

Modélisation du refroidissement d'une couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée sur une chaussée

Ing. Didier GRILLET
ECAM – Bruxelles

Ce modèle a été développé en collaboration avec le Centre de Recherches routières (C.R.R.). Il a pour objet la modélisation du refroidissement d'une couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée sur une chaussée. Une modélisation informatique par différences finies permet de réaliser un logiciel de calcul du temps de remise en circulation. Le modèle a été validé par une campagne d'essais sur chantier. Cet article est la synthèse d'un travail de fin d'études ayant obtenu le prix de l'AIECAM et le prix du CERDECAM.

Mots-clés : route, enrobé bitumineux, refroidissement, viatemp

This model was developed in collaboration with the Belgian Road Research Center (B.R.R.C.). Its object is the modeling of the cooling of a layer of bitumen binder lately posed on a road. A data-processing modeling by finite differences makes it possible to carry out a computation software of the time of reopening with circulation. The model was validated by a trial run on site. This paper is the summary of a thesis which won both the AIECAM and CERDECAM awards.

Keywords : road, bitumen binder, cooling, viatemp

1. Introduction

La gestion du réseau routier impose de nombreux travaux impliquant la pose d'enrobé bitumineux. Il peut s'agir de l'entretien de chaussées existantes, de la création de nouvelles routes, voire encore de la réalisation de parkings, aires de stockage, pistes d'aéroports, etc. Un des problèmes qui se présente alors aux entreprises de ce secteur et aux maîtres d'ouvrage est d'estimer le temps à attendre avant de pouvoir remettre la chaussée en service. Jusqu'ici, ce délai était bien souvent laissé à l'appréciation de l'entrepreneur ou du gestionnaire. D'une part, les moyens de contrôle de la température sur chantier sont souvent fort sommaires voire inexistant ; d'autre part, il n'est possible d'obtenir une image de la température qu'en surface de l'enrobé. Or, c'est au cœur de la couche d'enrobé que la température est la plus importante.

La réouverture trop rapide au trafic est susceptible de provoquer des dégradations prématurées, notamment de l'orniérage, à cause de l'instabilité de la couche nouvellement posée.

Par précaution, on peut être amené à remettre la voirie sous trafic plus tard que nécessaire. Du point de vue de l'utilisateur de la chaussée, les inconvénients sont alors prolongés: nous pensons à une augmentation du temps d'attente dans un éventuel embouteillage induit par le chantier, une augmentation des émissions de gaz d'échappement et donc de la pollution, et enfin, une augmentation du risque d'accidents inhérents aux conditions de chantier.

Ce modèle a pour objet de déterminer le temps optimal de remise en circulation après la pose d'une couche d'enrobé bitumineux. La réduction de ce temps d'attente va avoir comme conséquence une réduction des nuisances occasionnées à l'utilisateur de la chaussée.

2. Méthode

Tout d'abord, nous allons étudier les différents transferts de chaleur qui interviennent dans le refroidissement de la chaussée.

L'ensemble est intégré dans un système d'équations, résolu par le biais d'un programme informatique développé spécialement pour cette application. Afin de valider le modèle, une série d'essais ont été réalisés sur chantier. Le

programme informatique doit permettre, à terme, de faire varier les paramètres dans le but de réaliser des abaques facilement utilisables par les hommes de terrain.

3. Approche de la théorie des transferts thermique

Dès que l'enrobé bitumineux est posé, le milieu est en déséquilibre thermique. C'est alors que trois phénomènes dissipatifs interviennent. Ils engendrent une évolution vers une situation d'équilibre. Il s'agit de la *conduction*, de la *convection* et du *rayonnement terrestre*. Il se produit également deux phénomènes d'apport calorifique qui ralentissent le refroidissement: le *rayonnement solaire* dont une partie est réfléchi dès son arrivée à la surface de l'enrobé bitumineux (*albédo*) et le *rayonnement atmosphérique*.

Les différents échanges thermiques qui interagissent entre la surface du sol et l'environnement peuvent être schématisés de la manière suivante (fig. 1)

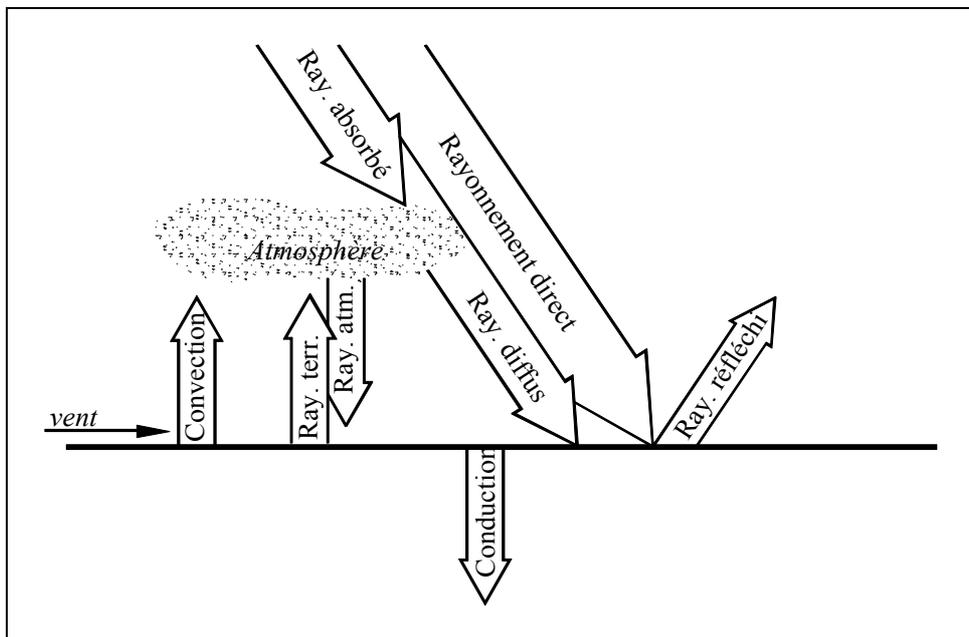


Figure 1 : Principaux échanges thermiques entre la surface du sol et l'environnement.

3.1 Conduction

La conduction s'explique par le fait d'une différence de température entre l'enrobé bitumineux et le support. Un flux de chaleur apparaît par contact solide au sein de la couche d'enrobé ainsi que dans l'ensemble du massif qui la supporte.

La loi phénoménologique de Fourier, dans le cas particulier d'un milieu isotrope, permet d'écrire que la densité de flux est proportionnelle au gradient de température:

$$\dot{q}_\lambda = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \quad (\text{W/m}^2)$$

où \dot{q}_λ est la densité de flux de chaleur échangée par conduction dans la direction 'n' (W/m²) ;
 T est le champ de température (°C) ;
 λ est la conductivité thermique du milieu (W/m^o.C) ;
 n est la direction considérée.

