dans le cadre des essais en laboratoire de la RS-3 du paquet de recherches PLANET [48]. Pour rappel, l'enrobé considéré possède une teneur en filler de 6% (en masse) et un passant cumulé de 29.5% au tamis de 2.0 mm et 42.5% au tamis 4.0 mm. La teneur en liant de cet enrobé est de 4.60%.

Les paramètres principaux pour le calcul de référence sont consignés dans le Tab. 19 où l'on pourra observer que l'énergie de chauffage du parc à liant n'est pas considérée.

Tab. 19 Paramètres pour le cas de référence (enrobé à chaud, AC T 22S)

Teneur en eau initiale des granulats	2%
Teneur en eau initiale du sable	5%
Teneur en eau initiale du filler	1%
Températures des granulats	initiale : 15 °C, finale 155 °C
Températures du sable et du filler	initiale : 15 °C, finale 155 °C
Températures du bitume	initiale : 160 °C, finale 160 °C

L'énergie nécessaire pour la fabrication de l'enrobé à chaud est de 182 MJ/t. Cette énergie correspond à l'énergie de chauffage et vaporisation, sans prise en compte du chauffage de l'air du malaxeur pour l'instant. La consommation énergétique de chaque composant et fraction granulométrique par rapport au total est répertoriée dans la figure 38. Il apparaît sans surprise que le sable est la fraction nécessitant la plus grande énergie (33% du total). De cette énergie, 54% est utilisée pour l'évaporation de l'humidité du sable.

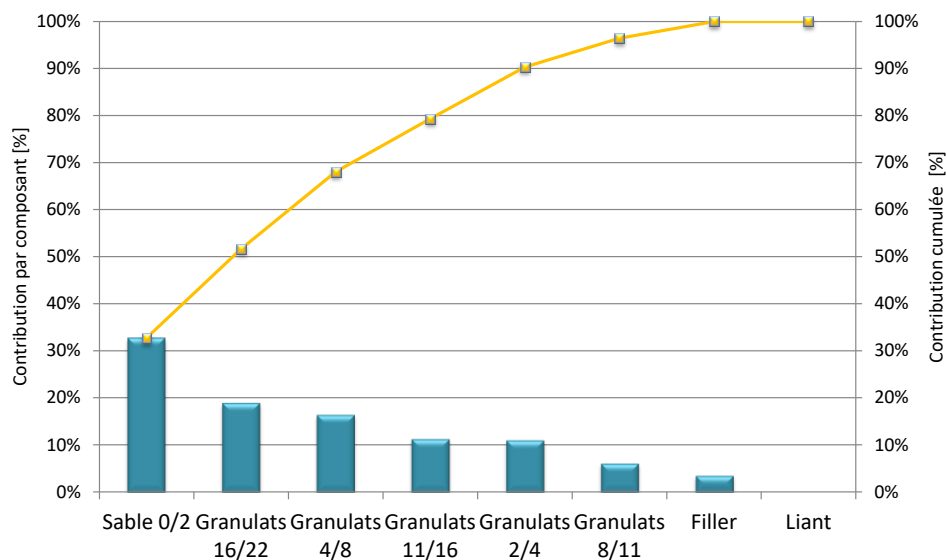


Fig. 38 Répartition de l'énergie nécessaire au chauffage des composants

Il est largement connu que les fractions granulométriques fines ont une capacité de rétention de l'humidité sensiblement plus importante que les fractions grossières. Ainsi, des gains (ou pertes) considérables peuvent être faits selon la teneur en eau des fractions fines. Une analyse de sensibilité en fonction de la teneur en eau de la fraction de sable 0/2 est présentée dans la figure 39. La différence de consommation d'énergie globale est donc de 14%, ceci pour une variation de 4% de l'humidité de la seule fraction de sable.

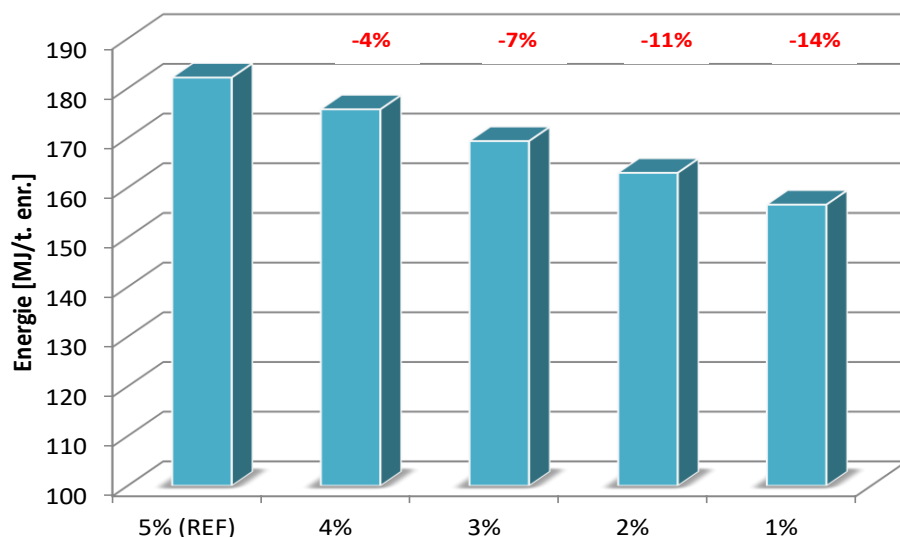


Fig. 39 Analyse de sensibilité: humidité sable 0/2

Le filler est une fraction absorbant tout particulièrement l'humidité et c'est pourquoi il est généralement protégé et maintenu le plus sec possible. Cependant, en raison de sa relative faible quantité, une variation de l'humidité du filler a sensiblement moins d'impact qu'une variation de la teneur en eau du sable. Une humidité du filler de 3% ou de 5%

augmente la consommation énergétique totale de respectivement 1% et 3% par rapport au cas de référence supposant 1% d'humidité.

De même, la température initiale des granulats joue un rôle modéré sur la consommation énergétique totale. Des granulats à la température de 5 °C augmentent la consommation énergétique de 3% comparativement au cas de base qui suppose une température initiale de 15 °C des granulats.

En raison notamment de "contraintes" d'exploitation, il n'est pas rare que la température de chauffage des granulats en centrale d'enrobage soit augmentée au-delà de 155 °C (cas de référence lors de fabrications en laboratoire). Ceci est le cas par exemple lors de l'utilisation de matériaux recyclés. Une augmentation de la température de chauffage des granulats de 25 °C (température finale de 180 °C) engendre une augmentation de la consommation énergétique de 12%. Le chauffage des granulats à 210 °C nécessite quant à lui 26% d'énergie en plus que pour le cas de référence. Cet effet peut donc être une contribution importante à la consommation totale d'énergie parfois mesurée au poste d'enrobage. Tout comme une humidité trop élevée des fractions fines, la température de chauffage des granulats blancs doit être prise en compte dans le cadre d'une optimisation énergétique d'un poste d'enrobage

Si l'on considère brièvement les émissions, le choix de la source d'énergie aura un impact considérable. Ainsi, il est largement reconnu que l'utilisation du gaz est avantageuse comparativement au fioul; la différence théorique au niveau des émissions étant de près de 40%. Cela est également discuté dans [10].

5.3.2 Etude d'enrobés tièdes

Les différentes analyses de sensibilité et tendances préalablement discutées pour un mélange à chaud sont également valables dans le cas d'enrobés tièdes.

Nous effectuons ici une analyse de consommation énergétique théorique de trois procédés tièdes, faisant partie intégrante du projet PLANET, dont le procédé est sensiblement différent. Les mélanges suivants sont considérés (voir [48] pour plus de détails sur les procédés):

- REF-HOT: Enrobé de référence à chaud.
- FR-WAX: Enrobé tiède avec ajout de 3% de cire Fischer-Tropsch (par rapport au liant).
- FR-PACK: Enrobé tiède avec ajout d'un additif chimique (agent tensio-actif), dosé à 0.4% de la masse de bitume.
- PA-HWAM: Enrobé tiède avec moussage du bitume (maîtrise de la teneur en eau). Un additif (fluxant végétal) est également ajouté (0.4% de la masse de liant).

A ces différents enrobés, un procédé additionnel semi-tiède appelé EBT® a été ajouté. Cet enrobé, étudié dans le cadre d'un précédent projet mené au LAVOC [41], consiste à introduire le filler et le sable (fraction 0/4) froids, l'humidité du sable étant ajustée afin d'avoir une humidité totale des granulats de 1.25% avant malaxage. L'enrobé ainsi fabriqué possède une température finale inférieure à 100 °C, diminuant sensiblement la consommation d'énergie.

L'humidité et la température initiale des composants des différents enrobés sont identiques à la référence, la différence entre procédés se situant donc au niveau des températures finales ainsi que des éventuels additifs.

La figure 40 indique l'énergie nécessaire pour la fabrication des enrobés, ceci sur la seule base du calcul thermodynamique. La contribution de l'énergie relative au malaxeur peut quant à elle être observée dans la figure 41.

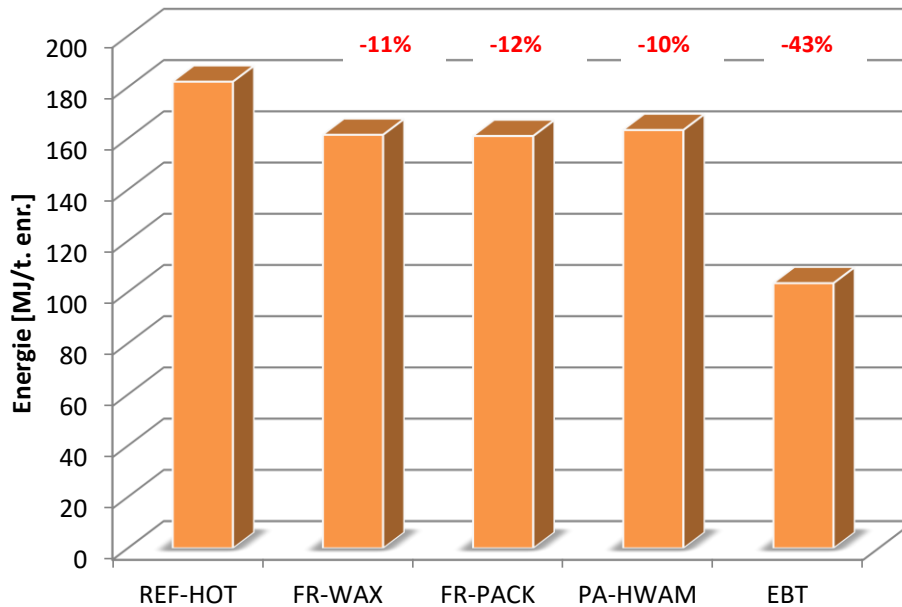


Fig. 40 Energie nécessaire à la fabrication des enrobés tièdes (chauffage des composants)

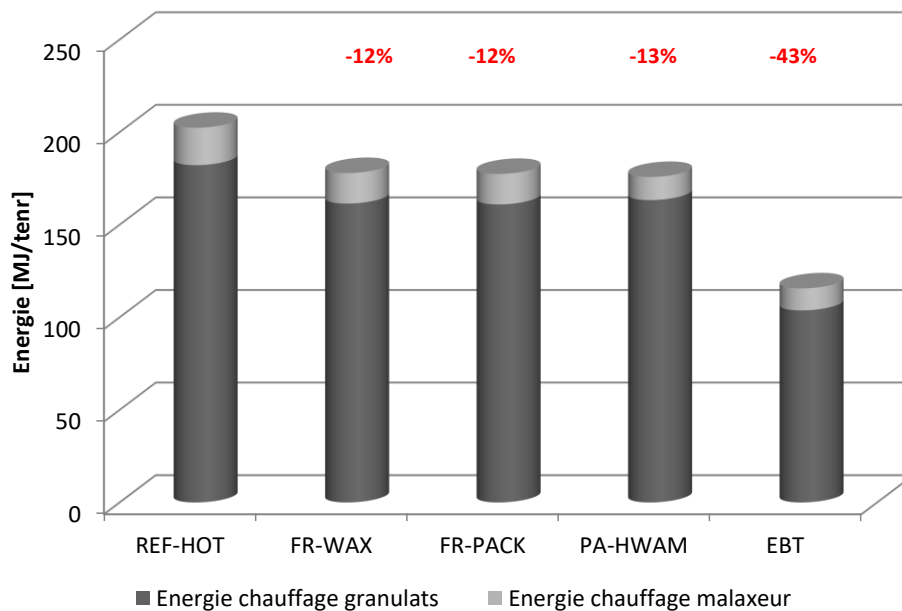


Fig. 41 Energie nécessaire à la fabrication des enrobés tièdes (chauffage des composants et malaxeur)

