

# Modélisation du refroidissement d'un enrobé bitumineux de sa sortie de centrale de production au compactage sur chantier routier

Julien NAVARO<sup>1,2</sup>, Denis BRUNEAU<sup>1,\*</sup>, Michel MAZÉ<sup>2</sup>, Ivan DROUADAINE<sup>2</sup>, Frédéric NOEL<sup>1</sup>, Samuel MENDEZ<sup>2</sup>, Bertrand POUTEAU<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire TREFLE UMR 8508, Arts et Métiers ParisTech Centre de Bordeaux-Talence, Esplanade des Arts et Métiers, 33405 Talence Cedex

<sup>2</sup>EUROVIA, Centre de Recherche de Mérignac, 22 rue Thierry Sabine BP 20067, 33703 Mérignac

\* (auteur correspondant : denis-bruneau@ensam.eu)

**Résumé** - La maîtrise de la température d'un enrobé bitumineux de sa fabrication à la fin de son compactage sur chantier routier est un garant du bon déroulement de celui-ci. L'objet du travail concerne la mise en place d'un utilitaire de calcul du refroidissement d'un enrobé bitumineux, de sa sortie de centrale de production à la fin de son compactage. Cet utilitaire prend en compte le transport de l'enrobé (en camion simple ou double paroi, bâché ou non), l'attente sur site d'utilisation et la durée entre la mise en place et la fin du compactage, ceci en fonction des conditions météorologiques qui environnent le chantier.

## Nomenclature

$a$	Diffusivité thermique, $m^2.s^{-1}$	$\alpha, \beta$	Paramètres d'ajustement, -
$A$	Surface d'échange, $m^2$	$\varepsilon$	Emissivité, -
$b$	Coefficient d'interception, $W.m^{-2}$	$\lambda$	Conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
$Cn$	Couverture nuageuse, %	$\rho$	Masse volumique, $kg.m^{-3}$
$C_p$	Capacité calorifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	<i>Indices et exposants</i>	
$h$	Coefficient d'échange, $W.m^2.K^{-1}$	e	Enrobé bitumineux
$H$	Coefficient d'échange global, $W.m^2.K^{-1}$	éq	Equivalent
$I$	Densité de flux solaire, $W.m^{-2}$	$\infty$	Air environnant
$e$	Epaisseur, $m$	s	Sol

## 1. Introduction

La fabrication industrielle des enrobés bitumineux est une activité forte d'un siècle d'expérience encadrée par des normes définissant les caractéristiques du produit final. La répartition du liant à la surface des granulats permet d'assurer la cohésion de l'enrobé. La formulation des enrobés consiste à adapter les proportions en éléments de différentes tailles du squelette granulaire et les propriétés du liant afin d'ajuster les propriétés de l'enrobé, à sa fonction dans la structure routière [1].

Une structure routière est composée d'une superposition de couches ayant chacune une fonction précise dans le corps de chaussée : une couche de forme dont la fonction est de niveler le sol support et d'ancrer la structure routière dans ce dernier, une couche d'assise qui constitue un support nivelé et suffisamment résistant pour envisager le compactage de la couche de surface, elle-même composée d'une couche de liaison qui parfait le nivellement et assiste mécaniquement la couche finale, dite couche de roulement, dont la fonction est d'assurer la pérennité du bon contact chaussée / pneumatique [2,3].

Les formulations d'enrobés utilisées sont nombreuses et adaptées aux besoins de performances mécaniques de tel ou tel type de chaussées. Ces enrobés sont produits en centrales fixes (généralement éloignées du lieu d'utilisation de ceux-ci) ou mobiles (proches du lieu d'utilisation). Ils sont transportés vers ce lieu d'utilisation (chantier routier), mis en œuvre, puis compactés afin d'atteindre un pourcentage de vide, variable selon la formule de l'enrobé et stipulé par des normes [4].

L'aptitude d'un enrobé à être compacté est principalement liée à sa formulation et à sa température. La température de l'enrobé au moment du compactage dépend bien évidemment de sa température en sortie de centrale, de la durée et du type de transport vers le chantier, du temps d'attente sur chantier avant mise en œuvre, de la durée d'attente entre la mise en œuvre et le compactage ; elle dépend aussi des conditions météorologiques et de la température du support sur lequel est apposé l'enrobé.

