



## *Evolution de la température d'une couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée*

Olivier Pilate



Compte rendu de recherche

CR 42/06



# **Evolution de la température d'une couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée**

par

Olivier PILATE

CR 42/06

Édité par le Centre de recherches routières  
Établissement reconnu par application de l'Arrêté-loi du 30 janvier 1947  
Boulevard de la Woluwe 42 - 1200 Bruxelles

Tous droits de reproduction réservés



## Remerciements

L'auteur remercie C. Van Rooten, directeur général du Centre de recherches routières (CRR) et C. Moraux, directeur et chef de la division *Sécurité et gestion routière* pour lui avoir permis de réaliser cette recherche.

L'auteur remercie en particulier D. Grillet et Y. Gobert (Institut supérieur industriel ECAM) pour la modélisation des différentes formes de rayonnement, la mise au point du logiciel d'évolution de la température basé sur le modèle de calcul final et leur aide pour la validation de ce dernier.

Il remercie également chaleureusement D. Léonard pour son aide précieuse dans l'élaboration de la première approche du modèle, J. Feremans pour sa disponibilité et le temps passé sur chantier à valider le modèle de calcul et B. Berlémont pour l'implémentation du logiciel EvalTREB LE.

Enfin, que soient remerciés ses collègues du service *Information*, M. Van Bogaert et F. Verhoeven, pour la traduction et la mise en forme de ce compte rendu de recherche.



# Table des matières

## Remerciements

<b>Introduction</b>	1
<b>Partie A – Modèles de calcul</b>	3
<b>A.1 Elaboration d'un premier modèle de calcul restreint</b>	5
A.1.1 Evolution des températures dans une couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée	5
A.1.1.1 Transfert de chaleur par conduction	6
A.1.1.2 Transfert de chaleur par convection	6
A.1.1.3 Evolution des températures dans la structure	7
A.1.2 Implémentation du modèle de calcul restreint	10
A.1.3 Détermination des paramètres nécessaires au modèle de calcul restreint	10
A.1.3.1 Coefficient de convection	10
A.1.3.2 Caractéristiques thermiques des matériaux	11
A.1.3.3 Température de pose de l'enrobé bitumineux	11
A.1.3.4 Température moyenne du massif	11
A.1.3.5 Température de la couche d'enrobé bitumineux après refroidissement	11
A.1.4 Validation et limitations du modèle de calcul restreint	14
A.1.4.1 Méthodologie	14
A.1.4.2 Caractéristiques des chantiers de validation	16
A.1.4.3 Comparaison entre le modèle de calcul restreint et les résultats de mesure	16
A.1.4.3.1 Chantier n° 3	16
A.1.4.3.2 Chantier n° 4	18
A.1.4.4 Limitations du modèle de calcul restreint	19
<b>A.2 Transfert de chaleur par rayonnement</b>	21
A.2.1 Les différentes formes de rayonnement solaire	21
A.2.1.1 Facteurs influençant l'intensité du rayonnement solaire	21
A.2.1.1.1 Grandeurs temporelles	21
A.2.1.1.2 Trajectoire elliptique de la révolution de la terre autour du soleil	23
A.2.1.1.3 Coordonnées du soleil	23
A.2.1.1.4 Nébulosité	25
A.2.1.1.5 Facteurs de site	25
A.2.1.1.6 Extinction du rayonnement solaire	26
A.2.1.2 Calcul du rayonnement solaire direct sur une surface horizontale	28
A.2.1.2.1 Rayonnement direct sur une surface horizontale par ciel serein	28
A.2.1.2.2 Rayonnement direct sur une surface horizontale par ciel couvert	29
A.2.1.2.3 Rayonnement direct sur une surface horizontale par ciel partiellement couvert	29
A.2.1.3 Calcul du rayonnement solaire diffus sur une surface horizontale	29
A.2.1.3.1 Rayonnement diffus sur une surface horizontale par ciel serein	29

A.2.1.3.2	Rayonnement diffus sur une surface horizontale par ciel couvert	30
A.2.1.3.3	Rayonnement diffus sur une surface horizontale par ciel partiellement couvert	30
A.2.1.4	Calcul du rayonnement solaire global sur une surface horizontale	31
A.2.1.5	Albédo	31
A.2.2	Rayonnements terrestre et atmosphérique	32
<b>A.3</b>	<b>Elaboration du modèle de calcul final</b>	<b>33</b>
A.3.1	Hypothèses prises en compte dans le modèle final	33
A.3.2	Paramétrisation de la variation de la température de l'air	34
A.3.3	Modélisation de l'évolution des températures dans la structure	35
A.3.3.1	Equations du champ thermique	35
A.3.3.2	Conditions aux limites	35
A.3.3.2.1	Interface air – enrobé bitumineux	35
A.3.3.2.2	Interface entre deux couches	36
A.3.3.2.3	Condition à une profondeur d'un mètre	37
A.3.3.3	Distribution initiale des températures dans la structure	37
A.3.3.4	Système d'équations	37
A.3.4	Implémentation du modèle de calcul final	38
A.3.5	Validation du modèle de calcul final	38
A.3.5.1	Méthodologie	38
A.3.5.2	Caractéristiques des chantiers	38
A.3.5.3	Comparaison entre le modèle de calcul final et les résultats de mesure	39
A.3.5.3.1	Chantier n° 4	39
A.3.5.3.2	Nouveaux chantiers	40
A.3.5.4	Commentaires	43
A.3.6	Etude de la variation des paramètres du modèle de calcul final	43
A.3.6.1	Choix des paramètres	43
A.3.6.2	Evolution de la température au sein de la structure	45
A.3.6.3	Influence de la vitesse du vent sur le refroidissement	45
A.3.6.4	Influence de la température de l'air et des formes de rayonnement sur le refroidissement	46
A.3.6.5	Influence de la nébulosité sur le refroidissement	48
A.3.6.6	Influence de l'heure de pose sur le refroidissement	49
<b>Partie B – Abaques et logiciel</b>		<b>51</b>
<b>B.1</b>	<b>Utilisation des abaques</b>	<b>53</b>
B.1.1	Limitations	53
B.1.2	Utilisation des abaques	54
<b>B.2</b>	<b>Utilisation du logiciel</b>	<b>55</b>
<b>B.3</b>	<b>Abaques</b>	<b>57</b>
<b>Conclusions et perspectives</b>		<b>65</b>
<b>Liste des figures</b>		<b>67</b>
<b>Liste des tableaux</b>		<b>69</b>
<b>Liste des photos</b>		<b>70</b>
<b>Liste des symboles et abréviations</b>		<b>71</b>
<b>Références bibliographiques</b>		<b>73</b>