Il vient les commentaires suivants:

- Sans prise en compte de l'énergie de chauffage du malaxeur, les enrobés FR-WAX, FR-PACK et PA-HWAM présentent une consommation énergétique comparable. Leurs gains par rapport à la production de référence sont de 10-12% selon les cas. L'économie d'énergie théorique semble donc modérée. Si les granulats de l'enrobé de référence sont chauffés à 210 °C au lieu de 155 °C, les gains énergétiques sont alors de 30% environ. Ce chiffre est plus proche des mesures effectuées en centrales d'enrobage et données statistiques disponibles.
- Le calcul de l'énergie de chauffage de l'air du malaxeur est effectué en supposant un débit d'air de 30'000 m³/h et une production d'enrobé de 200 t/h. L'énergie de chauffage de l'air du malaxeur représente entre 11.9 MJ/t pour l'enrobé EBT et 20.2 MJ/t pour la référence REF-HOT. La différence entre les enrobés est donc

significative au niveau du malaxeur. Cependant, l'énergie de chauffage du malaxeur reste faible comparativement à l'énergie totale nécessaire ; elle représente respectivement entre 10% pour les enrobés REF-HOT et EBT et 7% pour l'enrobé PA-HWAM.

- Le bilan énergétique total avec prise en compte de l'énergie de chauffage du malaxeur n'est que peu modifié par rapport à la prise en considération de la seule énergie de chauffage des composants. C'est pourquoi la composante relative au chauffage du malaxeur est généralement négligée. On observe à nouveau que pour des granulats d'enrobé à chaud « surchauffés » à 210 °C, alors le gain énergétique avec la production des enrobés tièdes est d'environ 30% pour les enrobés PA-HWAM, FR-WAX et FR-PACK, les gains se montant à 55% pour l'enrobé semi-tiède EBT.

5.3.3 Rendement théorique d'un poste d'enrobage

Considérant les différentes données à disposition, un rendement énergétique théorique des centrales d'enrobage peut être calculé. Les données utilisées sont les suivantes:

- Enquête PLANET sur la consommation énergétique des centrales (chapitre 3.3).
- Données complémentaires relatives à la consommation énergétique des centrales suisses, selon chapitre 3.1 (tiré de [10]).
- Données issues de la littérature (détails au chapitre 2.3).
- Calculs théoriques de consommation énergétique.

La détermination du rendement théorique notamment pour objectif d'estimer les pertes énergétiques, pour également pouvoir ajuster au mieux les futurs calculs théoriques. Il est cependant utile de grader à l'esprit les hypothèses et conditions aux limite de base préalablement mentionnées. Nous effectuons le calcul pour un enrobé à chaud en raison de la plus grande disponibilité de données.

Les résultats sont présentés dans la figure 42 où les données en bleu correspondent à celles issues du chapitre 3.1 (moyenne en trait discontinu), les données en vert correspondent à la littérature (moyenne en trait discontinu) et les données avec un trait discontinu rouge correspondent à l'enquête sur les centrales d'enrobage menée dans le cadre du projet PLANET.

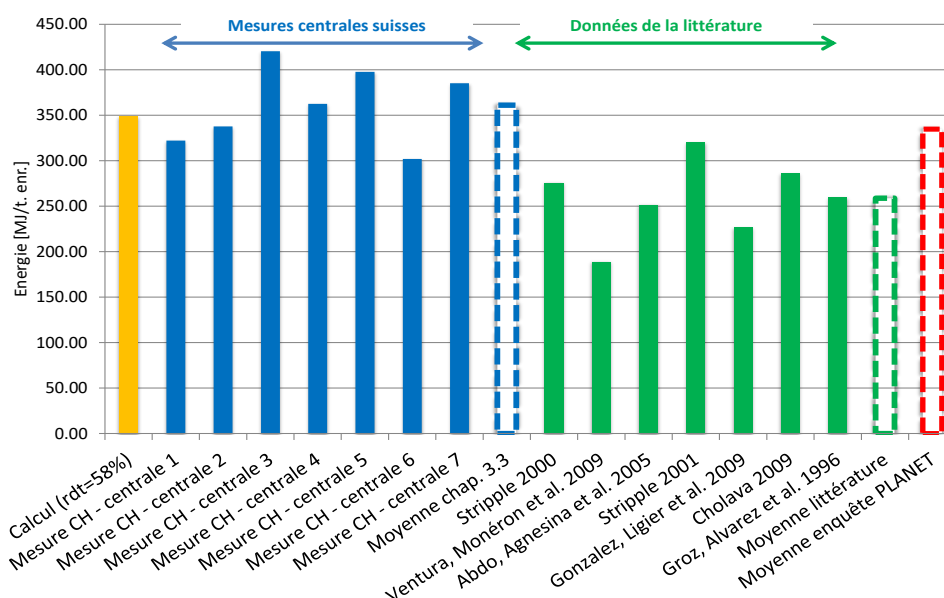


Fig. 42 Comparatif de consommation énergétique selon différentes sources de données et calcul du rendement théorique

La consommation énergétique moyenne en considérant l'ensemble des données disponibles pour les centrales suisses (chapitre 3) est d'environ 350 MJ/t. Considérant

cette valeur, cela signifie que le rendement théorique des postes d'enrobage suisses est de 58%. En d'autres termes, les pertes d'énergie dans un poste d'enrobage sont de 42%. LE calcul d'un rendement théorique sur la seule base des données issues de la littérature amène un rendement calculé de 78%. Bien évidemment, si le cas de référence est un enrobé à chaud dont les granulats sont montés à la température de 210 °C (155 °C dans le cas de référence), alors la consommation énergétique théorique augmente et le rendement théorique également. Un rendement théorique de 74% est calculé pour ce cas (26% de pertes), ce qui est proche des rendements annoncés par les exploitants de centrales d'enrobage (généralement entre 75% et 85%).

5.4 Considérations relatives à l'optimisation des centrales

Bien que cela ne fasse pas directement l'objet du présent projet RS-1 relatif à l'impact des enrobés tièdes sur les centrales d'enrobage, nous pouvons proposer ici quelques pistes relatives à l'optimisation énergétique (et environnementale) des centrales d'enrobage.

Un des paramètres les plus importants et largement reconnus est l'humidité initiale des fractions de sable. En raison de sa surface spécifique élevée et de la tension superficielle, le sable absorbe l'humidité et la conserve (le filler également). L'humidité résiduelle est par conséquent difficile à évacuer. Le séchage des granulats est nécessaire afin de diminuer l'énergie thermique au poste d'enrobage, mais également pour économiser de l'énergie électrique relative au débit nécessaire à-travers le filtre et l'exhausteur du poste d'enrobage. Afin de travailler avec des granulats des mesures très sim peuvent être mises en place comme l'utilisation de camions bâchés, wagons protégés ainsi que le recours à un système de protection des granulats à la centrale. Ces mesures sont généralement appliquée par les producteurs d'enrobés. En cas d'utilisation d'un toit de protection des granulats, différentes pistes d'optimisation pourront alors être intégrées à la réflexion. On pourra par exemple mentionner:

- L'utilisation d'un toit foncé favorisant l'évaporation de l'humidité,
- un système de ventilation naturelle (circulation de l'air),
- un brassage régulier du tas de sable augmentant la surface de contact avec l'air,
- l'utilisation de panneaux solaires,
- le recours à un plancher bétonné avec pente,

Selon l'expérience de différents producteurs, un séchage efficace du sable permet de réduire la facture énergétique d'environ 10 kWh/t ce qui représente approximativement 10% de la consommation moyenne d'énergie.

Les analyses effectuées au chapitre 5.3.3 mettent en évidence des pertes évidentes d'énergie au poste d'enrobage. L'origine de ces pertes peut être multiple. La figure 43, provenant de l'Agence de l'énergie pour l'économie (AEnEC), schématise les différentes pertes énergétiques au poste d'enrobage (flèches violettes) ainsi que les sources d'apport énergétique (flèches rouges). Ces données doivent être considérées avec précaution, mais nous pouvons mettre en évidence que les pertes les plus importantes se situent au niveau de la cheminée, sous forme de vapeur (43% de l'énergie initiale). Cette chaleur perdue pourrait être réutilisée par exemple dans le processus de séchage des granulats ou dans un système de préchauffage de l'air de combustion, ce qui agit alors directement sur le rendement de la centrale. Mentionnons encore que dans l'exemple ci-dessous, la consommation énergétique moyenne est de 252 MJ/t et le rendement de 35% ce qui est très faible.

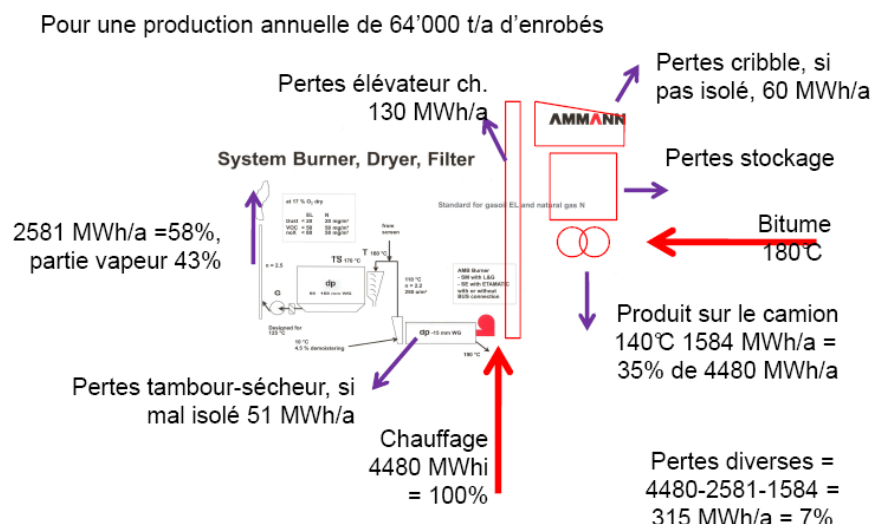


Fig. 43 Schématisation des pertes énergétiques en centrale d'enrobage (Source: AEnEC)

Dans l'étude [20] un suivi de quatre centrales d'enrobage au Royaume-Uni est discuté. Les auteurs indiquent qu'en moyenne 47% de l'énergie thermique fournie au brûleur est utilisée dans la procédure de chauffage des granulats et 33% sont utilisés pour l'évaporation de l'humidité des granulats. Les pertes énergétiques représentent par conséquent environ 20%. Les pertes d'énergie les plus importantes (12%) sont sous la forme d'air chaud dans la cheminée.

Différentes pistes peuvent finalement être envisagées afin de diminuer les pertes énergétiques au poste d'enrobage. On pourra notamment relever:

- Optimisation de l'isolation de la centrale : Ceci concerne en particulier les cuves à bitume, le hot-stock, les conduites, les élévateurs et le tambour sécheur. Des faiblesses d'isolation thermique peuvent être mises en évidence par la réalisation de mesures thermographiques. L'utilisation de cuves à bitume verticales, qui est actuellement la "norme" permet de diminuer les déperditions en réduisant la surface de contact avec l'air. Les conduites calorifugées sont également un moyen de diminuer les pertes d'énergie en centrale.
- Continuité de production : Les temps-morts dans la période de production augmentent la consommation énergétique par tonne d'enrobé produite. Ceci est illustré dans la figure 44 où la courbe rouge représente la consommation moyenne de mazout (l/t) selon la production journalière de la centrale et la courbe bleue indique la surconsommation (%), calculée en fonction du nombre de tonnes produites, comparativement à la consommation théorique en centrale. Ces données, issues de l'AEnEC, concernent des centrales suisses. Relevons encore que la discontinuité de la production est (partiellement) indépendante des exploitants de la centrale d'enrobage en raison de la multiplicité des produits considérés en Suisse ainsi que de la taille relativement réduite des productions généralement requises.

