

## DES ENROBES ENVIRONNEMENTAUX ECONOMES EN ENERGIE

**Johan TRIGALLEZ,  
Colas Belgium**

**Xavier CARBONNEAU,  
Campus Scientifique et Technique Colas**

**Jean-Eric POIRIER,  
Campus Scientifique et Technique Colas**

### **Résumé**

*Engagée dans une démarche volontaire de développement durable, Colas a mis au point la fabrication d'enrobés appelés communément tièdes. L'objectif est la diminution de la consommation énergétique et des émissions de gaz à effet de serre, mais également des émissions de fumées. Cette démarche s'est déroulée dans un cadre strict avec de fortes contraintes sur les résultats visés, et notamment une réduction de 40°C de la température de production et de mise en oeuvre des enrobés.*

*Ces solutions ont été testées depuis 5 ans en France avec succès. Les émissions de fumées sont réduites et les mesures de consommations énergétiques confirment les estimations établies dans le cadre d'analyse partielle du cycle de vie des produits. Elles démontrent une diminution de l'énergie consommée à la fabrication de 18% au moins et une réduction de 20% des émissions de gaz à effet de serre.*

### **Samenvatting**

*Geëngageerd door het vrijwillige initiatief tot duurzame ontwikkeling heeft Colas het vervaardigen van mengsels, die doorgaans lage temperatuur bitumineuze verhardingen zijn, op punt gezet. Het doel is het verminderen van het energieverbruik en het uitstoten van broeikasgassen maar eveneens het uitstoten van rook.*

*Deze ontwikkeling verloopt in een strikt kader met sterke druk op de betreffende resultaten, en met name een vermindering van 40°C van de productietemperatuur en de temperatuur bij het plaatsen van mengsels.*

*Deze oplossingen werden gedurende 5 jaar in Frankrijk getest en met succes. De uitstotingen van rook zijn verminderd en de maatregelen van energieverbruik bevestigen de vastgestelde schattingen in het kader van de gedeeltelijke analyse van de levensloop van de producten. Zij vertonen een vermindering van de verbruikte energie van minstens 18% bij de vervaardiging en een vermindering van 20% uitgestoten broeikasgassen.*

## **1. Construire durablement**

La construction et l'entretien des routes ont un impact direct sur le milieu qui environne les sites de production et d'application des matériaux routiers. Dans le cas particulier des enrobés hydrocarbonés, cet impact est en partie lié à leur température. En effet, ils sont le plus souvent fabriqués aux environs de 160 à 180°C pour produire deux effets : réduire la viscosité du bitume et éliminer l'eau des granulats. Le premier rend l'enrobé applicable, le second durable.

Au cours des dernières années, on constate que les températures moyennes ont tendance à augmenter. Les enrobés sont de plus en plus performants pour répondre aux exigences accrues des contraintes du trafic ; or ils sont confectionnés avec des bitumes durs ou des bitumes polymères, liants dont la viscosité requiert une température de manipulation plus élevée.

Du point de vue environnemental, travailler à température élevée présente plusieurs inconvénients : consommation d'énergie pour chauffer granulats et bitume, émission de poussières sur le site de fabrication, émission de gaz à effet de serre sur les sites de fabrication et d'application. Ces trois indicateurs sont liés à la température et augmentent avec elle. Depuis plusieurs années, des recherches ont été menées pour réduire la température de fabrication des enrobés bitumineux en centrale. Elles ont abouti à la mise au point de différents procédés qui autorisent un abaissement des températures d'usage d'environ 40°C, tout en conservant la maniabilité des enrobés, ce qui assure l'uni de l'application et l'efficacité du compactage. On a déjà pu enregistrer une réduction de la quantité d'énergie nécessaire à la production des enrobés. On en attend également une réduction des émanations gazeuses. En effet, on trouve couramment dans la littérature qu'une baisse de la température de travail de 10° à 12°C s'accompagne d'une division par un facteur 1.5 à 2 de la production des émanations [réf.1]. On a voulu vérifier cette affirmation en réalisant une série de mesures in situ afin de quantifier ce gain environnemental. Ces sont les résultats de ces études qui vont être présentés ici. A cette fin, des suivis détaillés de chantiers ont été effectués. Ils incluent des contrôles de fabrication et de mise en oeuvre, des relevés précis de température aux cours des différentes phases de réalisation du chantier, des vérifications des performances physico-mécaniques des enrobés et de leurs qualités d'usage. Les services techniques de l'Etat en France ont réalisé le suivi technique très poussé du chantier expérimental de la RN 157, entre Le Mans et Orléans. Pour le volet environnemental, des suivis de consommation d'énergie ont été effectués. Des analyses qualitatives et quantitatives des gaz en sortie de centrale d'enrobage ont été également réalisées. Enfin, les émissions gazeuses à la mise en oeuvre ont aussi été évaluées afin d'apprécier le niveau d'exposition du personnel et du voisinage du chantier.