# Introduction

La réouverture d'une voirie, trop rapidement après la pose d'une couche d'enrobé bitumineux, est susceptible de provoquer des dégradations prématurées et notamment de l'orniérage (par postcompactage et/ou fluage de l'enrobé nouvellement posé), du plumage, etc.

A la demande des administrations et des entrepreneurs, le CRR a mené ce projet de recherche dans le but d'évaluer le temps nécessaire au refroidissement de la couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée afin d'adapter le délai entre la mise en œuvre de cette couche et la réouverture de la chaussée au trafic.

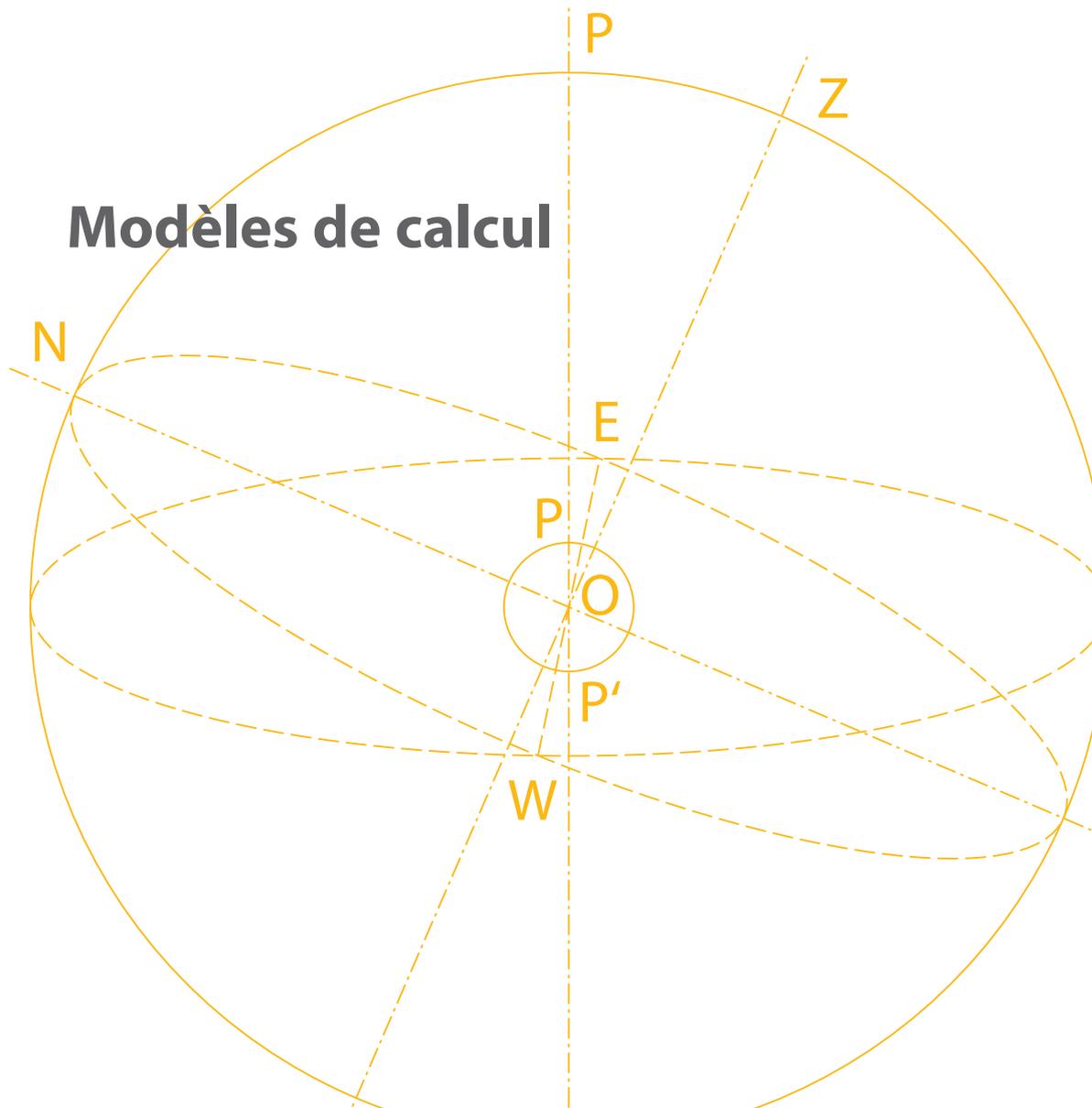
Pour ce faire, un premier modèle prévisionnel de la température dans la nouvelle couche d'enrobé bitumineux, intégrant les phénomènes de conduction et de convection, a été mis au point et a fait l'objet d'une validation par des mesures in situ. Cette validation a montré qu'il existait une bonne corrélation entre le modèle et la réalité du chantier dans la plupart des cas. Il est néanmoins apparu que dans certaines conditions extrêmes (degré d'ensoleillement élevé), le rayonnement influençait significativement le refroidissement de l'enrobé. De plus, la température de l'air prise en compte était considérée comme constante tout au long du refroidissement de la couche d'enrobé bitumineux.

