

UNE COMPARAISON DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX D'ENROBÉS À CHAUD ET TIÈDES

Agnès JULLIEN* (1), Yvan BAUDRU* (2), Philippe TAMAGNY* (3), François OLARD** (4), Daniel ZAVAN*** (5)



récent de ces enrobés à basse énergie et faibles émissions, s'est fait parallèlement en Europe et dans l'état de New York aux États-Unis [4].

Un Conseil Général (propriétaire et gestionnaire du réseau routier départemental) a contractualisé un partenariat avec le LCPC et une entreprise de Travaux Publics pour comparer, via une évaluation environnementale globale, des productions d'enrobés chauds et semi-tièdes sur des formulations équivalentes. Les données et résultats de l'étude ainsi que ses limites sont discutés en considérant différents impacts environnementaux.

ASPECTS EXPÉRIMENTAUX

La campagne expérimentale a eu lieu sur un chantier d'entretien de la couche de roulement d'une section de la RD 231, à 40 kilomètres à l'est de Paris située à 40 km environ du chantier.

Le procédé LEA® semi-tiède [5] repose sur la capacité du bitume chaud à former une mousse lorsqu'il est mis en contact avec l'humidité résiduelle des granulats à une température inférieure à 100°C, ce qui permet l'enrobage des granulats à cette température. L'expansion volumique du liant entraîne la création d'un film de liant plus épais autour des granulats, ce qui augmente sa maniabilité. En fonction de l'installation considérée, différentes séquences de séchage et d'enrobage peuvent être mises en œuvre : une partie des granulats est séchée, puis mélangée au reste des granulats, froids et humides, avant la phase de malaxage (méthode LEA® 2).

N'importe quelle centrale peut produire des enrobés LEA®. Quelques ajustements sont cependant nécessaires: les centrales doivent être équipées notamment avec un système de dosage des additifs. L'automate doit être modifié et le personnel formé. À ce jour, 40 centrales ont été équipées en Europe, aux États-Unis et en Nouvelle-Zélande. Environ 400 000 tonnes d'enrobés LEA® ont été produites sur 350 sites de chantier différents.

Les enrobés bitumineux à chaud sont considérés comme les matériaux bitumineux de référence pour la réalisation des diverses couches de chaussée de par le monde. Cependant, depuis quelques années, la question de l'impact environnemental de la fabrication des chaussées retient l'attention et a fait l'objet de différentes études, s'appuyant sur des méthodes d'analyse globales, liant analyses du cycle de vie et campagnes de mesures sur site [1, 2]. Les mesures de consommation d'énergie et d'émissions à l'air [3] réalisées il y a quelques années par le LCPC ont mis en évidence la contribution significative de la fabrication des enrobés à chaud dans l'impact environnemental global des travaux routiers. Ces résultats confirment les quelques données expérimentales disponibles dans la littérature sur la fabrication à chaud des enrobés bitumineux.

Dans ce contexte, plusieurs solutions sont proposées pour améliorer l'efficacité énergétique des procédés d'enrobage. Les enrobés fabriqués à des températures nettement inférieures à 160°C, sous la dénomination de tièdes ou semi-tièdes suivant que leur température de fabrication soit inférieure ou supérieure à 100°C, sont une des solutions proposées. Les procédés tièdes s'appuient sur des mécanismes modifiant la viscosité du bitume (cire, double enrobage, liant mou ou dur, émulsifiant), en conservant un squelette granulaire porté à une température supérieure à 100°C pour le sécher entièrement. A contrario, les procédés semi-tièdes consistent à conserver une part de l'humidité des constituants granulaires pour provoquer une émulsion ou un moussage du liant, permettant une fabrication à une température inférieure à 100°C. L'eau peut tout aussi bien être mélangée au liant préalablement à la fabrication dans le cas d'émulsions ou de mousses, ajoutée aux matériaux à température ambiante, apportée par une fraction froide et humide des matériaux granulaires, ou incorporée (chaude ou froide) lors du malaxage. Le développement