Enfin, comme ces gains environnementaux doivent être réalisés à performances techniques identiques pour les enrobés, il a semblé important de rappeler que cette réduction de la température ne pénalisait pas ces dernières [réf.2].

## **2. Sécher ou ne pas sécher les granulats**

Cette question se pose quand on réalise qu'une grande part de l'énergie nécessaire pour chauffer les granulats au-delà de 100°C est consommée par la vaporisation de l'eau. Laisser 2 à 3% d'eau dans le squelette granulaire économise certainement de l'énergie, et favorise de temps en temps la maniabilité de l'enrobé. Cependant l'utilisation de granulats encore partiellement humides a été totalement exclue des procédés décrits ici, car le risque encouru paraît trop important pour la qualité de l'enrobage et la durabilité de la performance des enrobés. Par ailleurs le gain de maniabilité apporté par l'eau résiduelle est un artifice dont la maîtrise est trop délicate eu égard aux aléas d'organisation d'un chantier ordinaire.

## **3. Evaluation de l'impact environnemental**

Pour évaluer l'impact environnemental d'un procédé on peut mettre en oeuvre trois types de méthodes. Chacune présente des avantages et des inconvénients. A ce jour aucune ne s'impose de façon évidente ; à notre avis, elles doivent être considérées comme complémentaires.

### **3.1 L'analyse du cycle de vie**

Le procédé est décomposé en unités élémentaires. La contribution de chacune d'elle est calculée à partir de données extraites d'une base commune à une profession donnée. Cette approche a l'avantage de prendre en compte la globalité du procédé, ce que l'on résume par « du berceau à la tombe » et surtout de poser comme point de départ de l'évaluation une unité fonctionnelle à partir de laquelle des comparaisons seront possibles. Elle est normalisée, ce qui facilite l'analyse des résultats.

L'inconvénient majeur réside dans la disponibilité des données, leur fiabilité mais également leur pertinence par rapport au procédé considéré.

Cette méthode a été mise en oeuvre sous une forme simplifiée. L'attention est focalisée sur la consommation d'énergie et la production des gaz à effet de serre, [réf.3]. L'impact environnemental du chantier de la RN 157 et principalement le gain apporté par ce procédé de fabrication a été estimé à l'aide d'un logiciel interne de simulation et de calcul d'évaluation partielle du cycle de vie (EPCV). Jugés les plus importants, deux impacts environnementaux sont pris en compte : l'émission de gaz à effets de serre et la consommation énergétique. Il est en effet actuellement difficile de quantifier précisément les économies d'énergie par mesures directes au niveau de la centrale d'enrobage, compte tenu de leur configuration. En considérant les différents paramètres du chantier, notamment les caractéristiques de la formule mise en place et les distances entre la centrale et les lieux de production des composants, on peut évaluer les gains en faveur des enrobés économes en énergie entre 16 et 20 % pour les

consommations énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre au regard de la fabrication des mélanges.

### **3.2 Mesures en laboratoire**

A partir d'une expérience dont le mode opératoire est choisi par convention, des mesures sont réalisées en laboratoire selon un protocole qui fixe les conditions de mesures. Les grandeurs mesurées sont également choisies en fonction du type d'impact à évaluer. On peut alors évaluer l'influence d'un changement de composition ou d'un changement de valeur de certains paramètres, comme la température par exemple, sur les grandeurs retenues comme pertinentes par rapport à l'impact environnemental en question. L'avantage de cette approche est que les paramètres opératoires sont maîtrisés. La répétabilité des mesures peut donc être évaluée. L'inconvénient réside dans le fait que le protocole choisi ne représente que de loin le procédé industriel. Il n'y a donc pas de protocole qui fasse aujourd'hui autorité.