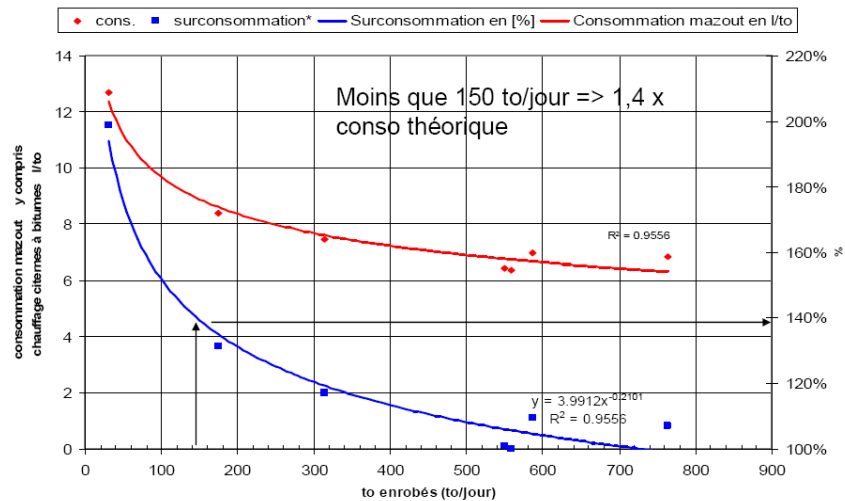


Fig. 44 Schématisation de l'impact de la production journalière sur la consommation énergétique (Source: AEnEC)

- Choix de la source énergétique : Les calculs théoriques et mesures sur centrales démontrent l'impact de la source d'énergie sur les émissions. Dans leurs travaux [45] discutent des émissions relatives à la production d'enrobé où les auteurs s'intéressent notamment à la réaction de combustion dans le brûleur de la centrale (TSE). Selon la relation de base ($C_mH_n + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$), un processus de combustion parfaite requiert certaines quantités spécifiques d'oxygène. De manière générale, des combustibles plus légers et volatiles sont plus efficaces que des combustibles lourds car ils possèdent moins de carbone par unité de chaleur et peuvent brûler avec de plus faibles quantités d'air. Par conséquent, ils produisent également moins d'émissions de CO_2 . Les auteurs indiquent un gain de 17% sur les émissions de CO_2 (par tonne d'enrobé) en utilisant du gaz naturel comme combustible au lieu du fioul lourd. De plus, le recours au gaz naturel permet de s'affranchir des camions de livraison; les taxes et frais de raccordement pouvant cependant s'avérer parfois prohibitifs.
- Dimensionnement et système de contrôle du sécheur et du malaxeur.

6 Analyse coûts-bénéfices

Sur la base des différents éléments préalablement discutés, nous proposons ici une brève analyse coûts-bénéfices (ACB) pouvant consister de support dans le cadre d'un processus de décision relatif à un poste d'enrobage. L'objectif global de l'ACB consiste à déterminer s'il est économiquement supportable (ou profitable), pour une centrale suisse, d'investir dans des technologies tièdes de production des enrobés bitumineux.

6.1 Principe de l'analyse coûts-bénéfice

L'analyse coûts-bénéfices ou coûts-avantages est une méthode qui vise à mettre en balance les bénéfices réalisés par l'exécution d'un projet vis-à-vis des coûts que celui-ci engendre afin que le gestionnaire ou le mandataire puisse prendre une décision [21].

Les analyses coûts-bénéfices sont utilisées dans pratiquement tous les secteurs qu'il s'agisse de l'économie, la politique ou autre. Aux Etats-Unis, par exemple, les analyses coûts-bénéfices sont utilisées pour tout projet de réglementation.

6.1.1 Base de l'analyse coûts-bénéfice

L'analyse coûts-bénéfices dans le secteur privé revient à réaliser une analyse économique d'un projet en y incluant les aspects financiers d'une part mais aussi les aspects sociaux d'autre part. Cette analyse joue également le rôle d'aide à la décision et doit finalement conseiller le décideur afin qu'il prenne la meilleure décision dans l'allocation de ses ressources financière [21].

Le but principal d'une analyse coûts bénéfices est de mettre en regard tous les coûts d'un projet avec les bénéfices qui peuvent être réalisés. La complexité de ce genre d'analyse réside dans le fait de mettre tous ces éléments dans la même unité, généralement monétaire. Comme certains aspects, notamment sociaux, sont difficilement chiffrables, l'analyse coûts-bénéfice doit préciser quels aspects et quels critères ont été évalués de ceux qui ne l'ont pas été [28].

Une fois les éléments de l'analyse coûts-bénéfices validés, il faut alors définir le périmètre de ceux-ci et les scénarios à analyser. L'exemple de scénarios consiste à évaluer l'action de l'inaction ou l'effet du report d'un projet.

Les étapes clés d'une analyse coûts-bénéfice sont données ci-dessous et se basent sur le guide méthodologique de l'analyse coûts bénéfice [21]:

- Définir le contexte et le but de l'analyse coûts-bénéfices.
- Spécifier les scénarios du projet.
- Définir les paramètres de l'analyse coûts-bénéfices et leurs portée.
- Définir la monétarisation des paramètres.
- Donner une recommandation.

6.1.2 Etapes de réalisation de l'analyse coûts-bénéfice

Dans le cas de la présente étude, le but de cette analyse est de définir la production d'enrobés tièdes est intéressante d'un point de vue économique et sous quelles conditions. La rentabilité générale doit donc être évaluée.

Le scénario principal évalué dans le cadre de ce projet est d'évaluer les effets principalement monétaires de la mise en place d'une technologie de production d'enrobés tièdes face à une situation de statu quo soit enrobé à chaud seuls. Notons que l'impact sur le taux de réutilisation d'enrobé bitumineux (ajout de RAP) n'est pas considéré; ce dernier étant probablement favorable aux technologies tièdes (avantage de RAP peut être ajouté).

Un scénario secondaire est également proposé au niveau d'un changement de source d'énergie des brûleurs. En effet, lors de travaux de ce type, il peut être intéressant de voir si une modification de la source d'énergie (par ex. passer du fioul au gaz) peut s'avérer économiquement supportable.

Paramètres retenus et exclus du modèle

Sur la base de différentes conditions de base et de données techniques que l'utilisateur de l'analyse coûts-bénéfices devra introduire manuellement, il est possible de paramétrer l'ACB. Ces conditions de base et données techniques sont par exemple des données relatives à la production de la centrale (tonnages), technologie de la centrale,...

La première série de paramètres retenus dans l'analyse concerne les coûts unitaires soit les coûts d'investissement pour le matériel de production en fonction des différentes technologies de production d'enrobés tièdes. En effet, chaque technologie requiert ses propres développements du poste d'enrobage et donc ses propres investissements que le décideur devra alors considérer. Un autre facteur relatif aux coûts concerne les données d'exploitation (productivité) de la centrale. Comme discuté préalablement, certains enrobés tièdes nécessitent des additifs ou autres produits dont le coût est à prendre en compte et ce coût variant également en fonction des tonnages produits.

Une deuxième série de paramètres retenus dans l'analyse concerne les bénéfices ou les avantages que peuvent engendrer la production d'enrobés tièdes. Il s'agit alors des économies d'énergie, de l'exonération de la taxe CO₂ ainsi que des cautionnements de prêt lié à l'introduction de la taxe CO₂ [1, 3].

Une dernière série de paramètre relative à la source d'énergie pour l'alimentation du brûleur du tambour sécheur est intégrée à l'analyse coûts-bénéfices. Il s'agit alors d'étudier si le changement de source d'énergie du brûleur peut s'avérer économiquement intéressant pour l'entreprise.

Les paramètres exclus du modèle sont principalement les paramètres sociaux comme la baisse des émissions, l'amélioration des conditions de travail pour les ouvriers du poste d'enrobage et sur chantier ainsi que la publicité indirecte liée à la production de produits davantage "verts". Ces différents paramètres sont en effet difficilement monétarisables sans la réalisation d'une étude approfondie de chaque thématique.

Monétarisation des paramètres

Comme expliqué ci-dessus, les paramètres retenus sont aisément monétarisables. Au niveau des coûts d'investissements, ceux-ci sont donnés sous la forme d'annuité valable sur un certain nombre d'années. Ils prennent en compte tous les coûts liés à l'installation d'une technologie dans le but de produire des enrobés tièdes ainsi que l'ensemble des aspects qui concernent les conditions de prêt (intérêts, durée d'amortissement, hypothèque,...) Au niveau des coûts d'exploitation, ceux-ci sont donnés en fonction du tonnage produit et du dosage nécessaire pour chaque produit.

Au niveau des bénéfices, les économies d'énergies sont calculées en fonction des propriétés physiques des carburants et de leur prix relatif. Il s'agit donc de calculer de manière exhaustive les économies pouvant être réalisées par une diminution de l'énergie de chauffage des composants.

Pour ce qui est du changement de source d'énergie, les mêmes calculs sont réalisés avec d'une part les éventuels coûts de raccordement et d'autre part les économies pouvant être réalisée par des rendements meilleurs ou des énergies moins chères.

Pour ce qui est de la taxe CO₂ la loi [1] et l'ordonnance [3] contiennent toutes les indications nécessaires aux calculs.

L'unité monétaire choisie pour cette analyse est le "CHF/année".

Résultats

Le résultat attendu de l'analyse coûts-bénéfices est le temps de retour sur investissement selon les scénarios suivants:

- Scénario principal: Coûts et gains lors de la production d'enrobés tièdes.
- Scénario secondaire: Scénario principal + changement de source d'énergie du bruleur.

L'analyse coûts-bénéfices a finalement été implémentée au format MS-Excel, ceci afin de réaliser différents calculs; un extrait étant proposé dans la suite.

6.2 Coûts relatifs à la production d'enrobés tièdes en centrale d'enrobage

Les coûts liés à la production des enrobés tièdes en centrale d'enrobage ont déjà été quelque peu abordés lors de l'analyse de la littérature proposée au chapitre 2.2.

Nous proposons ici de développer une liste aussi exhaustive que possible des modifications nécessaires pour la production d'enrobé tièdes, ceci prenant en compte les différents familles de technologies. Une fois ces modifications connues, il s'agit alors de les chiffrer en fonction de données trouvées dans la littérature ou en fonction de données fournies par les constructeurs de centrale.

Les coûts se décomposent en deux grandes familles soit les coûts d'investissements qui représentent les modifications faites à la centrale (coûts uniques) et les coûts d'exploitations qui représentent le prix des éventuels additifs tels que dopes d'adhésivité, cires, zéolithe, ... ainsi que des éventuelles royalties selon le procédé.

6.2.1 Coûts des modifications du poste d'enrobage

Le tableau ci-dessous contient les modifications à faire sur les centrales ainsi que le coût de celles-ci en fonction de la typologie des enrobés tièdes produits.