3.2 Convection

La convection se définit comme un échange thermique entre la surface de l'enrobé bitumineux et l'air qui l'entoure. Cet échange est d'autant plus important que la vitesse du fluide (vitesse du vent) est élevée.

$$\dot{q}_h = h \cdot (T_{paroi} - T_{air}) \quad (\text{W/m}^2)$$

où \dot{q}_h est la densité de flux de chaleur échangé par convection orienté depuis le corps vers l'ambiance (W/m²) ;
 h est le coefficient de convection (W/m².K) ;
 T_{paroi} est la température de la paroi où se déroule l'échange convectif – dans notre cas, la surface du sol (°C) ;
 T_{air} est la température de l'air (°C).

3.3 Rayonnements solaires.

Si l'on considère une surface disposée sur le sol terrestre, celle-ci reçoit une certaine quantité de rayonnement solaire, à savoir *un rayonnement solaire global*. Cette quantité de rayonnement global est la somme de deux composantes de rayonnement solaire.

La première d'entre elles est *le rayonnement direct*. Celui-ci est défini comme étant le flux énergétique transmis dans un angle solide limité au disque solaire. Il a bien entendu la direction du rayonnement solaire incident.

La seconde est *le rayonnement diffus*. Il s'agit de la part du flux solaire provenant de l'hémisphère céleste duquel on a extrait le disque solaire et dirigé vers le sol. Ce rayonnement n'a pas de direction privilégiée.

Une partie du rayonnement solaire n'atteint pas la surface terrestre en tant que tel. Il s'agit de la part de *rayonnement absorbé*.

Tous ces rayonnements solaires sont bien entendu variables en intensité. L'importance de la puissance absolue et relative de chaque rayonnement dépend de toute une série de facteurs que nous allons découvrir dans les quelques paragraphes ci-dessous.

Grandeurs liées au temps.

En première approche, il semble évident d'affirmer que le rayonnement solaire varie avec le temps. La Terre tourne autour du Soleil en approximativement une année. (fig.2)

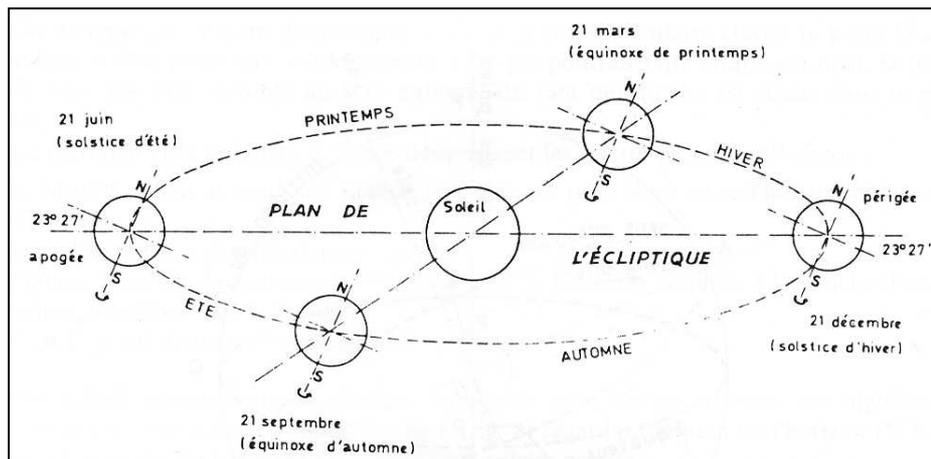


Figure 2 : Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil

Durant sa révolution autour du Soleil, la Terre suit une trajectoire elliptique dans un plan appelé écliptique. De part ce fait, l'énergie que le Soleil fournit à la Terre est variable et dépend de la distance Terre-Soleil. L'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre/Soleil ne varie que de $\pm 1,7\%$ par rapport à la distance moyenne valant 149 675 000 km. Ce phénomène est un premier facteur qui influence l'intensité du rayonnement solaire.

Ensuite, nous pouvons constater que l'écliptique, vis-à-vis du plan équatorial terrestre, est incliné d'un angle approximativement constant de $23,45^\circ$. Ceci est à la base des saisons terrestres et engendre donc une variation du flux solaire.

Enfin, la rotation de la Terre autour de l'axe des pôles va, bien entendu, influencer l'intensité horaire du rayonnement solaire.

Facteur climatique

L'importance du couvert nuageux est particulièrement déterminante dans la quantification du rayonnement solaire qui traverse l'atmosphère. En effet, le rayonnement direct est d'autant plus faible que la nébulosité est importante. Elle influence également considérablement le rayonnement diffus.

C'est la raison pour laquelle nous définissons trois conditions de couvert nuageux qui serviront lors de la quantification des apports solaires: *le ciel serein, le ciel totalement couvert et, situation intermédiaire, le ciel partiellement couvert.*

Latitude ϕ et longitude l du lieu.

La quantité de rayonnement solaire reçue en un point donné de la Terre dépend de la latitude du lieu considéré. L'angle d'incidence du rayonnement solaire est donc dépendant de la position géographique du lieu considéré.

Masse d'air optique m

L'épaisseur d'air traversée par le rayonnement solaire est bien entendu plus importante lorsque le Soleil est à l'horizon que lorsque celui-ci est au maximum de sa hauteur.

Cette variation horaire de l'épaisseur d'air traversée par le rayonnement solaire se dissimule dans la notion de masse d'air optique.

La masse d'air optique se définit par la formule suivante:

$$m = \frac{X}{H} \text{ (s.d.)}$$

où : H est la longueur du trajet dans l'atmosphère d'un rayon solaire d'angle zénithal nul ;
 X est la longueur du trajet dans l'atmosphère d'un rayon solaire d'angle zénithal ζ .