L'objectif de la modélisation présentée ici est d'estimer la température moyenne de l'enrobé entre sa sortie de la centrale de fabrication et sa mise en place sur site, puis entre la mise en place et la fin de son compactage (température moyenne dans l'épaisseur de la couche considérée). La simulation de ce suivi en température est un élément important de la conduite d'un chantier routier. Elle permet l'ajustement de la température de fabrication de l'enrobé en fonction des conditions opérationnelles et climatiques environnantes. La maîtrise des températures de fabrication induit une limitation des émissions de fumées en centrale, une diminution de la consommation énergétique ainsi qu'une meilleure maîtrise des performances mécaniques des enrobés permise par le contrôle des conditions de compactage [5] [6].

## 2. Présentation du modèle

### 2.1. Transport de l'enrobé en camion et attente sur chantier avant mise en place

L'enrobé est ici en amas dans une benne de camion, bâchée ou non, calorifugée ou non (benne à paroi simple ou double). Le bilan d'énergie sur cet amas est écrit comme suit :

$$\rho_e V_e C_{p,e} \frac{d\bar{T}(t)}{dt} = H_T^{eq} (\bar{T}(t) - T_\infty) \quad (1)$$

où le coefficient d'échange entre le produit et l'air extérieur est décomposé en une composante indicée C pour la partie de l'amas en contact avec les parois de la benne et indicée NC pour celle qui n'est pas en contact (partie supérieure de l'amas) :

$$H_T^{eq} = \alpha (H_{NC}^{eq} A_{NC} + H_C^{eq} A_C) \quad (2)$$

Notons ici que l'hypothèse de température uniforme du produit sur la durée du refroidissement en amas est discutable ; en effet, les nombres de Biot caractérisant la condition à la limite produit - air ambiant sont de l'ordre de l'unité, mais peuvent atteindre une valeur proche de 10. Ainsi, le modèle surestime la température de surface réelle et l'échange entre le produit en amas et son environnement. Par contre, cette surestimation est raisonnable : les gradients de températures dans le produit (estimés à moins de 30°C) sont sensiblement inférieurs à la différence de température produit - air ambiant (de l'ordre de 50 à 150°C), ceci sur toute la durée de refroidissement (la température du produit en sortie de centrale est de l'ordre de 170°C, et sa température au compactage de l'ordre de 100°C). Par ailleurs, sur cette gamme de température ([50°C ; 150°C]), les variations de caractéristiques thermophysiques du produit (pour 95% constitué de matière minérale) sont négligeables en regard de l'approximation du modèle. Enfin, sur cette même gamme de température, la solidification du bitume (présent à 5% dans l'enrobé bitumineux) et l'évaporation d'eau

résiduelle, pouvant éventuellement survenir, n'ont qu'une influence modeste sur l'évolution thermique du produit. De plus, l'ensemble de l'enrobé est homogénéisé mécaniquement lors de l'étape de chargement de l'engin réalisant la mise en place afin de garantir une température homogène à l'initiation de la phase de compactage.

Afin de décrire l'échange entre la benne et son environnement durant le transport, celle-ci est assimilée à une sphère d'un diamètre équivalent de l'ordre de 2 mètres [7]. La vitesse de l'air considérée est celle générée par le déplacement du camion : celui-ci est soit à l'arrêt, soit en trajet urbain ou autre. Les corrélations respectivement de convection naturelle de Raithby et al. [8] et de convection forcée de Kutateladze et al. [9] sont retenues. Les coefficients d'échanges intervenant dans le second membre de l'équation 2 sont alors construits par mise en série de la résistance de convection avec des résistances de conduction adaptées

- aux types de parois de bennes (simples ou doubles) pour la surface de l'amas en contact avec ces parois ; pour les parois doubles, la résistance de la couche d'air inter-parois est modélisée par une résistance de conduction.
- au caractère non-bâché ou bâché de cette benne pour la surface supérieure de l'amas ; pour une benne bâchée, la résistance de la couche d'air située entre la surface supérieure de l'amas et la bâche est modélisée par une résistance de conduction ; l'épaisseur de cette couche d'air est estimée être en moyenne de 5mm.