Tab. 20 Coûts des modifications du poste d'enrobage pour la production d'enrobés tièdes

Typologie d'enrobé tièdes	Modification	Coûts d'investissement
Moussage du bitume		
Bitume moussé	Brûleur adapté a plusieurs gammes de puissance	105'000 CHF (** MB-453)
	Unité de moussage à installer sur la ligne de bitume	30'000 à 120'000 CHF (** 90'000 CHF)
	Ligne d'incorporation d'additifs pour dopes liquides soit au niveau du malaxeur ou au niveau de l'unité de moussage	5'000 à 45'000 CHF (** 35'000 CHF)
Sable humide	Brûleur adapté a plusieurs gammes de puissance	105'000 CHF (** MB-453)
	Ligne de RAP ou autre, utilisable pour faire monter du sable et pour l'humidifier avant qu'il ne soit inséré dans le malaxeur	5'000 à 200'000 CHF (** 150'000 CHF)
	Ligne d'incorporation d'additifs pour dopes liquides	5'000 à 45'000 CHF (** 35'000 CHF)
Introduction d'ajout solide		
Zéolite ou cire	Brûleur adapté a plusieurs gammes de puissance	105'000 CHF (** MB-453)
	Ligne d'incorporation pour ajout solide (zéolite ou cire) au niveau du malaxeur	40'000 à 60'000 CHF (** 50'000 CHF)
	Nouvelle ligne pour les bitumes déjà modifiés (cire)	40'000 à 150'000 CHF (** 120'000 – 150'000 CHF)
	Ligne d'incorporation d'additifs pour dopes liquide	5'000 à 45'000 CHF (35'000 CHF)
Introduction d'ajout liquide		
Bitume modifiés	Brûleur adapté a plusieurs gammes de puissance	105'000 CHF (** MB-453)
	Nouvelle ligne pour les bitumes déjà modifiés	40'000 à 150'000 CHF (** 120'000 CHF)
Additifs	Brûleur adapté a plusieurs gammes de puissance	105'000 CHF (** MB-453)
	Ligne d'additifs liquides à injecter dans la ligne de bitume ou au niveau du malaxeur	5'000 à 45'000 CHF (** 35'000 CHF)
	Modification de la séquence de malaxage	0 à 5'000 CHF*

*Pas nécessairement chiffrable, à considérer de manière indicative

** Eléments selon liste de prix indicative Ammann

Nous pouvons remarquer que les différents coûts sont indiqués dans une fourchette relativement large afin de tenir du compte de la grande diversité de matériel à disposition. Cependant, la fourchette haute comprend les prix tout compris (matériel, raccordement mains d'œuvre,...). Ces coûts doivent également être considérés de manière indicative et ils ne peuvent servir de base à la mise en place d'un plan d'investissement d'un poste spécifique.

Une liste de prix indicative est par ailleurs fournie en Annexe au présent rapport (Source: Ammann). Il est utile de rappeler que les prix indiqués sont à titre informatif / indicatif et sans garantie. En outre, ces prix peuvent varier en fonction des progrès techniques, des ajustements individuellement nécessaires au système actuellement en place et/ou de l'évolution du marché.

6.2.2 Coûts d'exploitation additionnels

Le tableau ci-dessous renseigne les coûts d'exploitation des différents produits entrant dans la fabrication des enrobés tièdes ainsi que les éventuelles royalties liées à certaines technologies tièdes. Comme précédemment, ces coûts doivent être considérés avec précaution et ils sont sujet à d'importantes variations selon l'année et la région considérée.

Tab. 21 Coûts additionnels d'exploitation en centrale d'enrobage

Additifs	Coûts d'exploitation
Dope (Cecabase RT®)	1.10 CHF/tonne d'enrobé produit
Additifs (Greenseal®)	2.56 CHF/tonne d'enrobé produit
Additif (Evotherme®)	3.50-4.00 CHF/tonne d'enrobé produit
Cire (Sasolwax®)	1.50-3.70 CHF/tonne d'enrobé produit
Zéolite (Advera®)	1.50-3.50 CHF/tonne d'enrobé produit
Royalties	Coûts d'exploitation
Wam Foam® (bitume mousse)	15'000 \$ pour la première année 5'000 \$ pour les années suivantes et 0.30 \$ / tonne

Nous pouvons relever que la modification relative à l'adaptation du brûleur est considérée de manière systématique, ceci indépendamment de la technologie tiède choisie. Cette modification est en effet nécessaire afin d'éviter que le brûleur ne fonctionne à trop bas régime. Comme discuté précédemment, un bas rendement du brûleur entraîne une combustion incomplète ce qui a pour conséquence un risque élevé d'augmentation de la concentration des émissions polluantes (CO, NO_x, COT,...).

Le prix des technologies tièdes varie fortement mais les modifications (ligne de RAP, incorporation d'ajout solide, nouvelle ligne de bitume) peuvent parfois être utilisées pour plusieurs additifs.

6.3 Construction de l'analyse coûts-bénéfice

L'analyse coûts-bénéfices développée dans ce projet est un outil transparent où le décideur a la possibilité de modifier toute une série de données de base et de données techniques en fonction de son installation. Seuls les calculs finaux des coûts et des bénéfices ainsi que du temps de retour sur investissement sont effectués de manière automatique.

6.3.1 Architecture de l'analyse coûts-bénéfice

L'analyse coûts-bénéfices a été implémentée au format MS-Excel et elle est composée de trois parties distinctes.

La première partie de l'analyse demande à l'utilisateur de renseigner différentes données de base et données techniques nécessaires aux calculs (1). Ces données concernent notamment:

- Type de combustible utilisé.
- Production escomptée d'enrobés tièdes.
- Type de recette (fractions granulométriques).
- Diverses informations relatives à l'installation telles que le débit d'air, le rendement du brûleur, etc.

- La consommation énergétique totale de l'installation.
- Des informations sur les prêts et les conditions bancaires.
- Le prix des additifs et autres produits.

Dans la seconde partie, différentes informations sont données à titre indicatif. Cela concerne:

- Les coûts des modifications de centrale (2).
- Les coûts des additifs et leur dosage (3).
- Une explication relative aux modifications de centrale en fonction de la technologie de production des enrobés tièdes (4).

La dernière partie concerne le cœur de l'étude ACB. L'utilisateur doit alors insérer les différents coûts de modifications de centrale qu'il connaît en fonction son équipement actuel (5). Une fois toutes les données renseignées, les annuités sont calculées de même que les bénéfices liés à l'économie d'énergie, les économies liée à la taxe CO₂ et les économies d'énergie liées au changement de source énergétique du brûleur. Cette partie donne également le temps de retour sur investissement (6) afin de fournir une information relative à la viabilité du projet. Le calcul du temps de retour sur investissement consiste à mettre en balance les annuités et les coûts des additifs en fonction des différents bénéfices considérés.

Analyse coût bénéfice (CBA) dans la production d'enrobé tièdes

A remplir ou à choisir par l'utilisateur

Paramètre de base à introduire

Combustible du brûleur du tambour sécheur (ventilateur) : Fioul	
Données de production à introduire	
Production actuelle	[t] 10000.00
Production de WMA économisée	[t] 10000.00
Fraction granulométrique - filler	[%] 7.40
Fraction granulométrique - Sables (0/2)	[%] 40.00
Fraction granulométrique - granulats (2/22)	[%] 53.00
Pourcentage massique du liant	[%] 5.50

Données de Technique à introduire

Coût d'air dans le tambour sécheur	[€/tN] 80000.00
Rendement du brûleur	[%] 77.00
Consommation énergétique actuelle (tambour sécheur)	[MWh] 11000000.00
Différence de température de production entre WMA et Fioul	[°C] 40.00
Température de séchage pour les enrobés à chaud	[°C] 180.00
Capacité de production	[t/h] 200

Autres données à introduire

Taux exonéré de la taxe CO ₂	[t] 0.00
Taxe CO ₂	[€/tN en CO ₂] 60.00
Taux de prêt sans cautionnement	[%] 5.00
Taux de prêt avec cautionnement	[valeur] 2.00
Taux de prêt cautionner	[%] 60.00
Montant de remboursement du prêt	[€] 20.00
Prix du combustible	[CHF/t] 0.85
Prix des additifs 1	[CHF/t] 5.00
Prix des additifs 2	[CHF/t]
Prix des additifs 3	[CHF/t]
Prix des additifs 4	[CHF/t]

Analyse des coûts et des bénéfices et calcul du rendement

Coûts

Technologie choisie pour la production de WMA	Résumé des coûts
Modification à apporter	
Installation d'un nouveau brûleur	[CHF] 100000.00
Installation d'une unité de moussage	[CHF] 120000.00
	[CHF]
	[CHF]
	[CHF]
	[CHF]
	[CHF]
	[CHF]
Recouvrement au gaz	[CHF] 200000.00
Total	[CHF] 420000.00
Charges de l'investissement	
Montant de l'annuité	[CHF (an)] 30783.25
Ajout de produits divers (additifs, depens...)	
Depens	[CHF] 10000.00
	[CHF] 0.00
	[CHF] 0.00
	[CHF] 0.00
	[CHF]
Total	[CHF/t] 10000.00

Bénéfices

Economie d'énergie	
Economie de combustible réalisée	[CHF] 12556.93
	0
Exonération de la taxe CO ₂	[CHF] 0.00
Economies liées à l'exonération de la taxe CO ₂	[CHF] 0.00
Total	[CHF] 12556.93
Changement de source d'énergie du brûleur	
Changement du fioul pour du gaz naturel	[CHF] 79134.87
Total	[CHF] 79134.87

Rapport coûts-bénéfices

Rendement sans le changement de source d'énergie du brûleur	[t]
Rendement de l'investissement	[t] 3.25
Rendement avec le changement de source d'énergie du brûleur	[t] 0.46
Rendement de l'investissement	[t] 0.46

0-1 = bénéfice
1-2 = ni bénéfice ni perte
2-3 = perte

Données divers

Principe de base de la technologie tièdes choisie

Injection d'eau dans la ligne de bitume par l'intermédiaire d'une unité de moussage juste avant le malaxeur. Il est également possible d'incorporer des doses dans le mélange

Liste de prix - modification de centrale

Installation d'un nouveau brûleur	[CHF] 100000.00
Installation d'une nouvelle ligne de bitume	[CHF] 150000.00
Installation d'une unité de moussage	[CHF] 120000.00
Installation d'une ligne de bitum. froide	[CHF] 200000.00
Installation d'un site et d'un dosage pour additifs solide	[CHF] 40000.00
Installation d'un site et d'un dosage pour additifs liquide	[CHF] 40000.00
Modification du programme de malaxage	[CHF] 10000.00
Installation d'un dispositif d'arrosage du sable avant le malaxeur	[CHF] 10000.00

Liste de prix - additifs chimique

Produit	Prix	Dosage
Zéolite	[CHF/kg] 5.15	0.3
Greenneal	[CHF/kg] 4.65	1
Dopex C-6000 RT	[CHF/kg] 4.15	0.4
Sasolwax	[CHF/kg] 3.35	5
	[CHF/kg]	
	[CHF/kg]	
	[CHF/kg]	
	[CHF/kg]	
	[CHF/kg]	

Source : - Alimex Group
Source : - Alimex

Fig. 45 Vue de base de l'analyse coûts-bénéfices

Un résumé de la situation sous forme graphique est finalement fourni à l'utilisateur. Ce résumé est composé de deux courbes représentant les coûts et les bénéfices ainsi que le temps de retour sur investissement.