Il a donc été nécessaire de tenir compte de l'intégralité des phénomènes conditionnant le refroidissement de la couche d'enrobé bitumineux. Le transfert de chaleur par rayonnement a été intégré au modèle prévisionnel initial et une paramétrisation de la variation de la température de l'air a été proposée. Ce modèle prévisionnel a été implémenté et validé. Cette phase du projet a fait l'objet d'un travail de fin d'étude à l'Institut Supérieur Industriel ECAM.

Enfin, l'étude a abouti au développement d'un système d'abaques donnant le temps d'attente minimum entre la fin de la mise en œuvre et l'ouverture au trafic, en fonction de la température de l'air, de la vitesse du vent, de l'importance du rayonnement et de l'épaisseur du recouvrement bitumineux et ce, pour les cas extrêmes. Pour tous les autres cas, un logiciel convivial permet de déterminer l'heure de remise en circulation sur base des différents paramètres.



# Partie A





# Chapitre A.1

## Elaboration d'un premier modèle de calcul restreint

Dans un premier temps, nous nous sommes attelés à modéliser l'évolution de la température d'une couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée en ne tenant pas compte du phénomène de rayonnement. Nous avons pris comme hypothèse que ce dernier était négligeable par rapport à la conduction entre la couche et le massif et la convection entre la couche et l'air ambiant.

Ce chapitre détaille cette première approche et en expose les limites.

### A.1.1 Evolution des températures dans la couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée

Dans cette première approche, l'évolution de la température dans la nouvelle couche d'enrobé bitumineux est obtenue en modélisant la structure routière de la manière suivante:

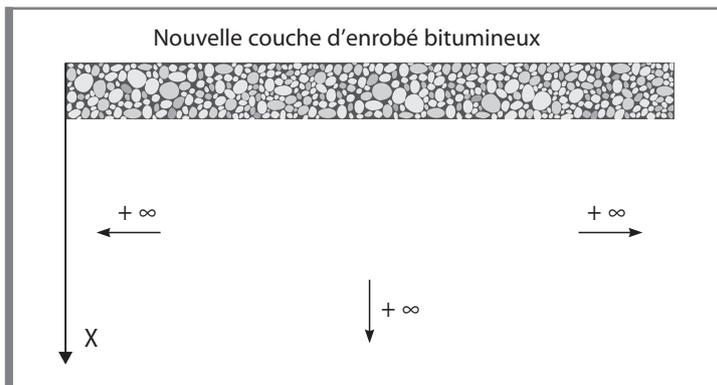


Figure A.1.1 Modélisation de la structure

La température de la nouvelle couche d'enrobé bitumineux, juste après mise en œuvre, est, par définition, égale à la température de pose ( $T_{pose}$ ). A cet instant, la structure représentée à la figure A.1.1, se trouve dans un état de déséquilibre thermique. Afin de rétablir cet équilibre, deux types d'échange de chaleur se produisent (le rayonnement n'est pas pris en compte dans ce développement):

- un *flux de chaleur de conduction* qui se déroule au sein de la matière (dans le nouvel enrobé bitumineux et dans le corps de la chaussée);
- un *flux de convection* au droit de l'interface entre l'air et la couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée.

Le caractère de déséquilibre peut être classé en quatre régimes:

- le *régime permanent* pour lequel la température en tout point du milieu est indépendante du temps, le déséquilibre est entretenu par les sources de chaleur;
- le *régime périodique établi* pour lequel la température, en tout point du milieu, effectue des oscillations périodiques indépendantes du champ de température initial;
- le *régime transitoire* qui correspond à l'évolution d'un système d'un état initial (permanent ou en équilibre) vers un état final (permanent ou en équilibre) provoquée par un changement à l'instant

initial des sources. Le champ de température<sup>1</sup> dépend du champ de température initial mais l'influence de celui-ci s'estompe avec le temps;

- le régime *variable* pour lequel les sources évoluent constamment, le champ de température dépend des valeurs instantanées des sources et des évolutions antérieures.

Le régime considéré dans cette étude est le régime transitoire.