Dans le cas d'une benne non-bâchée, l'échange par rayonnement de l'enrobé bitumineux (supposé se comporter comme un corps noir) avec son environnement est pris en considération, en considérant que la température de cet environnement est la « température de ciel » suivante [10] :

$$T_{ciel} = T_{\infty} - 12K \quad (3)$$

L'équation 2 laisse apparaître un paramètre d'adaptation  $\alpha$  ; celui-ci prend en compte la différence notable entre l'écoulement autour d'une sphère et l'écoulement autour de la benne du camion, celle-ci étant protégée en partie basse par les essieux et par la calandre du véhicule, et en partie avant par la cabine du camion.

La considération des diverses configurations possibles de transport de l'enrobé est possible de manière simple par cette modélisation qui permet, grâce à l'ajustement du paramètre  $\alpha$  par des mesures expérimentales, de calculer la température devant être prise en compte lors de l'étape de mise en place.

## 2.2. Refroidissement de l'enrobé de sa mise en place à son compactage

L'enrobé est mis en place sur le sol support. Comme présenté dans la figure 1, le domaine considéré pour écrire un bilan d'énergie est constitué de la couche d'enrobé et d'une épaisseur du sol support. Cette épaisseur du sol support est initialisée à 50 cm, puis ajustée après une première simulation de façon à ce que la condition à la limite (5) de flux nul soit raisonnable.

Les transferts de chaleur dans ce domaine sont conductifs et monodimensionnels. A l'interface enrobé-air, une condition de continuité des flux est retenue. Ce bilan s'écrit :

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (4)$$

et est associé aux conditions aux limites suivantes :

- dans le sol, 
$$\varphi_s = \lambda_s \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

- en surface, 
$$-\lambda_e \frac{\partial T}{\partial x} = \beta h_r (T - T_\infty) + h_r (T - T_{ciel}) + I \quad (6)$$

où  $h_r$  est un coefficient d'échange par rayonnement linéarisé et où le coefficient d'échange  $h_T$  correspond soit à une convection forcée [11] soit à une convection naturelle [12] dans laquelle la dimension caractéristique retenue est la demi-largeur de la bande d'enrobé mise en œuvre.

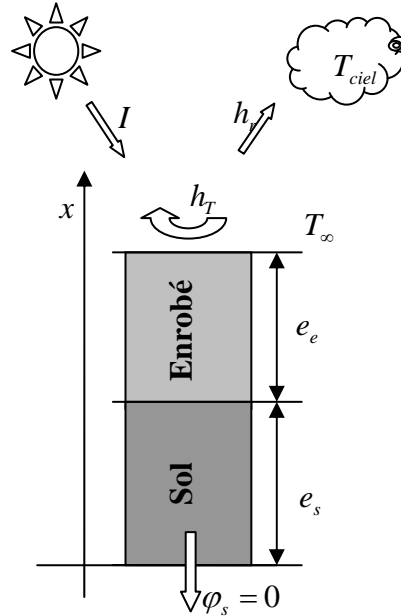


Figure 1 : Représentation des conditions aux limites utilisées dans la modélisation de l'échange thermique entre l'enrobé et son environnement

L'ajustement du paramètre  $\beta$  sur des données expérimentales est présenté au paragraphe 3. Ce paramètre d'adaptation  $\beta$  est ici introduit de façon

- à prendre en compte, pour un échange forcé, la différence existant entre la vitesse du vent « au sol » issue des fichiers météorologiques (qui correspond à des estimations à 10m du sol) et la vitesse de l'air au sol sur chantier.
- à prendre en compte, dans une moindre mesure, la différence entre l'échange entre un fluide et une plaque plane ([11]-[12]) d'une part, et l'échange entre l'atmosphère et une route d'autre part.

L'intensité solaire  $I_{solaire}$  reçue à la surface de l'enrobée est la suivante :

$$I_{solaire} = (0,828 \cdot I + b) \cdot \left(1 - \frac{Cn}{100}\right) \quad (7)$$

Elle combine l'expression du flux solaire  $I$  au sommet de l'atmosphère [13] au coefficient d'interception du flux solaire par l'atmosphère  $b = -47,4 W/m^2$  [14]. Elle prend en compte l'appréciation par l'utilisateur de la couverture nuageuse  $Cn$  (exprimée de 0 à 100%).