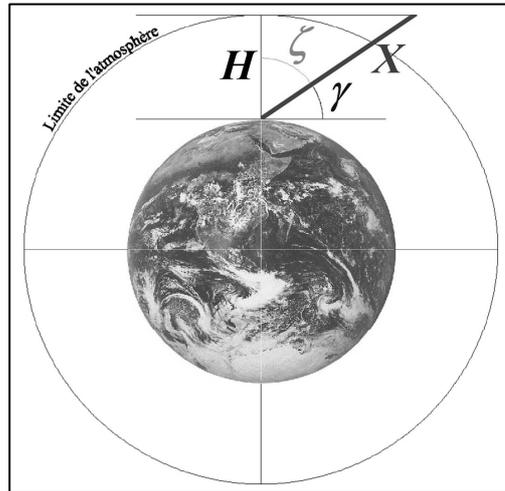


Figure 3 – Définition des distances intervenant dans le calcul de m

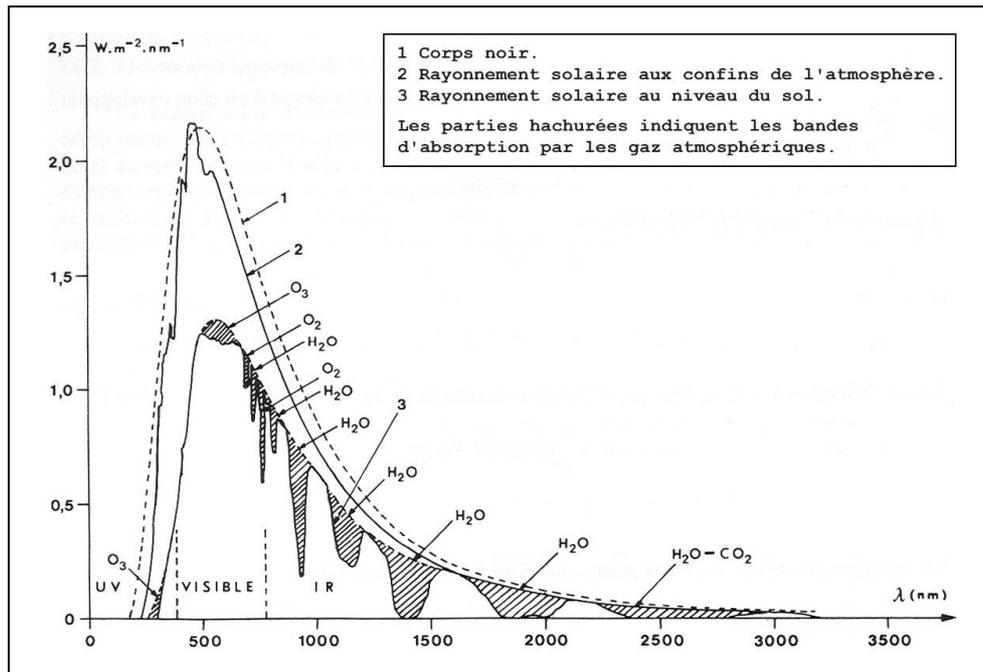
Extinction du rayonnement solaire lors de sa traversée de l'atmosphère.

A la limite de l'atmosphère, nous recevons une certaine quantité d'énergie rayonnée. Comme on peut le voir à la figure 4, le rayonnement solaire est atténué lors de sa traversée de l'atmosphère par quelques-uns de ses constituants.

Cette atténuation est notamment due à l'absorption du rayonnement par les gaz de l'atmosphère et la vapeur d'eau. Les principaux gaz naturellement présents dans l'atmosphère qui limitent le domaine spectral sont l'ozone (O_3), la vapeur d'eau (H_2O) et le dioxyde de carbone (CO_2).

De plus, il y a lieu de prendre en compte diverses perturbations qui affectent le flux solaire incident lors de sa traversée de l'atmosphère jusqu'à la surface de la Terre. Il peut s'agir par exemple d'une éruption volcanique ou

d'émanations de vapeur d'eau issues d'une tour de refroidissement. Il peut également s'agir de pollution atmosphérique.



Chacun de ces constituants filtre le rayonnement solaire avec une importance variable qui dépend de la longueur d'onde du rayonnement. Le taux de pénétration du rayonnement solaire dans l'atmosphère peut s'exprimer par un *facteur de trouble atmosphérique* T_L . Celui-ci représente "le rapport entre l'extinction du rayonnement solaire traversant une atmosphère sous une incidence donnée et celle du rayonnement solaire traversant une atmosphère de référence constituée uniquement d'air pur et sec, sous une même incidence du faisceau solaire." ¹

L'Institut Royal Météorologique (IRM) a intégré le trouble atmosphérique dans des fonctions issues d'une étude statistique.

¹ La définition est issue de Réf.[3]

Finalement, l'ensemble de ces facteurs permettent, par le biais de formules élaborées par l'IRM, de quantifier les rayonnements solaires direct et diffus dans n'importe quelle configuration temporelle et géographique.

3.4 Rayonnement atmosphérique ($L\downarrow$)

L'énergie absorbée par les constituants de l'atmosphère est essentiellement convertie en énergie radiative de grande longueur d'onde. Etant donné que tout corps rayonne proportionnellement à la quatrième puissance de sa température (loi de Stephan-Boltzmann), les molécules émettent à leur tour de l'énergie radiative et donnent ainsi naissance au *rayonnement atmosphérique*.

Le rayonnement atmosphérique peut s'écrire :

$$L\downarrow = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot (T_{air} + 273,16)^4 \quad (\text{W/m}^2)$$

$$\text{où :} \quad \varepsilon_a = \varepsilon_0 \cdot (1 + 0,12 N^2)$$

$$\varepsilon_0 = 1 - 0,261 \cdot e^{0,000777 \cdot T_{air}^2}$$

ε_0 et ε_a sont respectivement les émissivités de l'air par ciel serein et par ciel couvert. N représente la fraction du ciel couvert exprimée en pourcentage. T_{air} est la température de l'air ambiant exprimée en degrés Celsius.

σ est la constante de Stephan-Boltzmann: $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$

3.5 Rayonnement terrestre ($L\uparrow$)

Pour la même raison que le rayonnement atmosphérique, l'enrobé bitumineux émet un rayonnement de grande longueur d'onde (infrarouge) vers la voûte céleste pour engendrer le *rayonnement terrestre*. Celui-ci peut se quantifier par l'expression suivante :

$$L\uparrow = \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot (T_s + 273,16)^4 \quad (\text{W/m}^2)$$

T_s est la température de la surface du revêtement (en °C); ε_s est l'émissivité de la surface de l'enrobé bitumineux qui est comprise entre 0,88 et 0,95.

4. Détermination des paramètres

4.1 Paramètres thermiques des matériaux constitutifs d'une chaussée.

Il est possible de classer les chaussées revêtues d'enrobé bitumineux dans une de ces trois catégories (tableau 1):

- Une *chaussée souple* est revêtue d'enrobé bitumineux sur fondation non liée composée de matériaux de rigidités décroissantes.
- Une *chaussée semi-rigide* se compose d'un revêtement bitumineux sur fondation liée, ce qui confère à la structure une rigidité plus importante.
- Un *overlay sur béton* est une chaussée rigide, c'est-à-dire, un revêtement en béton de ciment sur fondation liée ou non, revêtue d'une couche d'enrobé bitumineux.

SOUPLE		SEMI-RIGIDE		OVERLAY	
Constituant	Ep. (cm)	Constituant	Ep. (cm)	Constituant	Ep. (cm)
Enrobé bitumineux	6 à 30	Enrobé bitumineux	6 à 30	Enrobé bitumineux	1,5 à 5
Empierrement	15 à 30	Béton maigre	15 à 20	Béton	18 à 23
Sous-fondation	15 à 80	Empierrement éventuel	15 à 30	Empierrement ou béton maigre	15 à 20
Sol d'assiette		Sous-fondation	15 à 80	Sous-fondation	15 à 80
		Sol d'assiette		Sol d'assiette	

Tableau 1 – Compositions classiques de chaussées.

Au vu des constituants principaux d'une chaussée, nous pouvons en déterminer les matériaux qui vont être couramment rencontrés en travaux routiers et en déduire leurs propriétés thermiques parmi lesquelles nous pouvons distinguer :

- La *conductivité thermique* ' λ ' caractérise la facilité avec laquelle la chaleur va s'écouler dans un matériau.
- La *chaleur spécifique* ' c ' est la capacité calorifique par unité de masse. La capacité calorifique est elle-même définie comme la quantité de chaleur à produire pour provoquer une augmentation de 1 degré Kelvin du corps considéré.
- La *diffusivité thermique* ' a ', qui exprime l'aptitude d'un corps à transmettre la chaleur plutôt qu'à l'absorber. Plus la chaleur met de temps à traverser un corps et plus sa diffusivité est faible.