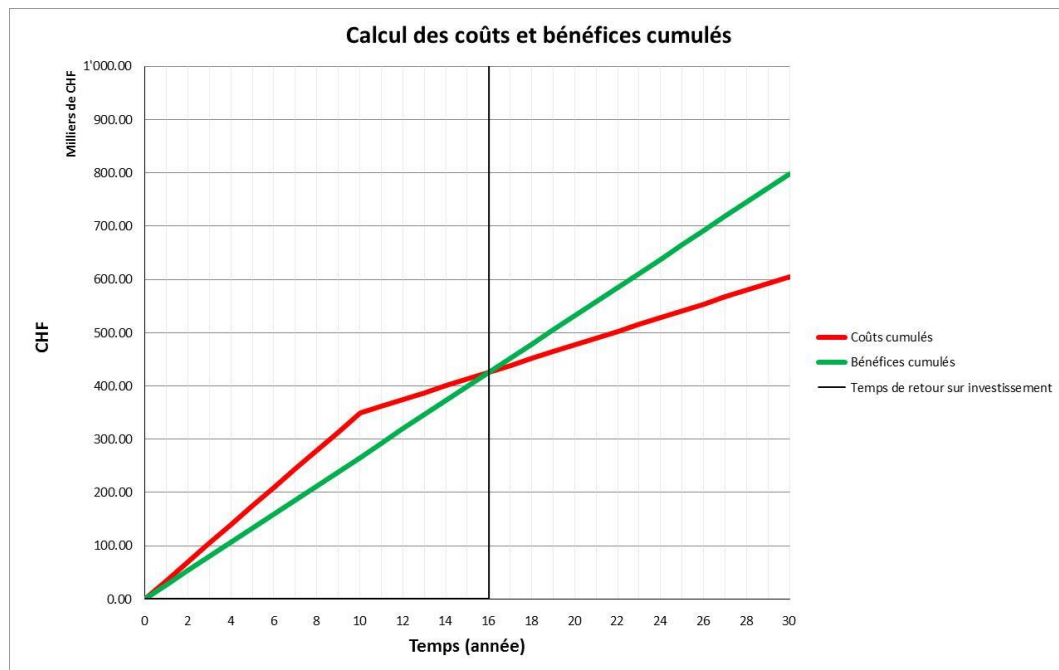


Fig. 46 Analyse coûts-bénéfices: Exemple de résultat

Dans une ultime section, l'ensemble des informations relatives aux calculs des économies d'énergie et différentes variables sont résumées. Les formules utilisées dans le cadre de ces calculs sont également rendues accessibles à l'utilisateur.

6.3.2 Calculs économiques: Informations complémentaires

Le calcul des annuités d'un prêt se base sur le montant total du prêt. Il est possible de tenir compte des fonds propres dans cette analyse qui viendront en diminution du crédit à demander pour transformer les installations de la centrale. Il est également possible de faire varier la durée du prêt et les taux d'intérêt de celui-ci. Le cautionnement d'une partie du prêt par la baisse du taux d'intérêt sur cette partie est également intégré dans les possibilités d'analyses.

Le calcul des coûts des additifs se fait en fonction du tonnage annuel et du dosage de cet additif.

Le calcul des économies d'énergie se base les éléments théoriques discutés au chapitre 5 et sur le coût des différentes énergies.

Le calcul de l'exonération de la taxe CO₂ se fait en fonction la consommation d'énergie total de la centrale et en fonction des paramètres décrit dans la loi et l'ordonnance sur le CO₂ [1, 3].

Pour ce qui est du changement de source d'énergie du brûleur (par ex. passage du fioul au gaz naturel), les coûts du raccordement éventuel sont à intégrer directement dans la partie coûts de modification de l'installation et le calcul du bénéfice se fait en fonction des différents taux de rendement et des coûts des carburants utilisés.

6.4 Exemples d'analyses coûts-bénéfices

6.4.1 Exemple 1

Dans un premier temps, nous pouvons relever que les calculs théoriques d'économie d'énergie indiquent globalement une baisse de 20% de la consommation énergétique lors de production d'enrobé tièdes par rapport aux enrobés à chaud. L'économie brute d'énergie réalisée lors de production des enrobés tièdes est donc d'environ 1.70 CHF

/tonne pour le gaz naturel et de 1.89 CHF/tonne pour le fioul (état: mai 2015) pour une différence de température de production des agrégats vierges entre les HMA et les WMA de 40°C.

Ce premier exemple concerne une centrale d'enrobage fonctionnant au fioul dont le gestionnaire est intéressé à produire des enrobés tièdes avec moussage du bitume pour bénéficier d'une exonération de la taxe CO₂. Les modifications prévues sur l'installation sont la mise en place d'une unité de moussage et d'un silo/doseur pour additif liquide pour un montant de 165'000.- CHF. Cette unité de moussage permet de réduire la température de production des enrobés tièdes de 40°C. Le gestionnaire réfléchit en outre à changer de source d'énergie du brûleur afin de passer au gaz naturel pour 105'000 CHF. Les conditions de départ sont les suivantes :

• Production d'enrobé tièdes escomptée :	17'500 [t] soit 25% de la production
• Consommation énergétique totale :	5'000'000 [kWh]
• Cautionnement du prêt :	0%
• Taux d'intérêt :	2.25%
• Durée du prêt :	10 ans
• Coût des investissements	270'000 [CHF]
• Fond propre :	20% soit 54'000 [CHF]
• Coûts du dope pour enrobés tièdes :	1.09 [CHF/tonne]

L'analyse aboutit aux résultats suivants :

Coûts de l'annuité :	24'360 [CHF/année]
Coûts pour les additifs :	<u>19'075 [CHF/année]</u>
	43'435 [CHF/année]

Economie d'énergie :	33'090.00 [CHF/année]
Exonération de la taxe CO ₂ :	54'150.00 [CHF/année]
Changement de source d'énergie du brûleur :	<u>36'690.00 [CHF/année]</u>
	123'930.00 [CHF/année]

Le temps de retour sur investissement est ici immédiat ce qui fait que l'entreprise dégage rapidement un bénéfice. Si l'on regarde uniquement l'économie d'énergie, cet investissement est rentable dès la 17^{ème} année.

6.4.2 Exemple 2

Ce second exemple se base sur une centrale fonctionnant au gaz naturel dont le gestionnaire est intéressé à produire un enrobé à base de cire pour ses clients et également afin d'être exonéré de la taxe CO₂. Les modifications prévues sur l'installation sont la mise en place d'une d'un silo/doseur pour additif liquide pour un montant de 60'000 CHF. De plus, le gestionnaire souhaite changer son brûleur afin qu'il puisse être adapté à plusieurs gammes de puissance. Les conditions de départ sont :

• Production d'enrobé tièdes escomptée :	35'000 [t] soit 50% de la production
• Consommation énergétique totale :	5'000'000 [kWh]
• Cautionnement du prêt :	50%
• Taux d'intérêt :	2.25% et 2.15%
• Durée du prêt :	10 ans
• Coûts des investissements :	165'000 [CHF]
• Fond propre :	20% soit 33'000 [CHF]
• Prix de la cire :	3.71 [CHF/tonne]

L'analyse indique les résultats suivants :

Coûts de l'annuité :	14'850 [CHF/année]
Coûts pour les additifs :	<u>129'850 [CHF/année]</u>
	144'700 [CHF/année]

Economie d'énergie :	59'560 [CHF/année]
Exonération de la taxe CO ₂ :	<u>50'240 [CHF/année]</u>
	109'8000 [CHF/année]

Cet investissement n'est *a priori* pas rentable du fait du prix élevé de la cire utilisée. En faisant l'hypothèse que le prix de cet additif peut être divisé par deux, le temps de retour sur l'investissement serait alors immédiat ce qui rend cet investissement potentiellement intéressant. En revanche, si l'on regarde uniquement les économies d'énergie, cet investissement devient tout juste intéressant que si le prix de l'additif baisse de 60%.

7 Conclusions et recommandations

Le projet de recherche PLANET RS-1 a pour objectif d'évaluer l'impact sur les centrales d'enrobage de la production d'enrobés tièdes, ceci avec la prise en compte particulière du contexte suisse. L'étude a été réalisée selon différentes phases que nous pouvons résumer ainsi:

- Analyse de la littérature spécialisée relative aux postes d'enrobages et à leurs modifications ainsi qu'aux valeurs limites d'émissions aux postes (chapitre 2).
- Enquête de consommation énergétique et d'émissions auprès de différents postes d'enrobage (chapitre 3).
- Réalisation de mesures d'émissions et consommation énergétique sur trois différents postes d'enrobage, avec la comparaison entre production tiède et à chaud (chapitre 4).
- Analyse théorique de la consommation énergétique et des émissions au poste d'enrobage (chapitre 5).
- Considérations financières relatives à l'implémentation de la production d'enrobés tièdes sur un poste d'enrobage (chapitre 6).

Nous résumons ci-dessous les principales observations avant de proposer quelques considérations et perspectives futures.

7.1 Conclusions

L'enquête de consommation énergétique et d'émissions sur les postes d'enrobage amène les conclusions suivantes:

- La grande majorité des centrales ayant participé à l'enquête sont convaincues que les enrobés tièdes ont un avenir en Suisse et que ces derniers devraient être prochainement normalisés afin d'en favoriser leur utilisation. La volonté des producteurs d'enrobé à produire ce type de mélanges est manifeste.
- Les données de consommation énergétique aux postes d'enrobages sont relativement variables et une comparaison entre postes n'est que peu réaliste et représentative. Très peu de données comparatives entre enrobés tièdes et enrobés à chaud ont pu être obtenues.
- Passablement de producteurs d'enrobés sont équipés pour la production d'enrobés tièdes, mais les tonnages restent très (trop) faibles. Cependant, le degré d'équipement en constante augmentation traduit bien l'intérêt de la profession pour ces enrobés.
- De manière générale, l'utilisation d'une centrale à gaz peut être recommandée comparativement à une centrale à mazout. Le processus de combustion va en effet générer des émissions moins importantes pour un poste d'enrobage alimenté au GPL. De plus, une alimentation à gaz permet de "garantir" une alimentation énergétique continue, sans nécessité de livraison de fioul par un transporteur. Cette problématique est généralement bien prise en compte par les producteurs.

La réalisation de campagnes de mesures d'émissions et consommation énergétique permet de faire les commentaires suivants:

- Les résultats des mesures sont propres aux centrales étudiées et dépendent de nombreux facteurs parmi lesquels la source d'énergie utilisée ainsi que la configuration et le réglage de la centrale (brûleur, tambour, filtres,).
- De manière globale, la production d'enrobés tièdes permet systématiquement de diminuer la consommation énergétique au poste d'enrobage. Des gains énergétiques substantiels ont été mesurés sur les différents postes d'enrobage, ces gains étant de 27% (centrale B) ou 28% (centrales A et C) selon les postes. Les gains énergétiques mesurés représentent approximativement 2 l de fioul par tonne d'enrobé produite.
- Les tendances observées pour les mesures d'émissions varient selon les postes d'enrobage, la recette (avec/sans RAP) et le régime de production. Nous pouvons

observer que dans le cas de production d'enrobés tièdes, une baisse du rendement du brûleur peut être nécessaire afin de diminuer les températures. Dans le cas où le rendement est abaissé et que le processus de combustion ne s'effectue plus de manière optimale, alors la concentration de certaines émissions sera plus élevée ceci malgré la diminution de consommation énergétique. Ainsi, des augmentations de monoxyde de carbone ont par exemple été mesurées. Les mesures d'émission apparaissent également comme très volatiles, ceci principalement pour les COT, mais l'on peut remarquer que plus le rendement du brûleur baisse plus ces émissions sont alors élevées.

- L'ajout de matériau recyclé (fraisat d'enrobé) a également un impact substantiel sur la concentration des émissions mesurées. De manière générale, la production d'enrobé avec RAP a engendré lors des mesures une augmentation des émissions (par ex. CO, COT) et des composants additionnels devront également être surveillés (par ex. SO₂).

Outre l'impact sur la consommation énergétique et les émissions, d'autres impacts peuvent être liés à la production d'enrobés tièdes. De manière non exhaustive, nous pouvons citer les éléments suivants:

- Impact sur la cadence et séquence de production (par ex. modification de la séquence d'enrobage, augmentation de la durée de malaxage).
- Passage d'une recette à une autre, organisation de la production journalière.
- En raison du vieillissement plus faible du liant d'un enrobé tiède, une teneur en RAP plus élevée peut potentiellement être ajoutée comparativement à un mélange à chaud.
- Risques de cloquage et colmatage des filtres en raison de la diminution de la température des fumées (en moyenne 70°C).
- Selon l'installation tiède choisie (par exemple unité de moussage), un nettoyage et entretien régulier du matériel doit être prévu (par ex. nettoyage des buses dans le cas où ce processus n'est pas automatisé par l'unité de moussage).