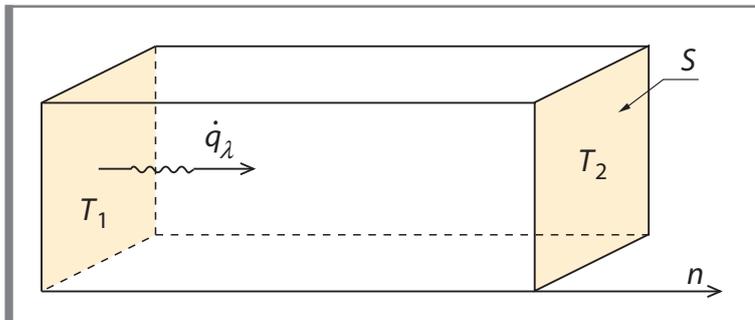
### A.1.1.1 Transfert de chaleur par conduction

La conduction de la chaleur est décrite par la loi phénoménologique de Fourier. Dans le cas particulier d'un milieu isotrope, celle-ci s'écrit:

$$\dot{q}_\lambda = -\lambda \frac{\delta T}{\delta n} \quad (1)$$

$\dot{q}_\lambda$  densité de flux de chaleur (W/m<sup>2</sup>) dans la direction  $n$ ;  
 $T$  champ de température (°C);  
 $\lambda$  conductivité thermique du milieu (W/(m.°C)).

Cette loi décrit la manière dont les flux de chaleur s'établissent et évoluent dans la matière. La figure A.1.2 schématise l'évolution de la densité du flux de chaleur dans un solide.



**Figure A.1.2** Evolution de la densité de flux de chaleur dans un solide

### A.1.1.2 Transfert de chaleur par convection

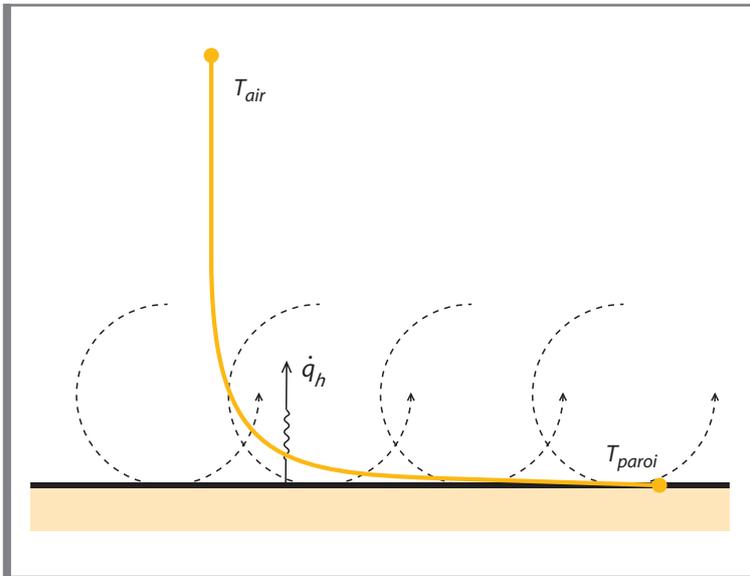
La convection est le transfert de chaleur entre la paroi d'un solide et un fluide, dans notre cas, l'air. La densité de flux de chaleur échangé par convection s'écrit:

$$\dot{q}_h = h (T(M) - T_{air}) \quad (2)$$

$\dot{q}_h$  densité de flux de chaleur (W/m<sup>2</sup>) échangé par convection;  
 $h$  coefficient de convection (W/m<sup>2</sup>.°C);  
 $T(M)$  température d'un point quelconque  $M$  de la paroi où se déroule l'échange convectif (°C);  
 $T_{air}$  température de l'air (°C), prise suffisamment loin de la paroi.

La figure A.1.3 schématise l'évolution de la température aux abords de la paroi d'un solide.

<sup>1</sup> On appelle champ de température, la fonction  $f(n,t)$  telle que  $T = f(n,t)$



**Figure A.1.3** Evolution de la température aux abords de la paroi d'un solide

La structure routière, siège d'un phénomène de conduction, est en contact, en surface, avec l'air. Au droit de cette zone de contact, des échanges thermiques se produisent entre les deux milieux. Ce type de transfert à la frontière (air - enrobé bitumineux) est régi par la loi suivante:

$$-\lambda \left( \frac{\delta T}{\delta n} \right)_M = h (T(M) - T_{air}) \quad (3)$$

Cette loi est dite condition de troisième espèce ou condition de Fourier.

### A.1.1.3 Evolution des températures dans la structure

L'évolution des températures dans la structure d'un état initial donné vers l'état final du nouvel équilibre thermique s'obtient en résolvant le système d'équations suivant (la surface d'échange étant située en  $x = 0$ ):

$$\begin{cases} \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} - \frac{1}{a} \frac{\delta T_i}{\delta t} = 0 \\ -\lambda \left. \frac{\delta T}{\delta x} \right|_{x=0} + hT|_{x=0} = hT_{air} \\ T(x, t=0) = f(x) \end{cases} \quad (4)$$