4.2 Détermination de la température de remise en circulation.

Dans le cadre de cette étude, il n'est d'aucune utilité de réaliser un modèle de refroidissement d'une couche d'enrobé bitumineux si l'on ne connaît pas le critère de remise en circulation. En d'autres termes, il nous faut déterminer une température en deçà de laquelle on considère que le trafic n'occasionne pas de dégât à la nouvelle chaussée.

Température de ramollissement Anneau et Bille (T_{AB})

Il s'agit de la température pour laquelle un disque horizontal normalisé de bitume se ramollit suffisamment que pour permettre à une bille d'acier normalisée de descendre d'une hauteur de 25,4 millimètres. (fig.5)

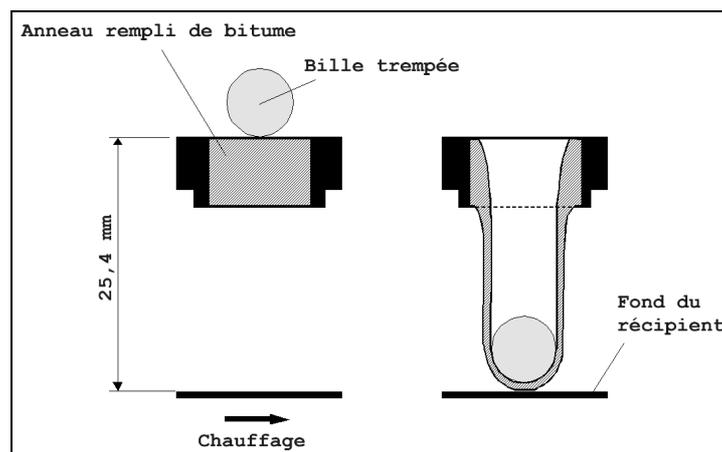


Figure 5 : Principe de l'essai de détermination de T_{AB}

Essai de pénétration (pen)

L'essai de pénétration mesure l'enfoncement d'une aiguille lestée et normalisée dans un échantillon de bitume pour différentes températures. Il sert à déterminer la classe des liants. Par exemple, un liant 20/30 aura une pénétration située entre 20 et 30 dixièmes de millimètres. (fig.6)

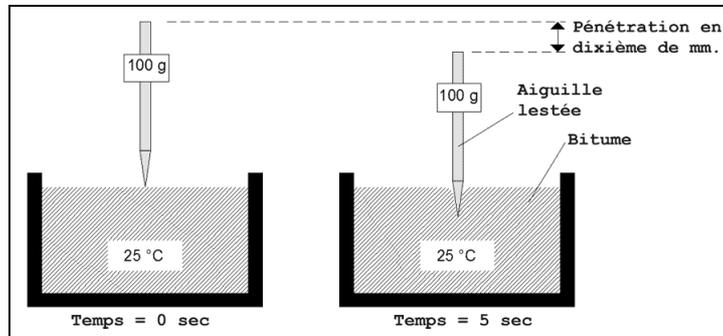


Figure 6 : Principe de l'essai de pénétration d'un bitume.

Température de remise en circulation.

A défaut de pouvoir réaliser une campagne d'essais sur des éprouvettes d'enrobés différents, nous pouvons valablement admettre que la température de remise en circulation soit égale aux 2/3 de la température de ramollissement Anneau et Bille (AB). Réf. [10]

$$T_{\text{équilibre}} = \frac{2}{3} \cdot T_{AB} \quad (^\circ\text{C})$$

Voici à titre indicatif les températures de ramollissement Anneau et Bille des bitumes routiers (tableau 2):

Classes (pen)	20/30	35/50	50/70	70/100
T _{AB} (°C)	55-63°C	50-58°C	46-54°C	43-51°C

Tableau 2 : Température de ramollissement Anneau et Bille des bitumes routiers.

5. Mise au point du modèle.

5.1 Hypothèses

Les hypothèses suivantes ont été retenues pour la résolution du système :

1. Le massif est infini dans le plan horizontal.
2. Il est possible de rencontrer des couches sous-jacentes de nature différente. Leurs propriétés thermiques sont en général différentes. Du point de vue des paramètres thermiques, nous allons donc supposer que

le massif se divise en ' n ' couches qui se superposent ; chacune d'entre elles étant considérée comme homogène et isotrope.

3. La vitesse du vent et les conditions de nébulosité sont supposées constantes sur la durée du refroidissement.
4. Les effets de bords (pour la couche nouvellement posée) ne sont pas pris en compte.
5. Tout apport d'eau éventuel à la surface du revêtement est négligé.
6. Le rayonnement solaire agit uniquement sur la surface du revêtement et ne constitue pas une source interne de chaleur. ($\varphi = 0$)
7. Pour tout point du massif, l'hypothèse de conservation du flux est d'application.
8. La température à une profondeur de 1 mètre est supposée ne pas être influencée par l'apport calorifique de l'enrobé bitumineux nouvellement posé. Cette hypothèse est confirmée par une simulation de la pénétration de l'onde thermique dans le massif avec le programme réalisé.
9. La distribution initiale est la suivante : Au sein de la couche d'enrobé nouvellement posée, la température est uniforme et est égale à la température de pose (+/- 160 °C). Au sein du massif de support, la température est également supposée uniforme.

5.2 Résolution du système d'équations

Le système d'équations a été résolu par différences finies. Cette méthode de résolution permet de résoudre des systèmes d'équations différentielles en progressant de proche en proche selon un pas fixé. La résolution n'est pas présentée dans cet article. Nous renvoyons le lecteur désireux d'en apprendre davantage à Réf [1].

Le modèle a été intégré dans un logiciel informatique développé pour cette application.

Le logiciel se nomme **ViaTemp** et est téléchargeable à l'adresse <http://www.grillet.be/viatemp/>.

6. Applications du modèle

Nous tentons ici de découvrir les résultats qu'il est possible d'obtenir avec le logiciel. Ces résultats sont présentés à titre d'exemple. Ils permettent de se rendre compte valablement des capacités du logiciel. Nous choisissons une composition de chaussée « modèle » que nous utilisons dans le logiciel pour présenter et interpréter les résultats que le logiciel peut calculer.

6.1 Températures maximales et à la surface de l'enrobé.

Sur la figure 7, les températures de surface et maximales ont été superposées. La température maximale correspond à celle qui règne à l'endroit le plus chaud de la couche d'enrobé nouvellement posée. Afin de se rendre compte de l'importance de l'apport solaire, la modélisation présentée ici a été effectuée en plein été par ciel serein. Il est possible de constater que, durant la période où le rayonnement solaire est très intense (autour de 14h00), le refroidissement est ralenti.