La rentabilité économique liée à l'installation des technologies tièdes est très difficilement mesurable du fait que cela dépend d'un nombre important de paramètres tels que les coûts d'investissements, le prix des énergies, le tonnage,... En revanche, cette étude fournit des bases de réflexions pour les gestionnaires. La réalisation d'une analyse coûts-bénéfices permet de mettre en évidence les éléments suivants:

- De manière générale les enrobés tièdes vont s'avérer, dans une première phase, légèrement plus chers à la production qu'un enrobé à chaud. Les économies sur le fioul ou le gaz naturel que l'on peut estimer à environ 1.70 – 1.89 CHF/t ne permettent pas de compenser de manière immédiate les dépenses supplémentaires liées à l'ajout d'additifs par exemple. Cependant, avec la multiplicité des procédés devant engendrer la baisse de leurs coûts associés, cet équilibre pourrait dans le futur basculer favorablement aux technologies tièdes. L'apport de matériaux de recyclage et le recours à des technologies semi-tièdes devraient permettre de déplacer davantage encore cet équilibre en faveur des enrobés tièdes.
- La possible exonération de la taxe CO₂ est clairement un argument incitateur dans la volonté de produire des enrobés tièdes. Les calculs réalisés indiquent que cette exonération peut globalement représenter un montant équivalent à ceux liés à la diminution de consommation énergétique.
- La modification de source d'approvisionnement énergétique pour le brûleur peut contribuer de manière substantielle à un bilan économique global favorable; le gaz pouvant être recommandé lorsque disponible.

De manière réaliste et selon l'expérience de producteurs, un bilan équilibré entre investissements et économies semble réalisable lors de la production d'enrobés tièdes.

L'implémentation de la production d'enrobés tièdes à un poste d'enrobage comporte différentes étapes clefs que nous pourrions résumer ainsi:

- Dans un premier temps, les buts et attentes relatives à la production d'enrobés tièdes doivent être clairement définis et formulés (économie d'énergie et financière, stratégie

- de développement économique, marketing, santé des ouvriers, ...). Un horizon d'analyse (seuil de rentabilité) doit également être défini.
- La technologie la plus adaptée à son installation doit être choisie, ceci notamment en fonction de l'état existant (lignes à bitume, ligne RAP, place,...), de la production prévue, des risques considérés (encrassement des buses, condensation des fumées),... Il n'y a pas de solution optimale transposable à l'ensemble des postes d'enrobage. Par exemple, l'utilisation d'additifs permet de limiter les modifications au poste tout en autorisant une modification de l'additif (*i.e.* fournisseur) sans frais additionnels. Ces ajouts ont cependant un prix qui peut, selon les cas, être prohibitif. Une autre méthode consiste à utiliser une unité de moussage qui ne nécessitera *a priori* aucun additif spécifique mais pour laquelle le processus de fabrication au poste d'enrobage devra être modifié et les investissements initiaux plus conséquents.
 - Procéder à une réflexion globale d'optimisation de la centrale afin de ne pas perdre les gains engendrés par la production tiède. Sans une réflexion globale au niveau du poste d'enrobage, les gains énergétiques (par exemple) liés à la production d'enrobés tièdes, peuvent très vite être annihilés par des pertes diverses issues par exemple de granulats mal séchés.
 - Un plan de financement doit être mis en place, ce plan de financement devant également prévoir une phase de test et optimisation des enrobés pouvant alors servir de démonstration des compétences auprès de partenaires potentiels.

En conclusion, la production d'enrobés tièdes en centrale d'enrobage est assurément une méthode permettant de contribuer de manière substantielle à la diminution de consommation énergétique. Une diminution notable des émissions nécessite notamment l'étude du processus complet au poste d'enrobage, ceci afin d'optimiser le processus de combustion. Considérant les particularités relatives au marché suisse des enrobés (nombre de recettes, types de postes, tonnages, etc), la production d'enrobés tièdes pour un poste d'enrobage peut très vite s'avérer rentable financièrement. Cet apport financier essentiel est également à mettre en parallèle avec l'image véhiculée lors de la production d'enrobés à faibles impacts énergétiques et écologiques. Tout comme l'ajout de matériaux recyclés, les enrobés tièdes présentent assurément une technique du futur qui doit être davantage implémentée en Suisse ceci en raison des multiples bénéfices qu'elle peut apporter. Les exemples d'analyses coûts-bénéfices tendent par ailleurs à indiquer que l'investissement dans la production d'enrobés tièdes peut relativement rapidement s'avérer rentable. Il est finalement rare que le domaine de la construction routière propose des innovations aussi importantes et permettant de contribuer de manière substantielle au souci global de développement durable; ces efforts doivent donc être poursuivis.

7.2 Recommandations et perspectives de recherche

Différentes recommandations et perspectives de recherche peuvent être envisagées sur la base des résultats du présent projet. Nous pouvons citer les éléments suivants:

- Favoriser la production des enrobés tièdes, par la publication de guides techniques et l'organisation de conférences/informations permettant de mieux informer l'ensemble des acteurs du domaine. La mise en place d'un outil global d'aide à la décision dans le cadre de la recherche RS-5 du projet PLANET doit également contribuer à étayer le processus de décision tant des fournisseurs d'enrobés que des décideurs.
- Les procédures de contrôle ainsi que les valeurs limites méritent une réflexion approfondie. Dans un premier temps, les différentes valeurs limites doivent être harmonisées et clarifiées, mais les conditions de production (recette notamment) lors de la réalisation des mesures doivent être clairement renseignées. La présente étude a démontré que les émissions pour un même poste d'enrobage peuvent sensiblement varier selon la recette et le type d'enrobé (tiède, chaud). Les valeurs limites d'émissions fixées doivent également pouvoir correspondre à ce qui peut être légitimement attendu compte tenu des postes d'enrobage suisses. L'expérience d'autres pays européens peut constituer une base de réflexion pertinente.
- Comme mentionné précédemment, la fabrication d'enrobés tièdes ne fera du sens que si le processus unitaire de la centrale dans son entier est optimisé. Ainsi,

différents axes en vue d'une optimisation énergétique et environnementale des postes d'enrobage peuvent être identifiés. Nous pouvons citer:

- Travaux dans le domaine des brûleurs à différentes capacités, ceci afin d'optimiser le processus de combustion dans différentes gammes de températures.
- Diminuer la teneur en eau des granulats, ceci tout particulièrement pour les fractions fines (filler, sable 0/2, 2/4).
- Optimisation de l'isolation d'éléments clefs du poste d'enrobage et utilisation de conduites calorifugées.
- Adapter le dimensionnement de la centrale à la production prévue ainsi qu'aux conditions atmosphérique de la région à laquelle elle est destinée (humidité de l'air par exemple). Par ailleurs, le dimensionnement de tout nouveau poste d'enrobage devra prendre en compte le recours à des enrobés tièdes et l'ajout de fraisat d'enrobé (à chaud)
- Réutilisation de la chaleur perdue dans la cheminée, quoique moins intéressante dans le cas de productions tièdes (température plus faible des gaz).
- Utilisation de panneaux solaires.
- Mise en place d'un système de monitoring et contrôle de l'installation.
- Diminution des pertes diverses (pertes structurelles).

Annexes

I	Questionnaire distribué	93
II	Liste de prix (AMMANN)	101

I Questionnaire distribué

PLANET – Enquête centrales d'enrobage

Janvier 2014

ENQUETE RELATIVE A LA CONSOMMATION D'ENERGIE ET AUX EMISSIONS EN CENTRALE D'ENROBAGE

Ce questionnaire est mené dans le cadre du projet PLANET (Potentiel et Analyse des Enrobés Tièdes), financé par le fond pour la recherche routière (VSS/OFROU). Le but du projet consiste à réaliser une analyse détaillée des enrobés tièdes afin de définir des recommandations pour une utilisation efficiente de ces enrobés dans le contexte Suisse. Nous adoptons les définitions suivantes dans le cadre de ce questionnaire :

- Enrobé à chaud : Enrobé bitumineux dont la température de production se situe à environ 160 °C (SN 640 431-1b-NA)
- Enrobé tiède : Enrobé bitumineux dont la température de production se situe entre 90 °C et 140 °C

Les informations que vous fournissez vont permettre de mieux évaluer le parc des centrales suisses et plus spécifiquement l'expérience à ce jour avec la production d'enrobés tièdes.

Nous garantissons la confidentialité des données.

Merci de bien vouloir compléter le questionnaire ci-joint et nous le renvoyer d'ici au 31.03.2014 par fax, email ou courrier postal. N'hésitez pas à nous contacter en cas de question ou remarque.

Nicolas Bueche (resp. de projet)
Laboratoire des Voies de circulation (LAVOC)
EPFL-ENAC-IIC-LAVOC
Station 18
1015 Lausanne

nicolas.bueche@epfl.ch
Tel: +4179/602.16.32
Fax: +4121/693.63.49

Bastien Schobinger (ass. scientifique)
Laboratoire des Voies de circulation (LAVOC)
EPFL-ENAC-IIC-LAVOC
Station 18
1015 Lausanne

bastien.schobinger@epfl.ch
Tel: +4121/693.06.03
Fax: +4121/693.63.49

Informations générales

Nom de la centrale :

Localisation de la centrale :

Exploitant (société) :

Personne de contact

Nom, Prénom :

Fonction :

Téléphone :

Email :

Informations sur la centrale

Type de centrale (modèle) : ☐ Continue ☐ Discontinue

Capacité nominale de la centrale [t/h] :

Année de construction :

Nombre de cuves à bitume :

Puissance nominal du brûleur¹ [MW]:

Source d'énergie du brûleur ☐ Fioul ☐ Gaz naturel

Pose des enrobes bitumineux produits:

☐ Par votre propre compagnie

☐ Par d'autres compagnies

Production et matériaux

Enrobés fabriqués actuellement

Enrobé chaud : ☐ OUI ☐ NON

Enrobé tiède : ☐ OUI ☐ NON

Autre : ☐ OUI ☐ NON

Utilisation de matériaux recyclés dans

Enrobé chaud : ☐ OUI ☐ NON

☐ Ajout du fraisat à chaud

☐ Ajout du fraisat à froid

Enrobé tiède : ☐ OUI ☐ NON

☐ Ajout fraisat à chaud

☐ Ajout fraisat à froid

Nombre approximatif de recettes (formules) produites

Enrobé chaud :

Enrobé tiède :

Autre :

¹ Si 2 ou plusieurs brûleurs sont installés, veuillez donner chaque puissance nominale séparément

PLANET – Enquête centrales d'enrobage

Janvier 2014

Production annuelle (en tonnes)

	2013	2012	2011	2010
Enrobé à chaud				
Enrobé tiède				
.....				

Années antérieures (si possible) :

.....

Production d'enrobés tièdes (si applicable)

Année de début de production d'enrobé tièdes :

Motivations pour produire des enrobés tièdes :

- ☐ Considérations économiques
- ☐ Considérations écologiques
- ☐ Demande des clients
- ☐ Stratégie de développement de la société
- ☐ Autre :

Technologies utilisées en pourcent du tonnage d'enrobé produit en 2013 :

- ☐% Moussage du bitume (injection d'eau, un seul bitume)
- ☐% Moussage du bitume (injection d'eau, deux bitumes)
- ☐% Moussage du bitume (zéolithe)
- ☐% Ajout de cire - Type : Dosage : [% M. du liant]
- ☐% Additif chimique - Type : Dosage : [% M. du liant]
- ☐% Autre - Type : Dosage : [% M. du liant]

Avez-vous changé de technologies de fabrication des enrobés tièdes par rapport aux années précédentes ? Si oui veuillez spécifier les changements :

.....

.....

.....