*IFSTTAR- LCPC

**EIFFAGE Travaux Publics, Recherche et Développement

***Conseil Général de Seine et Marne, DPR-DMO, (France)

A COMPARISON OF ENVIRONMENTAL IMPACTS OF HOT AND WARM MIX ASPHALT

Agnès JULLIEN* (1), Yvan BAUDRU* (2), Philippe TAMAGNY* (3), François OLARD** (4), Daniel ZAVAN*** (5)



Hot-mix asphalt is considered as a reference for common road pavement material used around the world. However, environmental issues at the road pavement scale have only recently been investigated in the international literature through global methods, such as Life Cycle Assessment (LCA) [1, 2]. A few years ago, measurements of energy and airborne emissions were performed by LCPC (French public works research laboratory) during a road testing campaign [3] and have revealed the significant contribution of hot-mix asphalt production to the global environmental loads of roadworks. These results confirmed a few experimental data provided in the literature, with reference to measurements conducted on hot asphalt mixing.

Today, many solutions are proposed in an effort to improve the energy efficiency of asphalt mixing processes. Mixes obtained at substantially lower temperatures and classified as warm or half-warm, depending on their manufacturing temperature (i.e. either above or below 100°C), are among such solutions. The warm processes use systems that act on bitumen viscosity (wax, double coating, soft binder, hard binder, foaming agent), with an aggregate skeleton of uniform

temperature maintained at over 100°C, thus making it entirely anhydrous. On the other hand, half-warm processes maintain a small amount of water so that the binder takes the form of a foam or emulsion. The water can be either introduced beforehand into the binder as a foam or emulsion, added to the materials used at ambient temperature, contributed by the portion of materials left cold and wet, or during mixing (cold or hot) with all mix components. The recent development of low-energy and low-emission asphalts, has taken place both in Europe and in the state of New York [4].

In this context, a local road network owner, an asphalt producer and research organization have developed a partnership to compare, through LCA methodology, hot and half-warm mix asphalt production and road works using the same mix designs. The study results and limitations are discussed according to several environmental impacts.

EXPERIMENTAL ASPECTS

The experimental assessment stage consisted of studying the manufacturing, paving and rolling operations for the wearing course of the RD 231 local highway in France (40 km east of Paris) located some 40 km from the plant site.

The LEA® half-warm mix process is based [5] on the capability of anhydric hot bitumen to foam/emulsify when in contact with the residual humidity of

aggregates below 100°C, thus allowing for coating at lower temperatures. The binder volume expansion leads to a thicker binder film around the aggregates and enhances mix workability. The following sequential drying and coating processes can be applied with respect to the plant set-up for LEA® Method 2 (LEA® 2). The drying stage only affects an initial portion of the aggregates, which are mixed before the coating stage with the remaining moist portion.

Any drum or batch plant is able to produce LEA®s. Some adjustments however would be required, plants are to be equipped with in-line water and additive dosage systems and the automation system needs to be modified which entails training plant personnel to run these new systems. In the world today 40 plants have been fitted in Europe, the United States and New-Zealand. Almost 400,000 tons of LEA® mixes were produced on over 350 different roadwork sites.

The plant (*figure 1, next page*) has a discontinuous batch process. Half the pavement was manufactured using low-energy asphalt (LEA® 2) below 100°C, and the other half was classical hot mix asphalt (160°C). The main difference in process between

*IFSTTAR- LCPC

**EIFFAGE Travaux Publics, Research & Development Division

***Conseil Général de Seine et Marne, DPR-DMO, (France)

Figure 1 - Centrale discontinue à Monthyon (France)