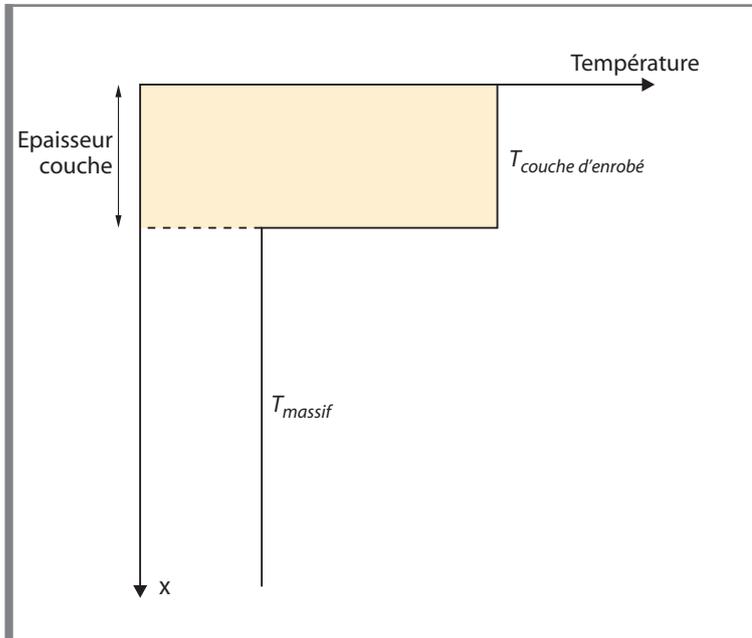
$a = \lambda / \rho c$	diffusivité thermique ( $m^2/s$ );
$x$	profondeur mesurée à partir de la nouvelle surface de roulement ( $x = 0$ ) (m);
$f(x)$	fonction donnant la distribution de température initiale dans la chaussée ( $^{\circ}C$ );
$\rho$	masse volumique ( $kg/m^3$ );
$c$	chaleur spécifique ( $J/kg.^{\circ}C$ ).

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

- le massif est semi-infini dans la direction verticale (figure A.1.1);
- le massif est infini dans le plan horizontal (figure A.1.1);
- l'ensemble de la structure est isotrope et caractérisé par une seule valeur de la masse volumique et de coefficient de conduction;
- la vitesse du vent est constante sur toute la période considérée;

- la température de l'air est constante sur toute la période considérée;
- la température des couches sous-jacentes à la nouvelle couche d'enrobé bitumineux est égale à la température moyenne annuelle au temps initial;
- les effets de bord (pour la couche nouvellement posée) ne sont pas pris en compte.

La distribution initiale de température dans la chaussée, donnée par la fonction  $f(x)$ , est représentée à la figure A.1.4.



**Figure A.1.4** Distribution initiale de températures

Le champ de température qui vérifie le système d'équations (4) se décompose en deux contributions:

$$T(x, t) = T_1(x, t) + T_2(x, t) \quad (5)$$

$T_1(x, t)$  est le champ de température qui prend place dans la structure lorsque le flux de convection est nul et la température initiale en tout point de la chaussée est donnée par la fonction  $f(x)$ .

$T_1(x, t)$  est donc solution du système suivant:

$$\begin{cases} \frac{\delta^2 T_1}{\delta x^2} - \frac{1}{a} \frac{\delta T_1}{\delta t} = 0 \\ -\lambda \left. \frac{\delta T_1}{\delta x} \right|_{x=0} + hT_1|_{x=0} = hT_{air} \\ T_1(x, t=0) = f(x) \end{cases} \quad (6)$$

La méthode de résolution de ce système d'équations consiste à chercher une solution du type:

$$T(x, t) = g(x)h(t) \quad (7)$$

Par intégration, en tenant compte des conditions aux limites dans la direction  $x$ , on obtient:

$$T(x, t; \alpha) = A \sin(\alpha x + B) \exp(-a\alpha^2 t) \quad (8)$$

$A, B$  constantes arbitraires;  
 $\alpha$  paramètre numérique.

Le développement complet est repris dans la réf. 9. La solution de ce problème est donnée par la relation suivante:

$$T_1(x, t) = \int_0^{+\infty} \frac{2 \left[ \alpha \cos(\alpha x) + \frac{h}{\lambda} \sin(\alpha x) \right] \exp(-a\alpha^2 t)}{\pi \left[ a^2 + \frac{h^2}{\lambda^2} \right]} \left[ \int_0^{\infty} f(x') \left[ \alpha \cos(\alpha x') + \frac{h}{\lambda} \sin(\alpha x') \right] dx' \right] d\alpha \quad (9)$$

Le champ de température  $T_2(x, t)$  est en équilibre convectif avec une température de l'air égale à  $T_{air}$ . Au temps initial, le champ de température est nul dans toute la structure. Ce second champ de température vérifie donc le système d'équations suivant:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} - \frac{1}{a} \frac{\partial T_2}{\partial t} = 0 \\ -\lambda \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=0} + hT_2 \Big|_{x=0} = hT_{air} \\ T_2(x, t=0) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

Dans ce cas également, une solution a été développée:

$$T_2(x, t) = T_{air} \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{at}} \right) - T_{air} \exp \left( \frac{h}{\lambda} x + \frac{h^2}{\lambda^2} at \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{at}} + \frac{h}{\lambda} \sqrt{at} \right) \quad (11)$$