PLANET – Enquête centrales d'enrobage

Janvier 2014

Critères de choix pour la technologie d'enrobé tiède principale :

- ☐ Expérience partenaire/actionnaire
- ☐ Etudes mandatée à l'extérieur
- ☐ Recommandation du fabricant de la centrale / fournisseur d'équipement
- ☐ Recommandation des fournisseurs (matériaux / additifs)
- ☐ Evaluation des coûts d'investissements
- ☐ Comparaison des gains énergétiques potentiels
- ☐ Importance du potentiel de réduction des émissions (et taxe CO₂)
- ☐ Autre :

Modifications/adaptations faites à la centrale pour la production d'enrobé tiède :

- ☐ Aucune modification
- ☐ Adaptation du brûleur
- ☐ Insertion d'une unité de moussage (injection d'eau)
- ☐ Ajout d'une unité de stockage (bitume, additif, poudre ...)
- ☐ Ajout d'une ligne à bitume
- ☐ Doseur volumétrique / pompe
- ☐ Modification du malaxeur
- ☐ Modification du filtre
- ☐ Autre :

Page 4 sur 8

PLANET – Enquête centrales d'enrobage

Janvier 2014

Proportion approximative des enrobés fabriqués (si vous le souhaitez, vous pouvez nous transmettre les données brutes) :

	2013		2012		2011		2010	
	Chaud [%]	Tiède [%]	Chaud [%]	Tiède [%]	Chaud [%]	Tiède [%]	Chaud [%]	Tiède [%]
Couche de roulement								
Couche de liaison								
Couche de base								
Couche de fondation								
Autre :								

Note:

Couche de roulement selon normes suisses: AC, AC MR

Couche de liaison selon normes suisses: AC B

Couche de base selon normes suisses: AC T, AC EME

Couche de fondation selon normes suisses: AC F

Sur une échelle allant de 1 à 6 (6 représentant la meilleure note et 4 la limite de suffisance), comment évaluez-vous votre expérience à ce jour avec les enrobés tièdes :

Désavantages ou difficultés observées :

.....

Avantages ou bénéfices observés :

.....

PLANET – Enquête centrales d'enrobage

Janvier 2014

Acceptation auprès des clients :

.....

.....

.....

Eventuelles perspectives de développement selon votre expérience :

.....

.....

.....

Consommation d'énergie

Sources d'énergie utilisée et composant concernés (mettre une croix) :

	Séchage et mise en température des granulats (brûleur)	Cuve de bitume	
Fioul			
Gaz naturel			
Electricité			
.....			

Consommation annuelle totale d'énergie de la centrale :

Remarque : Vous pouvez également nous fournir les données brutes que nous analyserons de manière confidentielle

	2013	2012	2011	2010
	Mois début :	Mois début :	Mois début :	Mois début :
	Mois fin :	Mois fin :	Mois fin :	Mois fin :
Fioul				
Gaz naturel				
Electricité				
.....				

Consommation annuelle d'énergie par type d'enrobé (si disponible) :

		2013	2012	2011	2010
Enrobé à chaud	Fioul				
	Gaz naturel				
	Electricité				
					
Enrobé tiède	Fioul				
	Gaz naturel				
	Electricité				
					

Méthode de relevé de la consommation énergétique

Lecture compteur : ☐ OUI ☐ NON

Mesure automatisée : ☐ OUI ☐ NON

Facturation : ☐ OUI ☐ NON

Autre :

.....

.....

Mesures d'émissions

Des mesures d'émissions de votre centrale ont-elles été réalisées :

☐ OUI ☐ NON

Si oui, mettre une croix sous l'année :

	2013	2012	2011	2010
Enrobé à chaud				
Enrobé tiède				

PLANET – Enquête centrales d'enrobage

Janvier 2014

Objet de la mesure de ces émissions :

Exigences OPair (législation)	☐ OUI	☐ NON
Modifications de la centrale	☐ OUI	☐ NON
Recherche	☐ OUI	☐ NON
Autre :	☐ OUI	☐ NON

Quels composants ont été mesurés :

CO ₂	☐ OUI	☐ NON
CO	☐ OUI	☐ NON
NO _x	☐ OUI	☐ NON
COT	☐ OUI	☐ NON
Fumée	☐ OUI	☐ NON
PM -10	☐ OUI	☐ NON
Autres		
		

Si cela est possible, merci de nous transmettre les données brutes mesurées et/ou les rapports de test.

Remarques

Je souhaite être informé des résultats de l'enquête et de la recherche spécifique relative aux centrales d'enrobage :

☐ OUI ☐ NON

Commentaires :

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Merci de votre collaboration

Page 8 sur 8

II Liste de prix (AMMANN)

Il est rappelé que les prix indiqués sont à titre informatif / indicatif et sans garantie. En outre, les prix peuvent varier en raison des progrès techniques, des ajustements individuellement nécessaires au système actuel réel et/ou l'évolution du marché.

Systeme

AMMANN

Research project VSS PLANET

Tender PLANET RS-1 Prices

Questionnaire June 2013		Sales price in CHF		Remarks
1 Burner	Monoblock	40'000	to 50'000	Price for burner only
1.1 Capacity MW	3.7 to 23.7			MIB-302 (3.7 MW) MIB-351 (4.8 MW) MIB-352 (5.5 MW) MIB-353 (6.5 MW) MIB-401 (7.35 MW) MIB-451 (9.7 MW) MIB-452 (12 MW) MIB-453 (13.9 MW) MIB-501 (15 MW) MIB-601 (20 MW) MIB-603 (23.7 MW)
1.2 Example	Natural gas	105'000		MIB-453; price for whole seporified package
Combustible	13.9			
Capacity MW				
Including:	Casing, Blower for burner air, Silencer Gas control and safety train Electrical equipment and cables Integration into the plant control system Electrical and mechanical assembly			
2 Bitumen supply	80	120'000	to 150'000	Tanks incl. ladder and access platform
Tank Content m³	Electrical			
Heating:	Rock wool 300mm incl. cover plate made of stainless steel			
Insulation:	Fill line excl. filling pump			
Including:	Ventilation line, stainless steel, partially insulated Conveying line NW80 incl. dosing pump 15kW, insulated Electrical equipment and cables Integration into the plant control system Electrical and mechanical assembly			
3 Cold recycling addition	into mixer up to 25% @ 3% moisture	150'000	to 200'000	excl. hopper, excl. belt elevator
Addition:	Buffer silo with dosing belt			
Including:	Belt scale and chute into the mixer Steam extraction ducting from mixing tower to dust collection unit Electrical equipment and cables Integration into the plant control system Electrical and mechanical assembly			
4 Ammann foam bitumen system	Bitumen scale discharge pump device	90'000	to 120'000	
Including:	Discharge pump Static mixer with injection ramp into the mixer Water tank and pump incl. piping Electrical equipment and cables Integration into the plant control system Electrical and mechanical assembly			
5 Additive addition unit	Adding device for fibrous granulates	50'000	to 60'000	
Addition:	Storage silo for Big Bags			
Including:	Pneumatic conveyor device Adding device for fibrous granulates with scale Electrical equipment and cables Integration into the plant control system Electrical and mechanical assembly			
5.2 Addition:	Adding device for liquid additives	35'000	to 45'000	
Including:	Tank capacity: 500 lt., electrically heated, insulated Discharge line, pump, conveying line, heated, insulated Counter, addition into bitumen scale Electrical equipment and cables Integration into the plant control system Electrical and mechanical assembly			

130621_PLANET RS-1_Preise GBS_BI_EN_xlsx

05.07.2013

Glossaire

Terme	Signification
AC	Enrobé bitumineux dense (AC)
AC T	Bétons bitumineux pour couche de base (AC T)
AC MR	Bétons bitumineux macrorugueux (AC MR)
ACB	Analyse coûts-bénéfices (ACB)
AEnEC	Agence de l'énergie pour l'économie
CMA	Cold mix asphalt (CMA)
CO	Monoxyde de carbone (CO)
CO ₂	Dioxyde de carbone, gaz carbonique (CO ₂)
COT	carbone organique total (COT)
EAPA	European Asphalt Pavement Association
EPFL	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
ETHZ	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ)
GPL ou LPG	Gaz de pétrole liquéfié (GPL)
HMA	Hot mix asphalt (HMA)
kWh	Kilowatt heure (kWh)
KJ	Kilojoule (KJ)
LAVOC	Laboratoire des voies de circulation (LAVOC)
LTA	Low temperature asphalt (LTA)
MJ	Mégajoule (MJ)
NO _x	Oxydes d'azote (NO _x)
NTA	Niedertemperaturasphalt (NTA)
O ₂	(Di)oxygène (O ₂)
OFEV	Office fédéral de l'environnement (OFEV)
OFROU	Office fédéral des routes (OFROU)
OPair	Ordonnance pour la protection de l'aie
PLANET	Potentiel et analyse des enrobés tièdes (PLANET)
RA BL	Rendement du brûleur du sécheur des granulats recyclés (RA BL)
RA FR	Débit de granulats recyclés (RA FR)
RA MT	Température des granulats recyclés (RA MT)
RAP	Enrobé recyclé fraisé (RAP)
REF	Enrobé de référence (RAF)
RPLP	Redevance poids lourds liée aux prestations (RPLP)
RS	Recherche spécifique (RS)
SMI	Schweizerische Mischgut-Industrie, Industrie suisse des enrobés bitumineux (SMI)
SO ₂	Dioxyde de soufre (SO ₂)
TSE	Tambour sécheur enrobeur (TSE)
TM	Tour de malaxage (TM)
USIRF	Union des Syndicats de l'Industrie Routière Française (USIRF)
VA BL	Rendement du brûleur du sécheur des granulats vierges (VA BL)

VA MT	Température des granulats vierges (VA MT)
VA MT	Température des granulats vierges (VA MT)
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)
WMA	Warm mix asphalt (WMA)

Bibliographie

Lois fédérales

- [1] Confédération suisse (2011), « **Loi fédérale sur la réduction des émissions de CO₂** », RS 641.71 www.admin.ch.

Ordonnances

- [2] Confédération suisse (2016), « **Ordonnance sur la protection de l'air (OPair)** », RS 814.318.142.1, www.admin.ch.
- [3] Confédération suisse (2012), « **Ordonnance sur la réduction des émissions de CO₂** », www.admin.ch.

Documentation

- [4] AMMANN (2012), « **Postes d'enrobage - Hypermobiles, transférables et stationnaires** ».
- [5] Aurilio V. (2009), « **Meeting difficult hot mix asphalt challenges with warm mix asphalt solutions** », *Transport Association of Canada*, Ottawa.
- [6] Béghin A., Salvatge C. et Jakubowski M. (2012), « **Assessment of trials of ETIMAR warm mix asphalt** », *RGRA N°902*, p.40.
- [7] Beuving E. « **Status report warm asphalt mixtures** », *EAPA*.
- [8] Bitume Québec (2013), « **Guide de bonnes pratiques environnementales pour les centrales d'enrobage** ».
- [9] Brosseaud Y.(2008), « **Ecologiques, sécuritaires, confortables, les enrobés de demain se feront autrement - Présentation des enrobés tièdes** », *LCPC*.
- [10] Bueche N. (2011), « **Evaluation des performances et des impacts des enrobés bitumineux tièdes** », *Thèse de doctorat, (EPFL)*.
- [11] Carboneau X., Henrat J. P. and Létaudin F. (2008), « **Environmentally friendly energy saving mixes** », *Colas France*.
- [12] Carter A. (2010), « **Les enrobés tièdes et semi-tièdes** », *Ecole de technologie supérieur*.
- [13] EAPA, (2007), « **Environmental Guidelines on Best Available Techniques (BAT) for the Production of Asphalt Paving Mixe** ». *European Asphalt Pavement Association EAP*, Brussels.
- [14] Forfylyow, R. W. B., Middleton, B. (2008), « **Experiences with warm mix asphalt – A contractor perspective** », *Columbia Bitulithic*.
- [15] Hassan M. H. (2009), « **Life-Cycle Assessment of Warm-Mix Asphalt: An Environmental and Economic Perspective** », *Paper No. 09-0506, Transportation Research Board, 88th Annual Meeting, Jan 11-15 2009, Washington, D.C.*
- [16] Kristjánssdóttir O., Muench S. T., Michael L. and Burke G. (2007), « **Assessing Potential for Warm-Mix Asphalt Technology Adoption** », *Transportation Research Record*.
- [17] Kristjánssdóttir O. (2006), « **Warm Mix Asphalt for Cold Weather Paving** », *Report No WA-RD 650.1 University of Washington*.
- [18] Lecomte M., Deygout F. and Menetti A. (2008), « **Emission and occupational exposure at lower asphalt production and laying temperature** », *no de réf. 500-015, E&E*.
- [19] Gonzalez Leon J. and Jensen P. (2012), « **Environmental aspects of warm mix asphalts produced with chemical additives** », *5th Euraspalt and Eurobitume Congress, June 13-15, Istanbul*.
- [20] Marshall R. et Fifer J. (2009), « **IEEA Technical Support - Asphalt Sector Guide - Sector Version** ». Manchester (UK).
- [21] Meunier V. et Mardsen E. (2009), « **L'analyse coût-bénéfices – Guide méthodologique, Les cahiers de la sécurité industrielle** », *Institut pour une culture de sécurité industrielle*.
- [22] Middleton, B. et Forfylyow R. W. (2009), « **An evaluation of warm mix asphalt produced with the double barrel green process** », *Transportation Research Board Annual Meeting. Washington D.C.*
- [23] Olard F. (2008), « **Enrobés à faibles impacts énergétiques et écologiques** », *Workshop EPFL-LAVOC*.
- [24] Paranhos R. (2007), « **approche multi-échelles des émissions d'un procédé d'élaboration des enrobés à chaud** », *thèse de doctorat, université de Rouen*.
- [25] Sicard D. (2007), « **réalisation à basses températures des enrobés denses et des asphaltes – Panorama des filières technologique** », *journée Technique du LAVOC, LROP*.