De plus, exploiter les données acquises dans l'expérience conventionnelle pour les transposer au cas industriel nécessiterait de connaître toutes les lois physico-chimiques à l'oeuvre dans l'un et dans l'autre, en un mot de les modéliser de façon prédictive. Dans d'autres disciplines des méthodes ont été élaborées et mises en oeuvre qui permettent ce passage du laboratoire au cas industriel. On pense au génie de procédés et au génie chimique.

Il ne fait pas de doute que l'application de cette démarche au problème posé ici porterait ses fruits.

Des mesures ont été réalisées selon un protocole conventionnel [réf.4]. Elles mettent en évidence la très forte réduction de la quantité de HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) et COV (composés organiques volatils) émis au cours de l'essai quand on réduit la température de l'expérience. En revanche on ne peut que comparer des bitumes entre eux sans pouvoir inférer des valeurs issues de l'expérience des données exploitables de façon quantitative pour les chantiers. En revanche elles ont permis de savoir quels types de molécules étaient produites par les bitumes. Ce sont ces molécules qui ont été recherchées dans les essais in situ.

### **3.3 Mesure in situ**

Cette méthode consiste à instrumenter un chantier en prélevant des échantillons de l'air ambiant au cours d'une application réelle. On dose ensuite différentes espèces chimiques en particulier les composés polycycliques hydrocarbonés (HAP). Son principal avantage est de donner des informations sur un cas réel. Son inconvénient majeur est que les paramètres de l'expérimentation ne sont pas tous maîtrisables. L'exploitation des données recueillies peut être rendue impossible à la suite d'un simple changement des conditions météorologiques ( vent par exemple). Elle suppose également que l'on choisisse a priori les éléments à mesurer. Le caractère aléatoire du résultat peut être pris en compte par une répétition de l'expérimentation,

un nombre de fois suffisant pour qu'une approche statistique devienne fondée. Un tel programme est très lourd à mettre en oeuvre, en particulier parce qu'il implique une grande discipline pour l'équipe d'application, en particulier pour les fumeurs. Les applicateurs se retrouvent transformés en technicien de laboratoire, ce qui n'est pas leur mission première. A notre connaissance une telle campagne statistique n'a pas encore été mise en oeuvre. Malgré ces difficultés, c'est cette approche qui a été retenue pour 6 chantiers.

### 3.3.1 Mesures à l'application

L'effet immédiat de la réduction de température des enrobés est déjà une amélioration significative de l'environnement de travail pour le personnel d'application, avec une réduction de la température ambiante au niveau du chantier et moins de fumées visibles lors de l'application. Ceci se traduit par un impact limité également au niveau des riverains, qui reprochent souvent à notre activité son caractère bruyant et l'odeur particulière de l'enrobé à chaud. Ainsi comme l'illustre la photographie 1, les enrobés économes en énergie permettent une application sans que les fenêtres des logements à proximité du chantier ne se ferment.



Photo 1 - Une gêne réduite pour les riverains.

Les points de prélèvements sont les suivants : derrière la table du finisseur, au niveau du conducteur du finisseur, et sur le personnel d'application.

Malgré tout le soin apporté à cette opération, les quantités de gaz détectées sont excessivement faibles. Elles sont souvent très en deçà des seuils de détection des moyens d'analyse actuellement disponibles, y compris pour l'enrobé témoin mis en oeuvre à température traditionnelle. Pour les poussières inhalables, les niveaux sont également très inférieurs aux valeurs moyennes d'exposition professionnelles en vigueur en France, à savoir  $5 \text{ mg/m}^3$  pour 8 heures d'exposition et même au seuil de  $0,5 \text{ mg/m}^3$  recommandé par l'Association Conference Governmental Industrial Hygienist (ACGIH) américaine. Pour les enrobés économes en énergie, les émissions gazeuses sont encore plus faibles et deviennent très difficilement détectables.