Finalement, l'évolution de la température dans la nouvelle couche d'enrobé bitumineux est donnée par la relation suivante:

$$T(x, t) = \int_0^{+\infty} \frac{2 \left[ \alpha \cos(\alpha x) + \frac{h}{\lambda} \sin(\alpha x) \right] \exp(-a\alpha^2 t)}{\pi \left[ a^2 + \frac{h^2}{\lambda^2} \right]} \left[ \int_0^{\infty} f(x') \left[ \alpha \cos(\alpha x') + \frac{h}{\lambda} \sin(\alpha x') \right] dx' \right] d\alpha \quad (12)$$

$$+ T_{air} \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{at}} \right) - T_{air} \exp \left( \frac{h}{\lambda} x + \frac{h^2}{\lambda^2} at \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{at}} + \frac{h}{\lambda} \sqrt{at} \right)$$

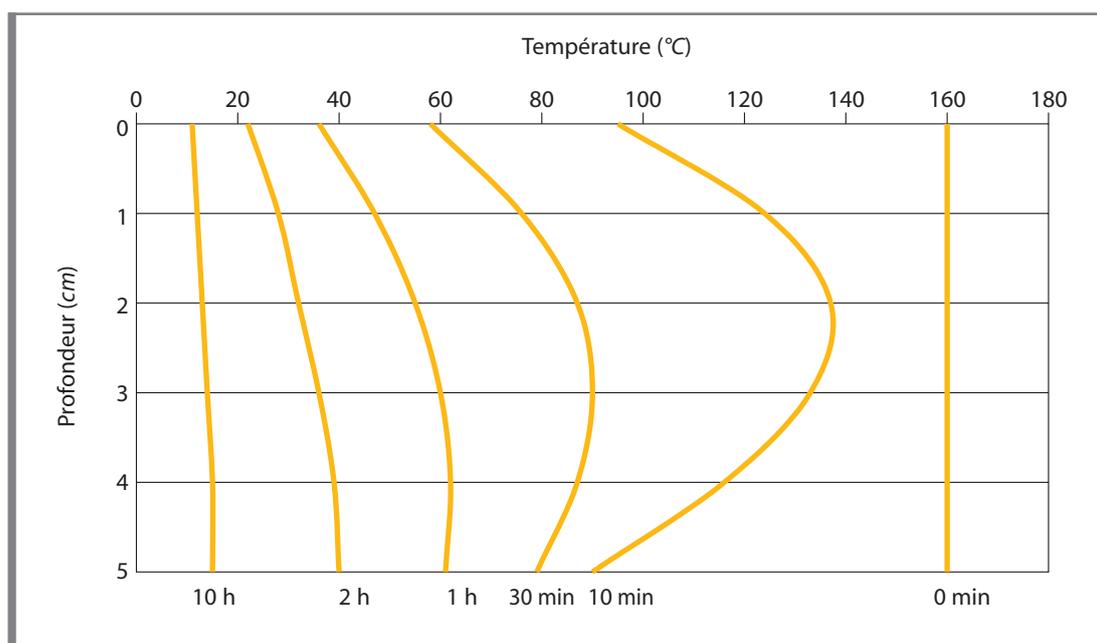
On peut vérifier que la relation (12) répond bien au système d'équations (4) et que le problème est effectivement résolu.

## A.1.2 Implémentation du modèle restreint

La relation (12) a été implémentée en langage de programmation C++. La méthode de Simpson a été utilisée pour l'intégration numérique du premier terme de la somme (c'est-à-dire, pour la relation (9)).

Cet outil permet de calculer, pour une profondeur et un temps d'attente donné, la température dans l'enrobé bitumineux. Celle-ci dépend de la température de pose de l'enrobé bitumineux, de la température de l'air, du coefficient de convection à l'interface air-enrobé bitumineux et des caractéristiques thermiques de la couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée.

Afin d'illustrer l'application de la relation (12), l'évolution de la température dans une couche d'enrobé bitumineux en fonction du temps est représentée à la figure A.1.5 et ce pour une température de pose de 160 °C, une température de l'air de 10 °C et une épaisseur de couche de 5 cm. Le coefficient de convection  $h$  est pris égal à 30 W/(m.°C), ce qui correspond à un vent de vitesse modérée ( $v_{vent} \approx 6$  m/s).



**Figure A.1.5** Evolution de la température dans une couche d'enrobé bitumineux de 5 cm d'épaisseur en fonction du temps

## A.1.3 Détermination des paramètres nécessaires au modèle de calcul restreint

### A.1.3.1 Coefficient de convection

Le flux de convection est essentiellement fonction de la différence de température existant entre le revêtement et l'air. La connaissance du coefficient de convection  $h$  de la surface est nécessaire à la détermination des transferts de chaleur à la surface du revêtement bitumineux. Ce paramètre est difficilement estimable en pratique car il est une fonction de la vitesse du vent et dans une moindre mesure, de la température de l'air et de l'état de surface du revêtement.

Dans le cadre de cette recherche, nous avons opté pour la relation empirique suivante (réf. 19):

$$h = \frac{1,163 \cdot (4,84 + 3,36 v_{vent}) \cdot 294,16}{(273,16 + T_{air})} \quad (13)$$

$v_{vent}$  vitesse du vent (m/s);  
 $T_{air}$  température de l'air (°C).

L'intervalle de validité de cette relation correspond à une vitesse de vent comprise entre 0 et 5 m/s. Cependant, les tests de validation in situ ont montré que celle-ci reste valable pour des vitesses de vent plus élevées.