- [26] Strippel, H. (2001), « **Life cycle assessment of a road - A pilot study for inventory analysis** », *Swedish Environmental Research Institute (IVL)*: 96, Gothenburg (Sweden).
- [27] Strippel, H. (2000), « **Life Cycle Inventory of Asphalt Pavements** », *Swedish Environmental Research Institute (IVL)*: 84, Gothenburg (Sweden).
- [28] Treich N. (2008), « **L'analyse coût-bénéfices – 10 questions, Les cahiers de la sécurité industrielle** », *Institut pour une culture de sécurité industrielle*.
- [29] Van de Ven M. FC., Sluer B. W., Jenkins K. J. and Van den Beemt C. MA. (2012), « **New developments with half-warm foamed bitumen asphalt mixtures for sustainable and durable pavement solutions** », *Taylor & Francis*.
- [30] Ventura A. Monéron P., Jullien A., Tamagny P., Olard F. and Zavan D. (2009), « **Environmental comparison at industrial scale of hot and half-warm mix asphalt manufacturing processes** », *Transportation Research Board, 88th Annual Meeting, Jan 11-15, Washington, D.C.*
- [31] Zaubanis M. (2010), « **Warm Mix Asphalt Investigation Master thesis** », *Technical university of Denmark, Kgs.Lyngby, Denmark*.
- [32] Zaubanis M., Smirnovs J., Haritonovs V. and Jansen J. (2012), « **Calculation of asphalt production energy flow to compare warm and hot mix asphalt** », *5th Eurasphalt and Eurobitume Congress, June 13-15, Istanbul*.
- [33] Bieder A., Probst S., Biedermann A. & Demarmels A. (2012), « **Foaming of bitumen – A key process for different low temperature asphalts** », *Eurasphalt & Eurobitume Conference, Istanbul*.
- [34] Bueche, N., A.-G. Dumont, et al. (2009), « **Projet initial - Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques** ». P. V. *Office Fédéral des Routes (OFROU), EPFL-LAVOC: 122, Lausanne (Switzerland)*,
- [35] 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*.
- [36] 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.
- [37] Cholava, R. (2009), « **ECRPD Project - WP6 - Life Cycles Evaluation: 65** ».
- [38] Chappat, M. et J. Bilal (2004), « **Pavement Life Cycle Analysis of Standard Pavement Structures** », *Eurasphalt & Eurobitume Congress 2004. Vienna (Austria)*: 12.
- [39] Gonzalez, J., S. Ligier, et al. (2009). « **Warm Mix Asphalts with Chemical Additives: Properties and Advantages**», *Enviroad 2009, Warsaw (Poland)*: 11.
- [40] Romier, A., M. Audéon, et al. (2004), « **L'enrobage à basse énergie (EBE) aux performances des enrobés à chaud** », *Revue générale des routes et aéroports N°831*: 7.
- [41] Raess, E. et M. Pittet (2008), « **Réduction de la consommation d'énergie des enrobés bitumineux** », *EPFL-LAVOC: 45, Lausanne (Suisse)*.
- [42] Harder, G., Y. LeGoff, et al. (2008), « **Energy and environmental gains of warm and half-warm asphalt mix: quantitative approach** », *Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D.C.*
- [43] Pouteau B. (2015), « **Outil de calcul de la juste température d'enrobage pour l'éco-conduite des centrales** ». *Conférence JERI 2015, Lausanne*.
- [44] Bueche, N., et Dumont, A.-G. (2012), « **Energy in warm mix asphalt** », *Eurasphalt & Eurobitume Congress, Istanbul*.
- [45] Ripoll, J. O. et Farré C. M. (2008), « **Evaluation of greenhouse gas emissions from the production of hot asphalt mixtures** », *Eurasphalt & Eurobitume Congress 2008, Copenhagen (Denmark)*: 10.
- [46] Angst C., Grolairma F., Liechti J., Gaschen A. et al. (2016), « **PLANET RS-2 Energetische und ökologische Bilanz der Aufbereitung von Niedertemperatureasphalten** », *Mandat de recherche VSS-OFROU*.
- [47] Bueche N., et Dumont A.-G. (2016), « **PLANET RS-5 "Modèle global d'évaluation"** », *Mandat de recherche VSS-OFROU*.
- [48] Bueche N., et Dumont A.-G. (2016), « **PLANET RS-3 "Formulation et optimisation des performances"** », *Mandat de recherche VSS-OFROU*.
- [49] Angst C., et Bueche N. (2016), « **PLANET RS-6 "Anforderungen und Qualitätskontrolle"** ». *Mandat de recherche VSS-OFROU*.

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 2010/541
Titre du projet : Projet PLANET RS-1: Impacts sur les centrales d'enrobage
Echéance effective : Mai 2016

Textes :

Résumé des résultats du projet:

La présente recherche « RS-1 : Impacts sur les centrales d'enrobage » a pour but de fournir un bilan exhaustif au niveau de la production d'enrobés tièdes dans les postes d'enrobage, ceci en considérant l'économie d'énergie ainsi que la diminution des émissions, mais également la prise en compte des aspects financiers et autres paramètres techniques.

L'analyse exhaustive de la littérature dans le domaine a permis de récolter des informations importantes relatives à la consommation énergétique et aux émissions des postes d'enrobage. Les aspects législatifs ont également été abordés et certaines problématiques liées au contrôle et aux valeurs limites mises en évidence.

La réalisation d'une enquête relative aux enrobés tièdes auprès de différents postes a mis en évidence la volonté des producteurs à s'engager dans les technologies à faibles impacts, une large majorité des postes étant par ailleurs équipés pour la production d'enrobés tièdes (bitume-mousse et additifs principalement). Les données récoltées (17 centrales) indiquent également une consommation énergétique moyenne de 91 KWh/t, avec un écart-type de 17 KWh/t qui traduit l'influence de multiples paramètres (type de centrale, source énergétique, conditions météorologiques, recette, ...).

La réalisation de trois campagnes de mesures sur des postes d'enrobage représentatifs du parc suisse a permis d'obtenir des informations déterminantes. Les résultats mettent en évidence des gains énergétiques de près de 30% lors de la production d'enrobé tiède, ceci comparativement à un enrobé à chaud. Les mesures d'émissions fournissent des résultats intéressants parmi lesquels:

- La production d'enrobé tiède nécessite généralement de diminuer le rendement du brûleur afin de d'abaisser la température de chauffage des composants. Cela a pour conséquence une combustion imparfaite et donc des émissions plus importantes. Il peut donc arriver qu'un poste d'enrobage effectue des économies d'énergie tout en produisant davantage d'émissions.
- L'ajout de fraisât d'enrobé a un impact significatif sur les émissions; une augmentation sensible des émissions de CO, COT et SO2 étant notamment mesurée.
- D'autres paramètres ayant un impact sur la consommation énergétique et les émissions et pouvant influencer la cadence du poste d'enrobage lors de la production d'enrobés tièdes ont également été discutés.

Une analyse théorique de la consommation énergétique en centrale d'enrobage a finalement été réalisée ainsi que le développement d'un modèle d'analyse coûts-bénéfices. Les différents calculs réalisés indiquent que de manière globale les enrobés tièdes sont légèrement plus onéreux lors de leur production, comparativement à des mélanges à chaud. Ces coûts ne peuvent être immédiatement compensés par les économies en agent énergétique (01.70-1.89 CHF/t). Cependant, considérant l'exonération possible de la taxe CO2 ainsi que la multiplicité des procédés tièdes, un bilan financier équilibré lors de la production d'enrobés tièdes s'avère réaliste.



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 :

Les objectifs globaux de la recherche RS-1 ont été atteints. Cela concerne:

- Étude de la consommation énergétique et des émissions.
- Mise en évidence des modifications nécessaires au poste d'enrobage.
- Prise en compte du contexte et de l'expérience suisse dans le domaine (type de postes, cadences de production, taille du marché, ...).
- Proposition de bases scientifiques et techniques pour les acteurs de la construction routière afin de favoriser la fabrication et la bonne pratique dans le domaines des enrobés tièdes.

Déductions et recommandations :

Les recommandations principales issues du projet sont les suivantes:

- Il est nécessaire de favoriser la production d'enrobés tièdes par la publication de normes, guides techniques et recommandations diverses.
- Les procédures de contrôle des émissions au poste d'enrobage ainsi que l'établissement des valeurs limites doivent faire l'objet d'une réflexion globale prenant en compte la composition du parc suisse, les enrobés produits ainsi que les postes d'enrobage utilisés.
- La production d'enrobé tiède est assurément une piste prometteuse pour les postes d'enrobage. Il est cependant indispensable de les considérer dans le cadre d'une large réflexion relative à la consommation énergétique et aux émissions des centrales. Un potentiel important d'optimisation existe notamment au niveau des brûleurs, de la gestion des matériaux et de leur humidité ainsi que du dimensionnement des postes d'enrobage.

Publications :

- Bueche N., Beyeler H.-P. & Arn 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. Energy in warm mix asphalt. Eurasphalt & Eurobitume Congress. Istanbul (Turquie). Juin 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 :

Les différents objectifs du projet PLANET RS-1 ont été atteints. Les résultats obtenus fournissent une contribution substantielle permettant d'illustrer la problématique et les éléments déterminants relatifs à la production d'enrobés tièdes dans des postes suisses.

Les différentes mesures d'émissions et de consommation énergétique mettent clairement en évidence le défi au niveau de la gestion des émissions tout en permettant de quantifier de manière concrète les gains énergétiques élevés lors de la production d'enrobés tièdes comparativement à un mélange de référence à chaud.

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.

Plus spécifiquement, les résultats du présent projet RS-1 doivent assister dans la définition des procédures de contrôle et valeurs limites aux postes d'enrobage. Les enseignements relatifs aux postes d'enrobage constituent également une base intéressante pour un code de bonne pratique à l'attention des professionnels du domaine.

Besoin supplémentaire en matière de recherche :

- Émissions des postes d'enrobage: Procédures de contrôle et valeurs limites.
- Optimisation énergétique des postes d'enrobage et filières de valorisation des matériaux de construction (fraisât d'enrobé notamment)

Influence sur les normes :

Les résultats et réflexions issues de cette recherche peuvent fournir une contribution ponctuelle à la normalisation SN, ceci par exemple au travers de valeurs limites ou recommandations liées aux aspects énergétiques. Ce projet RS-1 doit également participer à la mise à jour de la législation relative aux émissions des postes d'enrobage (méthodes de mesure et valeurs limites).

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).