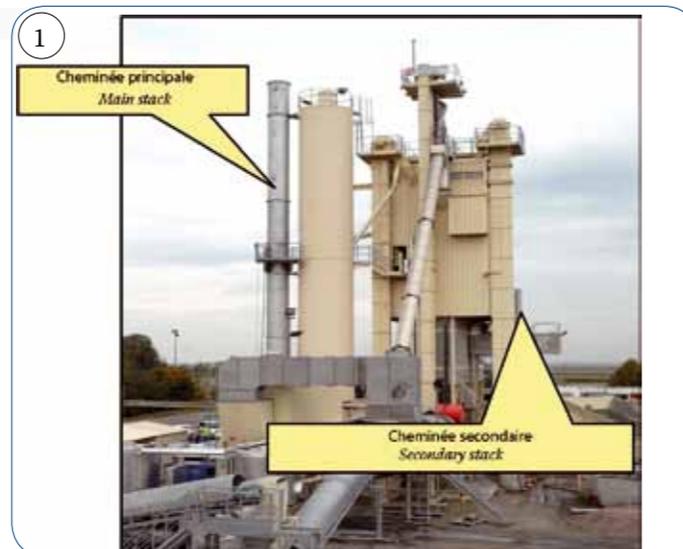
La centrale (figure 1) est un procédé discontinu. La moitié de la chaussée a été réalisée en utilisant un enrobé tiède (LEA®) au dessous de 100°C, et l'autre moitié avec un enrobé chaud (160°C). La principale différence entre les deux fabrications est que dans le cas des enrobés tièdes, la fraction granulaire 0-2 est introduite directement dans le malaxeur sans séchage préalable. Un additif chimique est également introduit dans le malaxeur, à un taux très faible (moins de 1 % en masse du bitume). L'additif est d'origine végétale et il a été montré par des essais de laboratoire qu'il n'a pas d'effet sur les émissions de COV. Chaque modalité de fabrication a duré au minimum une heure, pour permettre une collecte des données environnementales sur une période suffisamment longue. Les essais avec procédé chaud et tiède se sont déroulés respectivement aux cadences de 162 t/h et 167 t/h, tandis que le temps de malaxage reste le même sensiblement.

Il est admis [4] qu'au dessous de 100°C (le seuil pour l'enrobé semi-tiède), une quantité d'eau résiduelle de 0,5 % à 0,7 % était nécessaire pour assurer le répandage. Après production et jusqu'au répandage, une légère réduction de la teneur en eau de l'enrobé tiède a été observée.

Campagne de mesure sur la centrale

Les consommations en gaz et électricité de la centrale ont été mesurées, ainsi que les émissions à l'air des deux cheminées d'évacuation des gaz : i) dans la cheminée principale, les fractions volumiques de dioxygène O₂, dioxyde CO₂ et monoxyde CO de carbone, oxydes d'azote NO_x, Composés Organiques Gazeux Non-méthaniques (COPGNM) et méthane CH₄ ont été mesurés, ainsi que plusieurs paramètres physiques (température, pressions statiques and dynamiques), pour pouvoir convertir les fractions volumiques mesurées en flux massiques pour réaliser un Inventaire de Cycle de Vie (ICV) ; ii) dans la cheminée secondaire (utilisée lors de la fabrication de l'enrobé semi-tiède pour protéger les filtres de la vapeur d'eau émise pendant le malaxage) les Composés Organiques Gazeux (COG), la vitesse des gaz dans la cheminée et leur température ont été mesurés ; iii) la pression, la température et l'humidité ambiantes.

Sur le chantier sont relevés les temps de fonctionnement de chacun des engins de mise en œuvre (compacteurs et finisseur) pour en déduire les consommations d'énergie et les émissions de polluants. Un dispositif expérimental d'évaluation du potentiel d'émission de COG (Composés Organiques Gazeux) à la mise en œuvre des enrobés a été installé sur le site de la centrale. L'évaluation directe sur le chantier des émissions diffuses de l'enrobé pendant le répandage et le compactage est difficile à réaliser, en particulier en raison de la présence des compacteurs : cette évaluation est donc faite dans une chambre à flux [3].



ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE

Contexte

Depuis les années 1990, l'analyse de cycle de vie (ACV) est considérée par les ingénieurs des travaux publics comme une manière possible d'améliorer le dimensionnement dans un cadre international. L'ACV est une méthode d'évaluation environnementale standardisée, qui a été développée pour améliorer la production de produits manufacturés par les industries chimiques américaines. En l'occurrence la *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) depuis 1970. L'ACV s'est montrée bien adaptée à un grand nombre de produits. Celle-ci demande d'utiliser une unité fonctionnelle générique (UF) qui définit précisément les propriétés du produit et les fonctionnalités à considérer. De plus, on obtient une évaluation relative fondée sur un cas dit de référence qui doit être défini pour chaque étude.

ICV et calculs d'impacts

Cette méthode d'évaluation environnementale permet de comparer les deux types de matériaux (chaud et semi-tiède) sur une même base de calcul : même unité fonctionnelle. Dans le cas de l'étude, la comparaison a été faite entre deux matériaux de formule identique, constituant une couche de roulement de 6 cm d'épaisseur, pour une surface de chaussée de 3 750 m², soit 560 tonnes de béton bitumineux semi-grenu (BBSG) à une compacité moyenne de 95 %. Les résultats pour l'enrobé semi-tiède sont comparés à ceux pour l'enrobé chaud qui est le cas de référence.

Les résultats des mesures effectuées et converties en ICV ont été complétés de données génériques issues de la littérature, comme par exemple les émissions à l'air des engins de chantiers

Figure 1 - Batch plant in Monthyon (France)

the hot and half-warm mixes lies in the fact that the aggregate sand fraction in the LEA® pavement was introduced directly into the mixing unit without any preliminary drying. For LEA® production, the chemical additive used for viscosity purpose corresponds to 0.5% by weight of the bitumen. The additive has a vegetal origin and proved to have no effects on the VOC materials emissions through laboratory tests performed as well (as presented in TRB2009). Each production was required to last at least an hour, in order to collect environmental data over a sufficiently long period. The experiment with hot and warm processes was performed at near the same production rates, as follows: 162 t/h for hot mix asphalt and 167 t/h for half-warm asphalt, whereas the mixing time remains the same.

It has been recognized [4] that below 100°C (the half-warm mix threshold), a residual water quantity of roughly 0.5%-0.7% at the mixer discharge is necessary to ensure workability during lay-down. After manufacturing and until final lay-down, a slight reduction in half-warm mix water content is observed.

Measurement campaign

Gas, electricity consumptions and airborne emissions were measured: i) at the main stack, volume fractions of O₂, CO₂, NO_x, CO, Non-Methanic Gaseous Organic Compounds (NMGOC) and CH₄ were all measured, as well as a number of physical parameters (temperature, static and dynamic pressures), in order to convert volume fractions into mass flows for Life Cycle Inventory (LCI); ii) at the secondary stack (only used for half-warm asphalt, to protect the dust filters from the steam), Gaseous Organic Compounds (GOC) were measured along with gas speeds, iii)

ambient pressure and temperature, as well as atmospheric humidity.

At the roadwork site, the operating times for each machine (roller and finisher) were measured to estimate machine energy consumption and emissions. A quantification of diffuse emissions due to asphalt during the lay down stage is hardly feasible at the site because of compactors constantly moving in and out, this evaluation step was therefore performed at the plant using a gas chamber [3].

ENVIRONMENTAL ASSESSMENT

Framework

Since the 90's, Life Cycle Analysis has been considered by road civil engineers and public institutions workers as a possible way to improve road design at the international level. Life Cycle Analysis (LCA) is a standardized environmental assessment method, which has been developed for products manufacturing improvement by US chemical industries affiliated to the Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), since 1970. LCA proved to be well adapted for large numbers of manufactured products. It requires the use of a generic functional unit (FU) that accurately defines the product properties and functionalities to consider. Moreover, it gives a relative assessment using a reference case, which has to be defined for each study.