### A.1.3.2 Caractéristiques thermiques des matériaux

Les caractéristiques thermiques des matériaux nécessaires à la modélisation du refroidissement d'une couche d'enrobé nouvellement posée sont:

- la *conductivité thermique*  $\lambda$  de l'enrobé bitumineux qui traduit son aptitude à conduire la chaleur (W/m.°C);
- la *chaleur spécifique*  $c$  de l'enrobé bitumineux qui traduit sa capacité à emmagasiner de la chaleur (J/kg.°C).

Une recherche bibliographique succincte a été menée en vue de préciser la conductivité thermique, la chaleur spécifique et la masse volumique des matériaux de chaussée. Le résultat de cette recherche est repris au tableau A.1.1 (pages 12 et 13).

Comme nous le constatons, la valeur des paramètres thermiques des matériaux varie fortement d'une référence à l'autre. Dans cette première approche, nous avons opté pour les valeurs suivantes pour l'enrobé bitumineux:

- conductivité thermique  $\lambda$  égale à 0,7 W/m.°C;
- chaleur spécifique  $c$  égale à 880 J/kg.°C;
- masse volumique  $\rho$  égale à 2 400 kg/m<sup>3</sup>.

### A.1.3.3 Température de pose de l'enrobé bitumineux

La température de fabrication des enrobés se situe entre 150 et 180 °C. Si le chantier n'est pas trop éloigné de la centrale, que le stockage en silo d'attente est limité et que les conditions de transport sont correctes (camion thermo, etc.), on peut espérer avoir une température de pose se situant entre 130 et 170 °C.

### A.1.3.4 Température moyenne du massif

La température moyenne du massif avant la pose de l'enrobé bitumineux est prise égale à la température moyenne annuelle déterminée à la réf. 2, c'est-à-dire 14 °C.

### A.1.3.5 Température de la couche d'enrobé bitumineux après refroidissement

La présence du bitume confère à l'enrobé bitumineux un comportement viscoélastique et thermoplastique. Autrement dit, un tel matériau est doué de propriétés élastiques (réversibles), et visqueuses (irréversibles), qui dépendent à la fois de la température et de la fréquence de sollicitation.

On comprend qu'à une température trop élevée, le comportement du bitume contenu dans l'enrobé devient plastique. L'essai de ramollissement Anneau & Bille (réf. 24) permet de déterminer cette température critique. La méthode d'essai est schématisée à la figure A.1.6 (page 13).

Type	Nature	$\lambda$ (W/m.°C)	$c$ (J/kg.°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Réf.
<b>Général</b>	Structure routière	1,4 à 2,2	870 à 960	-	1
		1,28	880	1 900	2
<b>Matériaux bitumineux</b>	Enrobé bitumineux	1,05 à 1,98	879	-	3
		1,23	921	2 230	4
		0,70	921	2 100	5
		1,38	1 047	2 302	6
		1,05 à 2,00	921	2 000 à 2 400	7
		0,74 à 0,76	920	1 100 à 1500	8
		0,70	-	2 120	9
	Béton bitumineux	2,00	-	2 350	10
		2,20	869	-	1
	Enrobé drainant	1,10	-	1 960	10
		1,50	995	-	1
	Grave bitume	1,90	-	2 250	10
		1,90	869	-	1
	Asphalte coulé	0,7 à 1,15	-	2 350	11
	Asphalte pur pour étanchéité	0,70	-	2 100	12
	Asphalte sablé	1,15	-	2 300	12
<b>Bétons de ciment</b>	Béton de ciment	1,51	879	2 400	5
		1,41	963	-	13
		0,9 à 1,3	879 à 963	2 250 à 2 350	7
		1,51	879	2 200	17
		1,80	933	-	1
	Béton type Portland	1,75	920	2 200 à 2 400	8
		1,7	-	2 300	9
	Béton autre que type Portland	0,8 à 1,4	880	1 900 à 2 300	9
	Béton ordinaire protégé	0,706	-	1 600	14
		0,838	-	1 760	14
		1,056	-	1 920	14
		1,315	-	2 080	14
		1,696	-	2 240	14
		2,267	-	2 400	14
	Béton ordinaire exposé aux intempéries	0,808	-	1 600	14
		0,952	-	1 760	14
		1,194	-	1 920	14
		1,488	-	2 080	14
		1,904	-	2 240	14
	Béton armé	2,561	-	2 400	14
1,40		-	-	15	
Béton maigre	0,79	-	1 800	15	
<b>Matériaux granulaires stabilisés</b>	Sable stabilisé	1,1	-	1 900	10
		3,32	1 005	2 339	6
	Grave laitier	1,1	-	2 050	10
		1,4	964	-	1
	Cendres volantes traitées	0,6	-	1 350	10

Type	Nature	$\lambda$ (W/m °C)	$c$ (J/kg °C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Réf.
Matériaux granulaires	Empierrement	1,51 à 2,17	754 à 837	–	16
		1,31	837	1 750	4
	Gravier	0,52	838	1 703	6
	Sable sec	0,41	800	1 500	8
		0,33	879	1 520	17
Sable drainant	1,63	2 093	1 900	5	
Sol	Terrain naturel	1,4	–	1 610	10
			837		16
	Argile	1,28	879	1 450	17
	Sol graveleux	2,43	963	–	16
	Sol cohésif	1,59	1 214	2 066	6
0,52		1 842	2 040	17	
Matériaux divers	Calcaire	3,50	–	2 440	14
		0,79 à 1,36	–	1 600 à 1 800	15
		0,7 à 0,9	840	2 600	8
		1,26 à 1,33	900	2 500	8
		0,52 à 1,28	795	–	18
	Grès	2,9	–	2 400	14
		0,79 à 1,36	–	1 600 à 1 800	15
		0,93 à 1,25	710	2 160 à 2 300	8
	Porphyre	2,30	–	2 400 à 2 600	15
		2,90	–	1 400 à 2 600	8