Pour les 6 chantiers expérimentés, la quantité de HAP totale est systématiquement divisée par 2. Sur les 27 composés analysés, 8 seulement présentent des concentrations supérieures au

seuil de quantification. Parmi ceux-ci aucun ne dépasse la valeur limite d'exposition, la concentration trouvée est de l'ordre de un millième de cette valeur limite.

Enfin pour illustrer la difficulté d'interprétation de ces mesures, on notera que pour deux d'entre eux qui représentent plus de la moitié des HAP mesurés, aucun n'est produit dans une expérience conduite en laboratoire sur des enrobés au bitume pur ou modifié. Par contre ils sont systématiquement présents dès que l'on analyse les gaz produits par l'échappement des véhicules, ceux du chantier ou ceux des usagers proches du chantier.

### **3.3.2 Mesures à la production**

Des quantifications des émissions gazeuses au niveau de la centrale d'enrobage ont été réalisées sur quatre chantiers. Ces mesures sont plus classiques et elles correspondent à celles réglementaires et nécessaires pour exploiter les installations industrielles. Elles ont été effectuées sur quatre centrales d'enrobage discontinues différentes utilisant les deux procédés de fabrications des enrobés économes en énergie. Les gaz émis sont prélevés au niveau de la cheminée du poste.

Il est important de rappeler que pour être exploitables, ces mesures impliquent de vérifier un certain nombre de conditions : conditions météorologiques stables, combustible et régime de production identiques, humidité équivalente des granulats des enrobés témoin et enrobés économes en énergie. La comparaison des résultats est alors réalisée sur la fabrication du même mélange bitumineux. Une campagne de mesures satisfaisant parfaitement à tous ces critères est donc une opération lourde et délicate.

Pour le chantier de la RN 157 décrit au paragraphe 4, les mesures ont été menées pendant trois jours. Le sécheur a utilisé du fioul lourd.

Pour le second cas de chantier, les enrobés ont été fabriqués par une centrale avec sécheur fonctionnant au gaz. Les cadences de production étaient de 180 t/h pour le béton bitumineux témoin et de 175 t/h pour l'enrobés économe en énergie, avec une durée d'enregistrement supérieure à 2 heures de production.

Pour le troisième cas de chantier, le sécheur de la centrale a fonctionné au fioul à très basse teneur en soufre (TBTS) et les cadences de production ont été respectivement de 193 t/h pour le témoin et de 195 t/h pour l'enrobé économe en énergie. Des intempéries n'ont pas permis de mener les mesures le même jour pour ce chantier entraînant une variation de la teneur en eau des granulats.

Enfin, dans le quatrième cas de chantier, le sécheur de la centrale a fonctionné au fioul TBTS. Les mesures ont été réalisées sur deux jours différents pour les enrobés classiques et pour les enrobés économes en énergie. Les cadences de production ont été respectivement de 90 et 110 t/h pour des formulations strictement identiques au liant près. Ces premiers résultats mettent en évidence la faible influence des deux techniques retenues sur les gaz émis en centrale d'enrobage. La comparaison des variations relatives d'émissions de CO<sub>2</sub> au niveau de

la cheminée de la centrale montre la réduction effective de ce gaz à effet de serre. Le tableau 1 détaille les variations mesurées sur les quatre centrales instrumentées.

Gaz	Variation relative des émissions
CO <sub>2</sub>	de -5 à -30 %
O <sub>2</sub>	de 0 à +14 %

Tableau 1 - Variations relatives de composition des gaz de cheminée des centrales d'enrobages entre enrobés témoins et enrobés économes en énergie.

Malgré une dispersion assez importante dans les variations relatives mesurées, une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> est effectivement observée avec une légère augmentation des émissions d'oxygène (O<sub>2</sub>).

### 3.3.3 Consommation d'énergie

Sur deux des chantiers précédents, la consommation énergétique a également été enregistrée avec les matériels existant sur les centrales qui ne sont pas encore suffisamment précis. En conséquence, ces premiers résultats sont donnés à titre indicatif mais ils montrent la nette tendance à la réduction d'énergie consommée avec ces nouveaux types d'enrobé. Dans le cas du sécheur au gaz, pour une réduction de température de 30°C, les consommations moyennes enregistrées ont été de 5,4 m<sup>3</sup>/h pour l'enrobé témoin et de 4,5 m<sup>3</sup>/h pour l'enrobé économe en énergie, avec des durées d'enregistrement supérieures à 2 heures et à des débits de production identiques de 180 t/h. Une réduction de la consommation de gaz de 0,9 m<sup>3</sup>/h, soit 16,5 % est mise clairement en évidence.