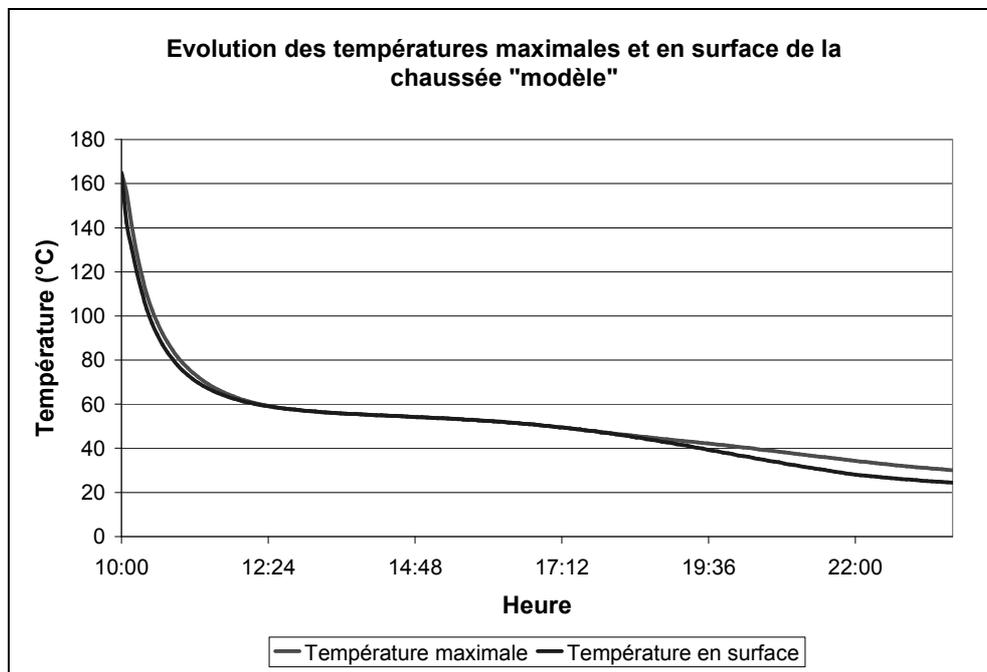


Figure 7 : Evolution des températures maximales et en surface de la chaussée.

6.2 Gradient de température au sein du massif.

La figure 8 illustre la température de l'ensemble du massif jusqu'à une profondeur de 1 mètre pour différents instants. Chaque courbe correspond aux températures dans le massif à un instant déterminé.

Au début du refroidissement, la température est maximale approximativement au centre de la couche d'enrobé nouvellement posée.

Cela correspond à ce que l'on peut instinctivement imaginer.

En effet, la surface supérieure de l'enrobé nouvellement posé est le siège d'un phénomène de convection et de rayonnement vers l'atmosphère. Les calories trouvent donc un chemin privilégié pour s'extraire de l'épaisseur d'enrobé.

La surface inférieure, quant à elle, se retrouve, lors de la pose, en contact avec un support approximativement à température ambiante. Ici, le gradient thermique entre la nouvelle couche et le support est tel que la température chute rapidement au droit de cette interface.

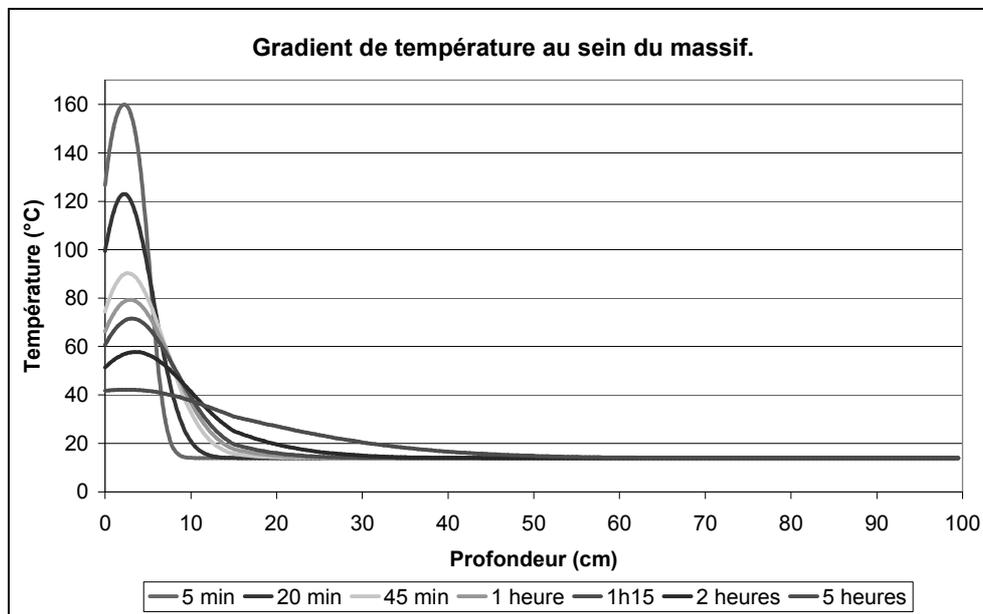


Figure 8 : Gradient de température au sein du massif.

6.3 Influence de la nébulosité sur le délai de remise en circulation.

Le couvert nuageux a toute son importance dans le refroidissement de la chaussée. En effet, l'intensité nuageuse va influencer d'une part le flux solaire qui ralentit le refroidissement et d'autre part, la température de l'air.

Deux simulations ont été réalisées pour la même date. La première, dans des conditions de ciel serein, la seconde, dans des conditions de ciel totalement couvert.

Le graphique ci-dessous illustre le refroidissement de la chaussée pour les deux situations précitées. Nous constatons bien entendu que le refroidissement par ciel couvert est sensiblement plus court que celui par ciel serein. (fig.9)

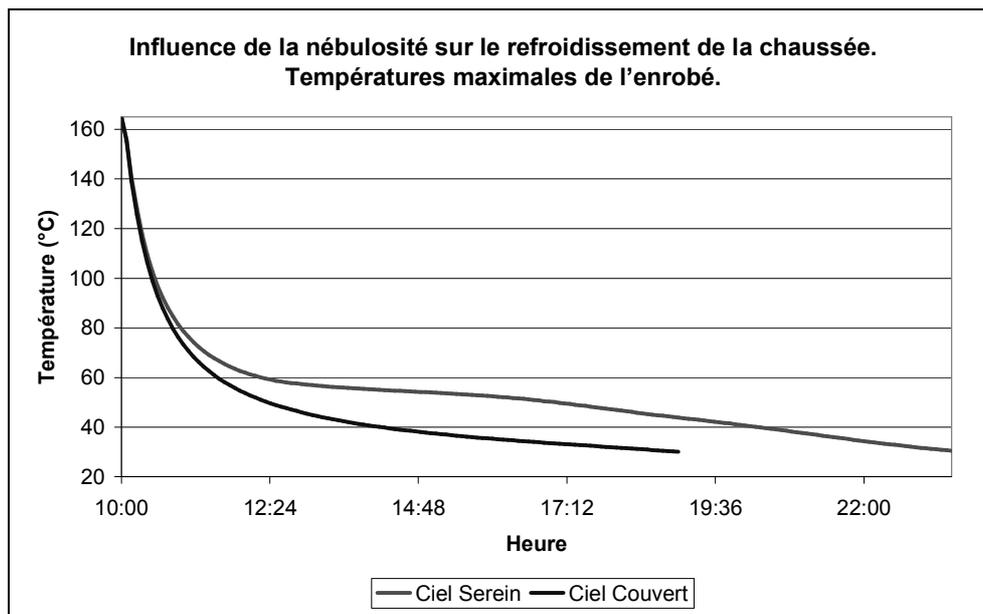


Figure 9 : Influence de la nébulosité sur le refroidissement de la chaussée.