LCI and Impact calculations

The LCA method allows comparing both pavement types on an identical basis, the same functional unit. The Functional Unit (FU) defined thus considered: same mix design, paved on a 3,750 m² surface area 6 cm thick, which corresponds to a 560-tonne production of asphalt at a void content of 5%. The results for half-warm mix

asphalt are compared to those of the hot asphalt which is the reference case. The specific data converted into LCI before impact assessment was completed with literature data, when generic data were to be used. Such was the case for airborne emissions due to engine exhaust from road works equipment and transport trucks. Truck engine fuel consumption figures were extracted from [6], while data on equipment engines were extrapolated from previous measurements [3] and from [4] for emissions.

The environmental system includes the asphalt mix plant process, transport of asphalt from the plant to the road work site and laying and paving of asphalt. Environmental assumptions for comparisons and impact calculations are given in [7, 8]. Classical LCA generally allows neglecting very small masses (below 5% of the whole product mass). Bitumen is of course never neglected when considering upstream processes and neither should be the additive. In this study the considered system did not include upstream processes as only asphalt production, transport and paving were investigated considering the same mix design.

The indicators calculated from [7] are: Energy consumption (EE), Global Warming Potential (GWP), Acidification Potential (AP), Photochemical Ozone Creation Potential (POCP), and Eutrophication Index (EI).

Consumption and emission results

Consumption and emissions show substantial energy savings for the half-warm process. As for consumption and emissions data for the roadwork processes, only small differences are observed: half-warm asphalt compactors operate longer than hot asphalt compactors.

Figure 2 - Énergie consommée pour enrobés chauds et tièdes
Figure 3 (page de droite) - Indicateurs d'impacts pour enrobés chauds et tièdes

et des semi-remorques utilisés pour les transports de matériaux. La consommation des camions a été évaluée d'après [6], alors que les données concernant les engins de chantier sont issues de travaux antérieurs [3] et les émissions de [4].

Le système environnemental considéré inclut le procédé d'enrobage, le transport des enrobés de la centrale au chantier, le répandage et le compactage. Des hypothèses pour les calculs d'impacts sont données dans [7, 8]. L'ACV classique permet en général de négliger les faibles masses (moins de 5 % du total). Le bitume n'est bien sûr jamais négligé lorsqu'on étudie les procédés amont et l'additif ne devrait pas l'être non plus. Dans cette étude le système étudié ne comprenait pas les procédés amont mais seulement la production d'enrobés, le transport et le compactage de la même formule.

Les indicateurs choisis [7] sont: l'énergie consommée (EE), le Potentiel de réchauffement global (GWP), le Potentiel d'acidification (AP), le Potentiel de création d'ozone Photochimique (POCP), et l'Index d'eutrophisation (EI).

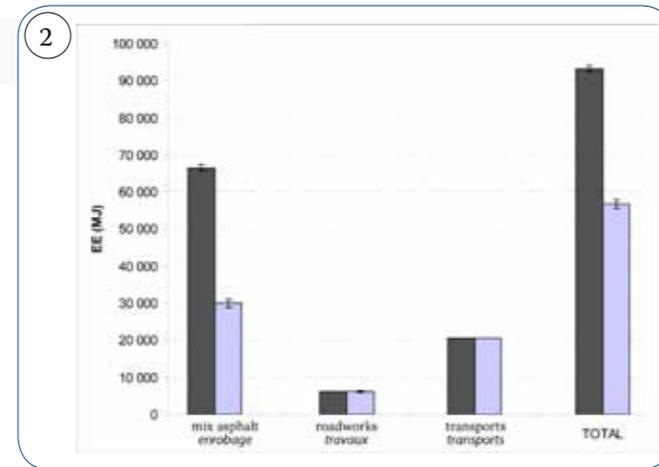
Consommations et émissions

Les consommations et émissions indiquent une économie substantielle d'énergie pour l'enrobé semi-tiède. Quant aux données de consommations et d'émissions pour les tâches de mise en oeuvre, seules quelques différences minimes sont observées : pour l'enrobé semi-tiède les compacteurs opèrent plus longtemps.