Dans le cas de la centrale fonctionnant au fuel TBTS, la consommation a également été enregistrée. Une intempérie a conduit à un décalage important de teneur en eau des granulats de 1,9 % pour l'enrobé témoin et de 3,2 % pour l'enrobé économe en énergie. La cadence de production a été de 195 t/h et les mesures ont été effectuées sur la durée de production d'un tonnage sensiblement équivalent pour les deux enrobés de 230 tonnes. Une consommation de 5,91 l/t de fioul a été relevée pour le témoin et de 5,87 l/t pour l'enrobé tiède fabriqué avec des granulats nettement plus humides.

Par une approche thermodynamique plus précise, l'estimation de l'économie de fuel lourd est de 0,7 l/t d'enrobés pour une réduction de 1% de teneur en eau des granulats. Cette valeur permet d'estimer la consommation à teneur en eau identique au témoin de 4,96 l/t, soit une réduction de l'ordre de 16%. De la même manière, il est possible d'estimer l'économie d'énergie liée à une réduction de 30°C de la température de fabrication. Elle est de l'ordre de 0,7 l de fuel lourd/t d'enrobés.

Ces essais montrent clairement la tendance, mais également qu'il est nécessaire d'évaluer par le calcul les économies d'énergie engendrées par ces procédés de fabrication des enrobés économes en énergie.

#### 4. Propriétés d'usage des enrobés économes en énergie.

Apporter une amélioration environnementale ne peut pas se faire au détriment de la qualité technique des enrobés. Il est donc important de rappeler les performances de ces enrobés environnementaux économes en énergie.

A partir des granulats de la carrière de Voutré (53), une formule de béton bitumineux semi grenu 0/10 a été étudiée selon les normes en vigueur avec un bitume 35/50 et les liants des différents procédés.

Le tableau 2 récapitule les principales performances obtenues, quel que soit le procédé envisagé parmi ceux développés par Colas.

Type d'enrobé		BBSG Témoin, au bitume 35/50	Enrobés économes en énergie
Température d'enrobage (° C)		160	125
P.C.G <sup>(a)</sup> , Taux de vides, %	à 10 girations	14.5	14.2 à 14.8
	à 60 girations	8.1	7.5 à 8.4
Duriez,	Taux de vides, %	8.2	6.8 à 7.5
	R à 18°C, en MPa	9.7	9.8 à 9.9
	r / R	0.78	0.75 à 0.80
Profondeur d'ornièrre, % à 60°C	à 30 000 cycles	3.5	3.0 à 4.0

Tableau 2- Performances des enrobés. <sup>(a)</sup> Presse à Cisaillement Giratoire (PCG)

L'enrobage est toujours satisfaisant. Les résultats montrent que :

- la maniabilité des enrobés est conservée à une température de 125 °C ;
- les caractéristiques physico-mécaniques des enrobés sont équivalentes à celles d'enrobés de même formule mais fabriqués traditionnellement, en particulier on observe qu'il n'y a pas de dégradation de la résistance au désenrobage, ni de celle à l'orniérage.

Par ailleurs, les mesures du module complexe et du comportement en fatigue en flexion alternée ont démontré un comportement analogue à celui des enrobés traditionnels.

Ci-dessous sont décrits les résultats de la validation technique sur le chantier de la RN157 qui relie Le Mans à Orléans (Sarthe).