6.4 Influence de l'épaisseur de la couche d'enrobé bitumineux sur son refroidissement.

Nous tentons ici de découvrir dans quelle mesure le refroidissement est influencé par l'épaisseur de la couche d'enrobé nouvellement posée. Faisons varier l'épaisseur de la couche de roulement de la chaussée de 3 à 7 cm.

Tous les autres paramètres restent constants. La figure 10 illustre l'évolution des températures maximales dans l'enrobé. Nous constatons que le délai de refroidissement est intimement lié à l'épaisseur e de la couche d'enrobé posée.

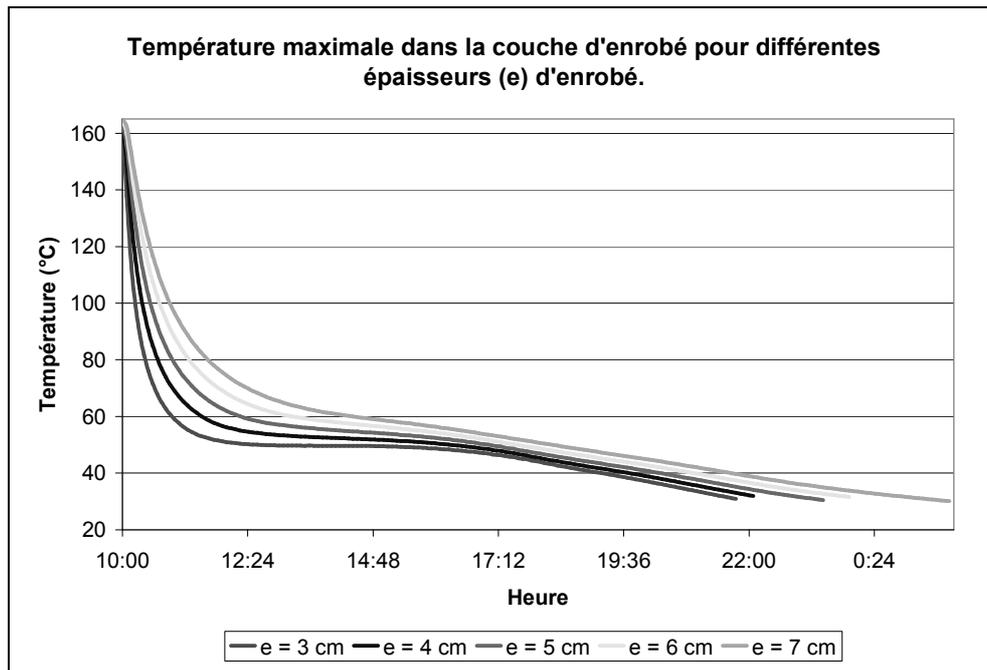


Figure 10 : Température maximale dans la couche d'enrobé pour différentes épaisseurs (e) d'enrobé.

6.5 Influence de la vitesse du vent sur le délai de remise en circulation.

Afin de constater l'importance de l'influence du vent sur le délai de remise en circulation, nous avons fait varier sa vitesse V de 0,5 à 10 m/s pour la chaussée. Nous constatons, bien entendu, que la vitesse de refroidissement augmente avec la vitesse du vent. L'influence de ce paramètre est loin d'être négligeable. (fig.11)

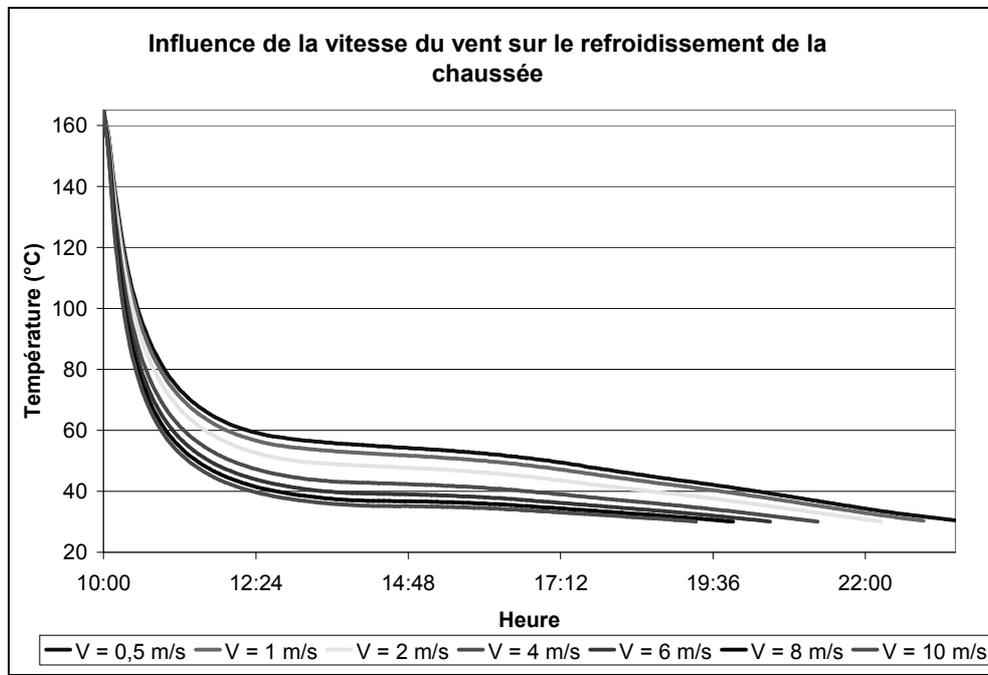


Figure 11 : Influence de la vitesse du vent sur le refroidissement de la chaussée.

7. Validation du modèle

7.1 Méthodologie

Cette méthode prévisionnelle a fait l'objet d'une validation sur chantier. La méthodologie appliquée pour la mesure de l'évolution de la température à la surface de la couche d'enrobé nouvellement posée était la suivante :

- Mesure de la *température de l'enrobé* dans la trémie du finisseur à l'aide d'une sonde de température.
- Mesure de la *température de l'air*, à l'abri du vent.
- Mesure de la *vitesse moyenne du vent* avec un anémomètre.
- Mesure de la *température de l'enrobé bitumineux* nouvellement posé, pendant et après le compactage, à intervalles de 3 à 10 minutes à l'aide d'un thermomètre infrarouge.