Les conditions initiales sont les suivantes : les températures aux nœuds du maillage situés dans l'enrobé sont initialisées à la température de l'enrobé à l'instant de sa mise en place (température issue du calcul présenté au paragraphe 2.1), les températures aux nœuds du maillage situés dans le sol sont initialisées à la température du sol (température supposée égale à la température moyenne de l'air des 24 heures précédant la mise en place), et la

température du nœud du maillage situé à l'interface de l'enrobé est la température effusive issue du contact instantané entre l'enrobé et le sol.

### 3. Calibration du modèle et mesures effectuées

Le modèle présenté au paragraphe précédent comporte deux paramètres d'ajustement  $\alpha$  et  $\beta$ . La calibration du modèle de transport a été effectuée à l'aide d'un retour d'expérience sur le refroidissement d'enrobés transportés en benne à parois simples ou doubles, bâchées ou non. Cette calibration de la phase transport amène une valeur de  $\alpha$  de l'ordre 0,5. La calibration du modèle de refroidissement de l'enrobé après mise en place a été effectuée à partir de 16 résultats expérimentaux issus de la littérature [15]. Ces résultats expérimentaux, illustrés par la figure 2, présentent l'évolution de la température moyenne de l'enrobé mesurée (trait pointillé) et calculé (trait plein) pour des épaisseurs d'enrobé allant de 38mm à 100mm, une gamme de température d'application allant de 115°C à 156°C, ceci pour divers types de sol support et de conditions météorologiques. Des thermocouples placés à différentes profondeurs de la couche d'enrobé bitumineux mise en place permettent d'estimer la température moyenne au cours du temps. L'ordre de grandeur du coefficient  $\beta$  retenu qui permet de reproduire au mieux les 16 résultats expérimentaux est du même ordre que  $\alpha$ .

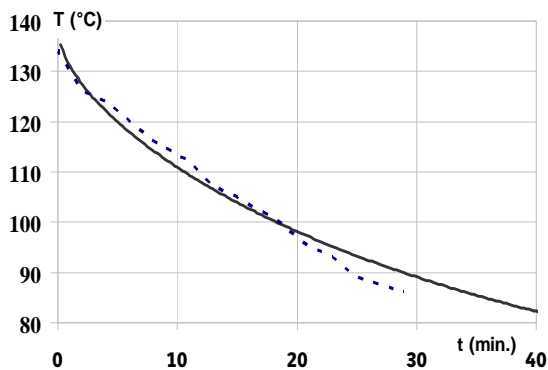


Figure 2 : Température moyenne de la couche d'enrobé bitumineux (138°C et 70mm) apposé sur une couche d'enrobé à 13,1°C. Couverture nuageuse : 0%, température ambiante : 9,2°C, vent : 2km/h.

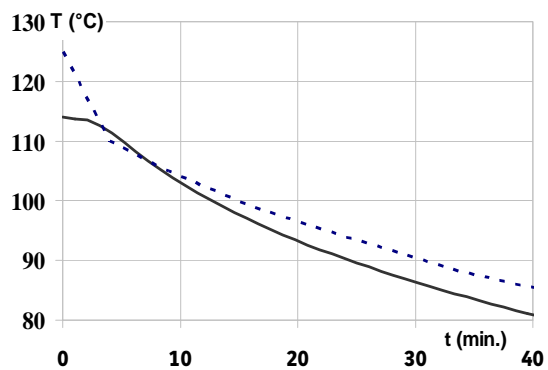


Figure 3 : Température à mi-hauteur (simulée et relevée) de la couche d'enrobé bitumineux (124°C et 70mm) apposée sur une couche d'enrobé à 20,5°C. Couverture nuageuse : 100%, température ambiante : 17°C, vent : 3km/h.