Il s'agit d'une chaussée bidirectionnelle, au profil rectiligne mais comportant quelques rampes prononcées et exposées au soleil. En 2004, elle supportait près de 7.800 véhicules par jour,



dont 25 % de poids lourds, soit un trafic très élevé. Les différents procédés et le témoin en Béton Bitumineux Semi Grenu 0/10 (BBSG 0/10) ont été mis en oeuvre sur une largeur moyenne de chaussée de 7.60 m et sur une longueur d'environ 500 mètres pour chaque procédé. L'épaisseur d'enrobé est de 6 cm, soit 140 kg/m<sup>2</sup>. L'enrobé témoin au bitume 35/50 utilise les granulats de la carrière Voutré. Il présente les propriétés rapportées dans le tableau 2. Les enrobés économes en énergie ont été fabriqués suivant cette formule avec les mêmes granulats et leur liant spécifique. Dans les vis du finisseur, les températures des enrobés économes en énergie sont inférieures de 40 à 45 °C à celles de l'enrobé témoin. La température de ces enrobés est de l'ordre de 120 °C. La maniabilité est conservée et le compactage est satisfaisant ; en effet on constate que les teneurs en vides, de l'ordre de 6 % sont identiques, voire plus faibles, que celles mesurées sur le témoin. Cette facilité de mise en oeuvre est confirmée par le bon niveau de l'uni longitudinal, comme l'indiquent les notes du tableau 3, uni évalué par l'analyseur de profil en long (APL NBO) du LRPC (Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées) d'Angers.

RN 157		Planche Témoin		BB économes en énergie					
		BBSG 0/10		Enrobés 1		Enrobés 2		Enrobés 3	
		sens +	sens -	sens +	sens -	sens +	sens -	sens +	Sens -
P.O.	Moyenne avant travaux	7	6	8	7	5	7	6	5
	Moyenne après travaux	9	9	9	8	8	8	9	8
	Valeur mini avant travaux	5	3	6	6	3	3	5	2
	Valeur mini après travaux	8	8	7	5	6	6	8	6
	Moyenne avant / Moyenne après	7 / 9	6 / 9	8 / 9	7 / 8	5 / 8	7 / 8	6 / 9	5 / 8

Tableau 3 - Notes d'uni en petites longueurs d'onde avant et après travaux.

Caractéristiques de la macro-texture, les mesures de profondeur moyenne de texture (PMT vraie) sont données en fonction du temps (figure 1). Le niveau de macro-texture est élevé pour ce type de formule d'enrobés et il est identique quelque soit l'enrobé considéré. L'évolution entre la fin du compactage et après deux mois de trafic est peu sensible.

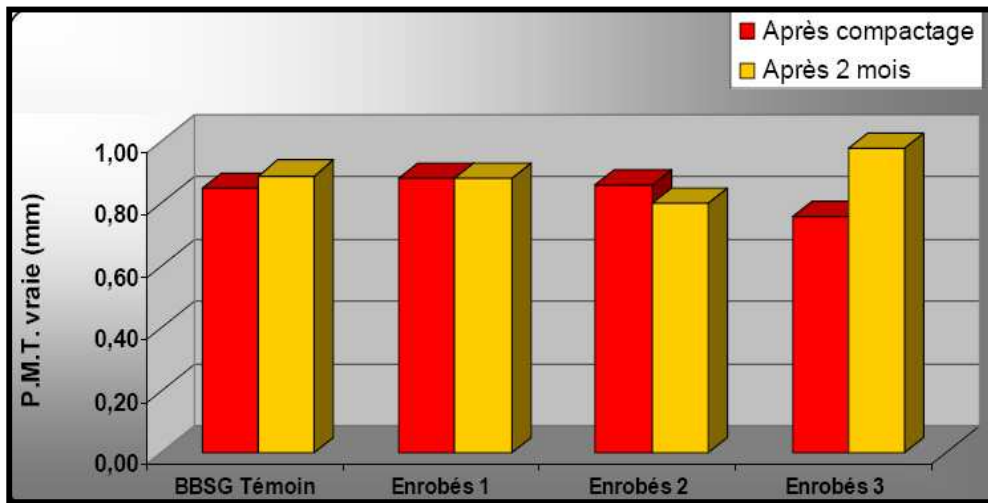


Figure 1- Evolution de la PMT vraie (en mm) pour les trois procédés testé.

Mesurés sur l'ensemble du chantier après 17 mois de circulation lourde, les coefficients de frottement longitudinal (C.F.L.) se situent dans le milieu du fuseau national français comme le montre la figure 2.