Comme l'illustre la figure 12, les mesures de températures de l'enrobé sont réalisées à 3 *emplacements* différents au minimum, au centre de la bande

d'enrobé, à distance suffisante d'éléments perturbateurs (chambres de visite, trous, etc.). Pour chaque emplacement, la température est relevée en 3 positions, chacun des points correspondants étant disposé en triangle comme l'illustre la photo ci-dessous. Une caisse en carton préserve la mesure d'une éventuelle influence du vent.

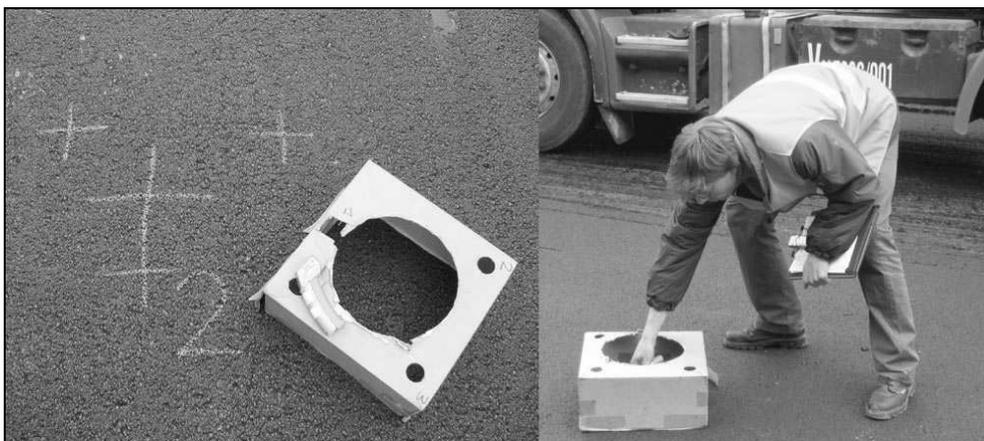


Photo 1 : Mesure de la température de l'enrobé à l'aide du thermomètre

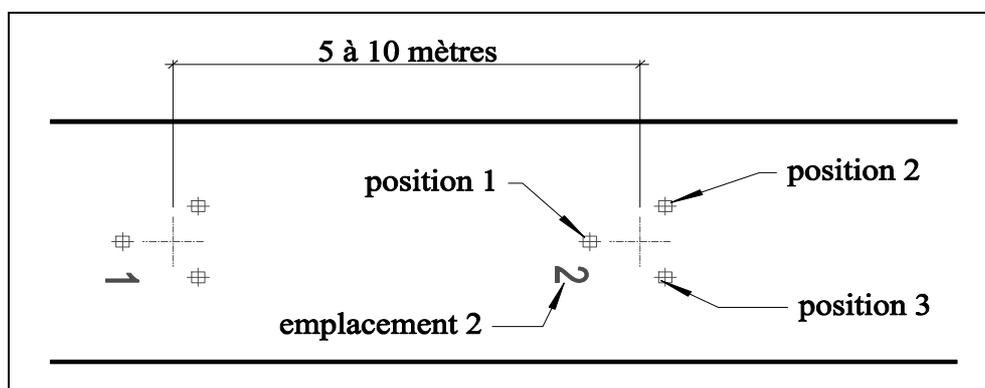


Figure 12 – Schéma en plan de la disposition des emplacements et positions des mesures.

La campagne de mesures a été réalisée sur sept chantiers. Pour chaque chantier, nous avons pu observer une très bonne corrélation entre les mesures et le modèle. Nous avons ici présenté les résultats de deux chantiers.

7.2 Chantier de Vilvoorde.

Le chantier est situé à proximité du canal de Bruxelles-Charleroi (*Budasteenweg*). Le nouvel enrobé est posé sur un revêtement bitumineux existant partiellement fraisé.

Date :	T° moyenne de l'air :	T° initiale du support
10-avr-05	10,5°C	10°C
Nébulosité :	Humidité	Vitesse moy. du vent
85% de ciel couvert	Temps sec	1,24 m/s

Tableau 3 : Contexte du chantier de Vilvoorde.

Les mesures ont été réalisées à quatre emplacements différents. Pour chaque emplacement, le résultat de la modélisation concorde très valablement avec les mesures. La figure 13 illustre l'évolution des températures mesurées et modélisées.

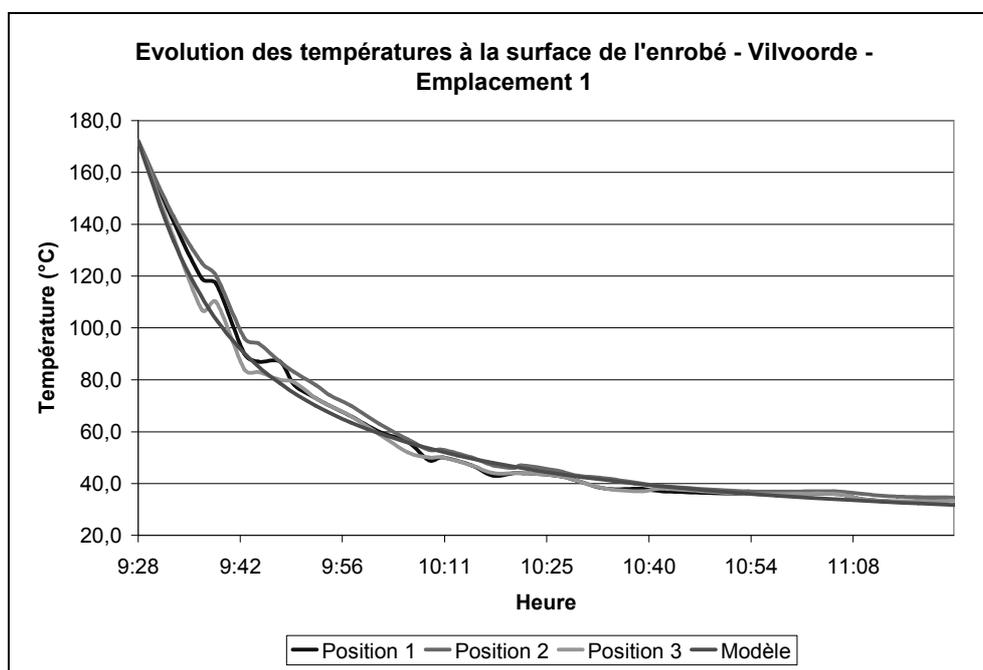


Figure 13 : Evolution des températures de la surface de l'enrobé

7.3 Chantier de Neufchâteau

Ces mesures comportent la particularité d'avoir été effectuées en plein été par ciel totalement dégagé (tableau 4). Nous pouvons donc nous attendre à ce que le refroidissement soit fortement influencé par le rayonnement solaire.

Date :	T° moyenne de l'air :	T° initiale du support
09-juil-03	+/- 25°C	21°C
Nébulosité :	Humidité	Vitesse moy. du vent
Ciel serein	Temps sec	de 0 à 0,5 m/s

Tableau 4 : Contexte du chantier de Neufchâteau.