Les calculs sont aussi réalisés pour les transports entre la centrale et le chantier. Pour le procédé d'enrobage la plupart des données mesurées sont améliorées par le procédé semi-tiède hormis le CO (constant) et le CH₄ (en hausse). Mais ces composés sont par ailleurs corrélés aux réactions de combustion et à l'ajustement du brûleur.

La figure 2 compare l'énergie des deux productions (EE) à celles du transport. Cette figure met en évidence que d'une part les impacts du transport sont significatifs comparés aux écarts entre procédés

Comme la différence entre les calculs d'indicateurs pour les tâches de mise en oeuvre est faible en général, seules les données de production d'enrobés sont prises en compte comme principaux résultats de l'étude par tonnes produites. Ces résultats montrent des réductions très intéressantes des pressions environnementales en lien avec la diminution de température.



Indicateurs environnementaux

La figure 3 est une représentation graphique des indicateurs GWP, EI, AP et POCP. Cette figure montre que certains indicateurs sont plus faibles pour l'enrobé semi-tiède que pour l'enrobé chaud et ainsi indiquent globalement une amélioration significative apportée par le procédé semi-tiède. Pour les hypothèses retenues dans cette étude, la réduction de température est plus élevée que l'impact du transport.

CONCLUSION

Dans le cadre de cette étude, on a montré que le procédé semi-tiède LEA® contribue à la réduction de certains indicateurs calculés, en comparaison avec les procédés classiques à chaud. Ces améliorations sont spécialement significatives pour ce qui concerne la consommation d'énergie et le potentiel de réchauffement global.

Rappelons cependant certaines limitations de cette étude environnementale. En premier lieu, aucune information sur la production et le transport des matières premières telles bitume, additifs et granulats n'a été prise en compte dans l'évaluation. En second lieu, les indicateurs de toxicité et d'écotoxicité n'ont pas pu être calculés, les données nécessaires (comme par exemple sur les HAP ou les métaux lourds) n'ayant pas pu être mesurées au cours de cette expérimentation. Ces aspects devront être étudiés dans les études à venir, et spécialement la contribution potentielle des additifs chimiques, dont la prise en compte pourrait modifier certains résultats.

REMERCIEMENTS

C. Ropert, M. Dauvergne, P. Monéron sont remerciés pour leurs contributions significatives à cette étude.

Figure 2 (left page) - Energy consumed for hot and warm-mix asphalt
Figure 3 - Impact indicators for hot and half-warm asphalt

Calculations are also provided for transports between asphalt plant and road works. For the asphalt manufacturing process, almost all measured data are found to be improved when producing half-warm asphalt. The only exceptions are CO (constant) and CH₄ (increases). But, these compounds are also correlated with the natural gas combustion reactions, and to the burner adjustments.

Figure 2 compares the energy of both productions (EE) to the asphalt transport as the comparison in tonnes per kilometre is one of the units found to be valuable for decision making by the road owner.