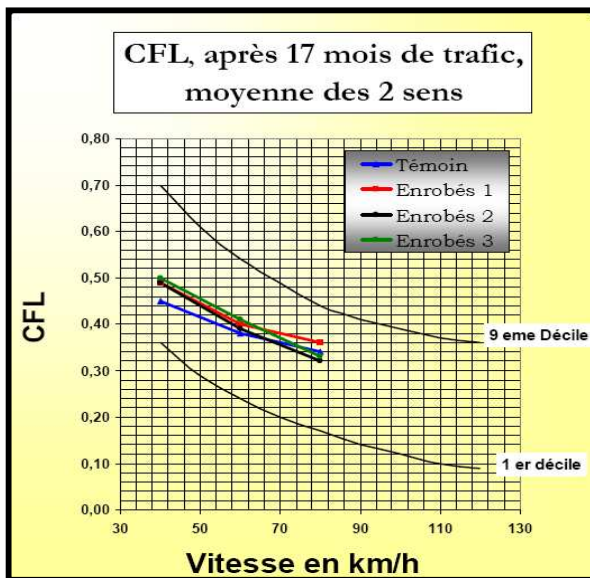


Figure 2 - CFL après 17 mois de trafic (moyenne des 2 sens)

Le niveau d'adhérence est donc satisfaisant pour ce type d'enrobés largement équivalent au témoin sous trafic élevé.

Il est également à noter l'absence de toute déformation du profil en travers après deux étés chauds et malgré un profil en long présentant de fortes rampes exposées au soleil et soumises à un trafic poids lourd intense.

Pour ce bon comportement d'ensemble et vu les caractéristiques des enrobés économes en énergie identiques, voire supérieures à celles d'un enrobé témoin et leur pérennité après plus de 17 mois de circulation intense, le Sétra (Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements en France) a attribué un certificat de reconnaissance de l'innovation pour le compte de la Direction Générale des Routes.

## **5. Conclusion**

Basés sur la maîtrise de la rhéologie du liant utilisé et du processus de fabrication d'enrobage en respectant les règles de l'art, les procédés mis au point ont conduit à une réduction importante et effective de 40 à 45 °C des températures de fabrication et de mise en oeuvre des enrobés. Les performances physico-mécaniques et les caractéristiques d'usage des enrobés dit tièdes, mais en réalité économes en énergie, sont équivalentes à celles des enrobés traditionnels, voire même souvent améliorées.

Le suivi détaillé du chantier de la RN 157 en France a montré clairement ces gains de température pour les différents procédés testés. Le niveau de compacité atteint, l'uni et l'adhérence de ces enrobés sous fort trafic poids lourd et après deux étés chauds prouvent que ces procédés conduisent à l'usage attendu.

Ils sont applicables aux enrobés économes en énergie avec recyclage d'agrégats mais également aux différents types d'enrobés minces et très minces aux liants modifiés avec les mêmes avantages et succès de réalisation.

Au niveau de l'aspect environnemental, l'emploi de ces enrobés entraîne une forte diminution des émissions gazeuses et notamment des gaz à effet de serre de l'ordre de 18 à 20%, en raison de la baisse de consommation énergétique qui est prouvée.

Sur tous les chantiers d'application de ces enrobés, les émissions gazeuses sont également abaissées au point de devenir pratiquement imperceptibles et sous la limite de détection des appareils de mesure.

La pertinence du choix de ces techniques d'enrobés économes en énergie est une nouvelle fois démontrée tant au niveau écologique global par la diminution de l'énergie et de production des gaz à effet de serre, qu'environnemental proche en améliorant d'avantage les conditions de travail et de sécurité du personnel et des usagers.

**Références:**

- [1] H.C.Bran, P.C. de Groot « A laboratory rig for studying aspects of workers exposure to bitumen fumes », American Industrial Hygiene Association Journal, N°60 (1999) page 182- 190.
- [2] X. Carbonneau, J.P. Henrat, F. Létaudin, « Enrobés 3E de Colas, une réponse sûre à la problématique des enrobés dits « tièdes » », RGRA N°849, juin 2006, page 70-75.
- [3] M. Chappat, J Bilal, « La route écologique du futur, analyse du cycle de vie. » Septembre 2003.
- [4] J.T. Kurek, A.J. Kriech, H. L. Wissel, L.V. Osborn and G.R. Blackburn: Laboratory Generation and Evaluation of Paving Asphalt Fumes, T.R.R., 1661: 35-40, 1999