Les résultats de la modélisation de l'ensemble des emplacements concordent avec les mesures. (fig. 14)

Etant donné que la valeur de la force du vent n'est pas connue avec exactitude – nous ne disposons pas d'anémomètre à l'époque – nous avons réalisé deux modélisations. La première modélisation est effectuée avec une vitesse du vent nulle. Pour la seconde la vitesse du vent a été fixée à 0,5 m/s.

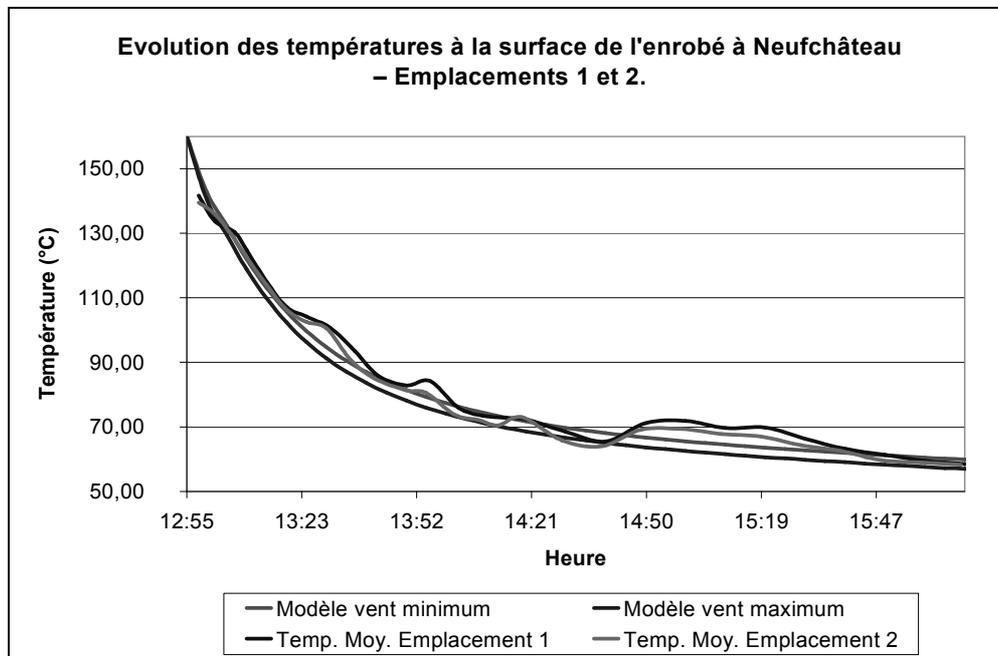


Figure 14 : Evolution des températures à la surface de l'enrobé

8. Conclusions

La modélisation du refroidissement d'une couche d'enrobé bitumineux a conduit à l'étude:

- du rayonnement solaire, des rayonnements atmosphérique et terrestre,
- de la conduction et de la convection.

La mise en équation de l'ensemble des transferts thermiques et la résolution du système par différences finies a présenté un bel exemple d'étude d'écoulement en régime transitoire.

Le modèle qui en découle est facilement utilisable par le biais d'un logiciel informatique développé pour cette application. Ce modèle a été confronté à la réalité des chantiers de pose d'enrobé par la biais de la validation. Cette dernière a permis de mettre en évidence l'intérêt et la validité du modèle.

Le modèle théorique permet d'approcher de manière fiable la réalité d'un chantier. Il ne faut cependant pas perdre de vue que des conditions de chantier ne sont jamais aussi idéales que ce que le modèle considère.

Cependant, malgré cette difficulté, il est possible d'utiliser le logiciel pour obtenir une bonne idée du délai de remise en circulation. Le modèle peut être utilisé dans un but de recherche appliquée en vue, par exemple, d'optimiser les délais de remise en circulation, d'étudier l'incidence d'un matériau constitutif d'une chaussée sur son refroidissement, d'optimiser l'élaboration des plannings de chantier.

En faisant varier les divers paramètres, nous nous sommes rendus compte de l'importance de chacun d'eux. Certains, comme la localisation géographique (longitude et latitude du lieu) ont peu d'importance, dans la mesure où l'on reste en Belgique. D'autres, par contre, ont une importance considérable. Parmi ceux-ci, nous retenons l'épaisseur de l'enrobé, la vitesse du vent, l'heure de fin de pose, l'importance du couvert nuageux, l'époque de l'année, la nature des matériaux constituant le massif et la température initiale du support.

A terme, le modèle va être utilisé par le Centre de Recherches Routières en vue de réaliser des abaques utilisables par l'homme de terrain. Il peut également être modifié dans un but de calcul de contraintes thermiques dans une chaussée en service engendrées par un apport solaire estival important ou une déperdition calorifique hivernale.

Malgré une étude théorique des échanges de chaleur a priori fastidieuse et la prise en compte de nombreux paramètres, le logiciel reste facilement accessible et les résultats sont présentés de manière synthétique en vue d'une utilisation aisée sur le terrain.

9. Références bibliographiques

- [1] GRILLET D., (2005) : « *Modélisation de l'évolution des températures dans une couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée en vue de déterminer le temps de remise en circulation de la chaussée.* », ECAM, Bruxelles, Belgique.
- [2] DOGNIAUX R., (1973): "*Eclaircissement énergétique par ciel serein des parois orientées et inclinées*", Institut Royal Météorologique de Belgique, Bruxelles, Belgique
- [3] DOGNIAUX R., (1984): "*Eclaircissement énergétique solaire direct, diffus et global des surfaces orientées et inclinées*", Institut Royal Météorologique de Belgique, Bruxelles, Belgique
- [4] DOGNIAUX R., (1982): "*Les rayonnements solaire, atmosphérique et terrestre*", Institut Royal Météorologique de Belgique, Bruxelles, Belgique
- [5] DE BACKER C., (1979): "*Les températures dans les structures routières. Mesures expérimentales – méthode prévisionnelle*", Centre de Recherches Routières, Bruxelles, Belgique
- [6] GROUPE DE TRAVAIL DRD-1., (1997): "*Code de bonne pratique pour la formulation des enrobés bitumineux*" Centre de Recherches Routières, Bruxelles, Belgique.
- [7] JEAN CÔTÉ ET JEAN-MARIE KONRAD, « *Périodes à risque de givrage différentiel sur le territoire québécois* », Rapport CREIG-S2
- [8] PILATE, O et LEONARD Didier, (2004): « *Evolution des températures dans l'asphalte nouvellement posée* », Centre de recherches routières, Bruxelles, Belgique.
- [9] GOBERT, Y (2004) : « *Cours de routes*», ECAM, Bruxelles, Belgique .
- [10] COST 336, « *Falling Weight Deflectometer – Final Report of the Action* ».

10. Remerciements

L'auteur tient à remercier Olivier PILATE du C.R.R. et Yves GOBERT de l'ECAM, respectivement Promoteur et Tuteur du travail de fin d'études.