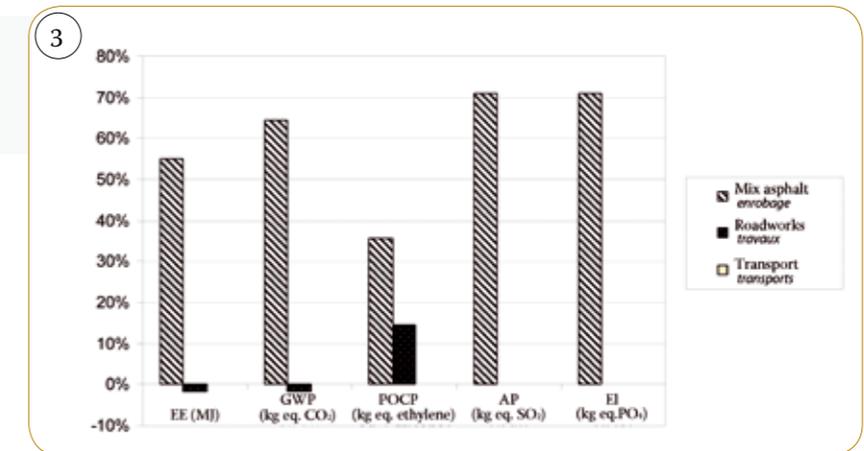
As the difference between road works are found to be very small on all the calculated indicators, only the asphalt production data are taken into account as the main results of the study in tonnes of produced asphalt. These calculations show the very interesting reduction of environmental loads derived from asphalt manufacturing temperature decrease.

Environmental indicators

Figure 3 shows all the indicators GWP, EI, AP and POCP. This figure highlights that some indicators are lower for half-warm asphalt than for hot asphalt, hence expressing the better environmental performance achieved with the half-warm material and the fact that a reduction in asphalt temperature, according to the study hypotheses is greater than the transport contribution for the case study considered.

ACKNOWLEDGEMENTS

C. Ropert, M. Dauvergne, P. Monéron are acknowledged for their significant contribution to this study.



CONCLUSION

Within the scope of this experiment, the half-warm mix LEA® process has been found to positively contribute to the reduction of some indicators, in comparison with the hot-mix process. This improvement proves to be especially significant with respect to Energy Consumption and Global Warming Potential. Several limitations to this study however need to be recalled.

Several limitations to this study however need to be recalled. First, none of the information on raw materials production processes and transport such as bitumen, additives and aggregates has been included in the evaluation which did not include upstream processes. Toxicity and eco-toxicity indicators could therefore not be calculated since relevant data (such as Polycyclic Aromatic Compounds and heavy metals) were not measured during this experiment. This aspect should be investigated in the future, especially with regards to the unknown potential contribution of bitumen additives.

REFERENCES / RÉFÉRENCES

- [1] Stripple H. (2001). *Life cycle assessment of road. A pilot study for inventory analysis*. Report from IVL Swedish Environmental Research Institute, 96 p. and annex
- [2] U.S. EPA Environmental Protection Agency (2004). *Emissions Factor Documentation for AP-42. Hot Mix Asphalt Plant. Final Report*. Report from US-EPA Office of Air Quality Planning and Standards. Emission Measurement Center.
- [3] Jullien A., Monéron P., Quaranta G., Gaillard D. (2006). *A study on air emissions from pavement layings made of different reclaimed asphalt rates. Resources, conservation and recycling*. Vol47, pp 356-374.
- [4] Harder G., LeGoff Y., Loustau A., Martineau Y., Héritier B. & Romier A. (2008). *Energy and environmental benefits of warm and half-warm asphalt mix: quantitative approach*. 87th annual meeting of Transportation Research Board, Washington, D.C.
- [5] Olard, F., Le Noan, C. & Romier, A. *Innovative low energy asphalt technique for minimizing impacts from asphalt plants to road works*, PIARC (World Road Association) Congress, Paris, September 2007. AIPCR Sustainable Development Prize 2007.
- [6] FD P01015 Standard (2006). *Qualité environnementale des produits de construction - Fascicule de données énergie et transport*.
- [7] Goedkoop M.J. (1995). *The Eco-Indicator 95: description of the impact assessment methodology*. NOH report 9514 A; PRé Consultants; Amersfoort (NL); July 1995. <http://www.pre.nl/eco-indicator95/eco-indicator95.htm> accessed July 2006.
- [8] Ventura A., Monéron P., Jullien A., Tamagny P., Olard F., Zavan D., (2009). *Environmental comparison at industrial scale of hot and warm mix asphalt manufacturing processes*, 88th TRB meeting, Washington, USA, 11-15th January 2009.