Ces coefficients d'ajustement permettent de calculer l'évolution de la température moyenne de la couche d'enrobé appliquée et ont été validé par des mesures réalisées sur divers chantiers de la société EUROVIA. Une illustration de ces mesures est présentée sur la figure 3. Lors de cette campagne de mesure, seule la température du milieu de couche a été mesurée (trait pointillé) puis comparée à la température calculée au milieu de cette même couche (trait plein). La maîtrise des conditions opérationnelles lors de cette campagne de mesure a permis de prendre en compte les caractéristiques techniques, la composition des enrobés utilisés et la diversité des sols supports. L'influence de ces critères sur les propriétés thermophysiques des enrobés est présentée dans le tableau 1.

Propriétés thermophysiques :	$C_p$ ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )	$\lambda$ ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
- de l'enrobé	800 - 1000	1,5 - 2,5
- du sol support	500 - 1000	1 - 3,5

Tableau 1 : Gamme des valeurs physiques caractérisant l'enrobé et le sol

## 4. Conclusion

La modélisation du refroidissement d'un enrobé bitumineux, d'une part semi-empirique lors son transport et théorique lors du compactage sur la chaussée d'autre part, a été réalisé puis calibrée à l'aide de résultats expérimentaux. La modélisation du refroidissement apporte un élément décisionnel permettant de calculer la juste température de fabrication des enrobés bitumineux en fonction de paramètres qui environnent la mise en œuvre de l'enrobé. La prise en compte de ces paramètres (type de camion de transport, condition climatiques, support de pose, ...) est une optimisation technique et environnementale du processus global de production et de mise œuvre des enrobés bitumineux. L'ajustement de la température permet une économie d'énergie, ainsi qu'une diminution des émissions en centrale, tout en garantissant et maîtrisant les performances mécaniques des enrobés bitumineux.

## Références

- [1] J. L. Delorme, *Manuel LCPC d'aide à la formulation des enrobés à chaud -Groupe de travail SRT « Formulation des enrobés à chaud »*, LCPC (2005)
- [2] USIRF, *Les enrobés bitumineux tome I*, RGRA (2001)
- [3] USIRF, *Les enrobés bitumineux tome II*, RGRA (2003)
- [4] SETRA/CFTR, *Utilisation des normes des enrobés à chaud*, SETRA (2008)
- [5] W. J. Kari, Mix properties as the affect the mix, *Asphalt paving technology, Proceedings: Association of asphalt paving technologist technical sessions*, 36 (1967), 295-309.
- [6] H. J. Beckedahl et Al., Impacts of the compaction degree of asphalt mixes on the asphalt pavement performance – Temperature dependent resilient modules, rutting and fatigue -, *Proceedings 4<sup>th</sup> Euroasphalt & Eurobitume congress*, Copenhagen (21-23 mai 2008), 402-034.
- [7] W. M. John, Heat transfer from spheres and other animal forms, *Biophysical Journal*, 16 (1976), 561-569.
- [8] G. D. Raithby, G.T. Hollands. A general method of obtaining approximate solutions to lamina rand turbulent free convection problems", *Advances in Heat Transfer*, 11 (1975), 31.
- [9] S. S. Kutateladze, V. M. Borishansky, *A concise encyclopedia of heat transfer*, Pergamon Press, (1966).
- [10] J. A. Duffie, W.A. Beckman, *Solar engineering of thermal process*, WILEY (1991).
- [11] J. H. Wattmuff, W.W.S. Charters, D. Proctor, Solar and wind induced external coefficients for solar collectors, *COMPLES*, No. 2, 56 (1977)., Duffie and Beckmann (1977).
- [12] E. Radziemska, W. M. Lewandowski. The effect of plate size on the natural convective heat transfer intensity of horizontal surfaces, *Heat Transfer Engineering*, 26-2 (2005), 50-53.
- [13] N. B. Guttman, J. D. Matthews, Computation of extraterrestrial solar radiation, solar elevation angle and true solar time of sunrise and sunset, *SOLMET Vol. 2- Final report*, National Climatic Center, U.S. Departement of Commerce (1979), 49-52.
- [14] J. Schmetz, Relationship between solar net radiative fluxes at the top of the atmosphere and at the surface, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 50-8 (1993), 1125.
- [15] B. A. Chadbourn et Al., An asphalt paving tool for adverse conditions – *Final report MN/RC-1998-18*, (1998).