Tableau A.1.1 Paramètres thermiques de matériaux de chaussée

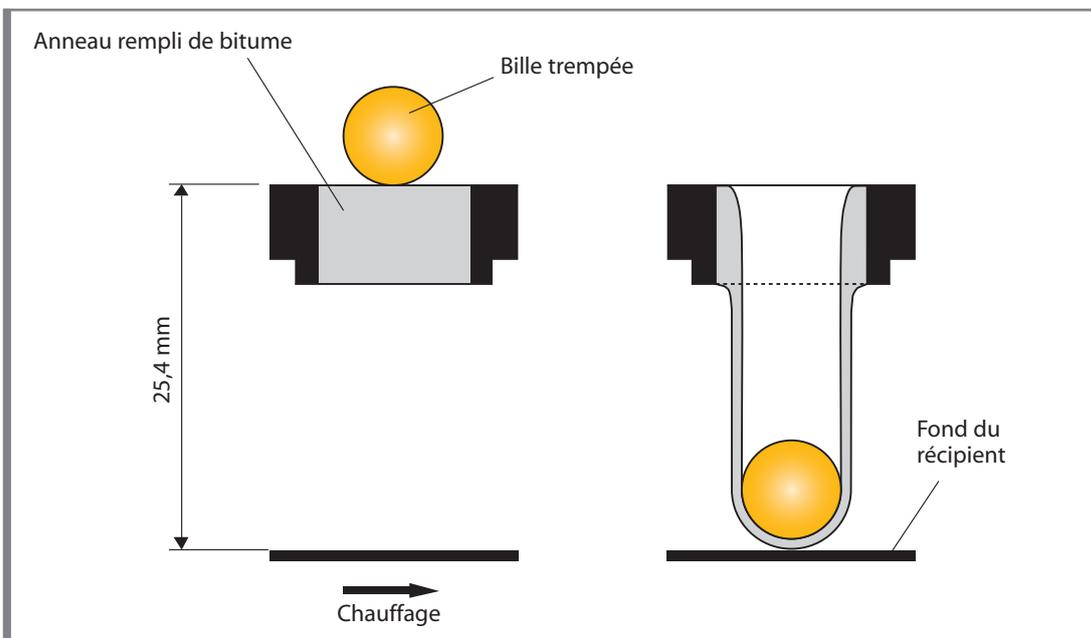


Figure A.1.6 Essai de ramollissement Anneau & Bille

Par définition, la température de la couche d'enrobé bitumineux après refroidissement est la température maximale de l'enrobé, approximativement au centre de la couche, en deçà de laquelle l'enrobé peut être considéré comme stable.

En pratique (réf. 25), il est généralement admis qu'un essai de chargement dynamique ne peut être réalisé sur une couche d'enrobé bitumineux si la température au sein de celle-ci est supérieure aux 2/3 de la température Anneau & Bille du bitume qu'elle contient. Il semble prudent de se référer à la même limite pour la température de remise en circulation:

$$T_{circulation} = \frac{2}{3} T_{A\&B} \quad (14)$$

$T_{circulation}$  température de remise en circulation (°C);  
 $T_{A\&B}$  température de ramollissement Anneau & Bille du bitume (°C).

Le tableau A.1.2 reprend à titre indicatif les températures de ramollissement Anneau & Bille, ainsi que les températures de remise en circulation, de quelques bitumes couramment utilisés en construction routière.

Classe	Bitume routier				Bitume polymère neuf		
	20/30	35/50	50/70	70/100	50/85 - 50	50/85 - 65	85/130 - 75
$T_{A\&B}$	55 - 63	50 - 58	46 - 54	45 - 31	50	65	75
$T_{circulation}$	39	36	33	31	33	43	50

**Tableau A.1.2** Température de remise en circulation pour quelques bitumes couramment utilisés

*Note:*

Une température Anneau & Bille moyenne a été considérée pour déterminer la température de remise en circulation des bitumes routiers.

## A.1.4 Validation et limitation du modèle de calcul restreint

Le modèle de calcul mis au point dans cette première approche a fait l'objet d'une validation sur chantier.

### A.1.4.1 Méthodologie

La méthodologie appliquée pour la mesure de l'évolution de la température à la surface de la couche d'enrobé bitumineux 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 (Cuivre - Constantan) (photo A.1.1) et ce, à plusieurs reprises (avec un minimum de 3 fois sur la durée des mesures);
- mesure de la température de l'air, à l'abri du vent, à l'aide de la sonde de température et ce, à plusieurs reprises (avec un minimum de 3 fois sur la durée des mesures);
- appréciation subjective de la vitesse du vent (très faible, modéré ou fort);
- mesure de la température de la couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée, pendant et après le compactage, à intervalles de 5 à 10 min à l'aide d'un thermomètre infrarouge (photo A.1.2). Ce relevé est réalisé à 3 endroits différents au minimum, au centre de la bande d'enrobé bitumineux (photo A.1.3). Une boîte en carton permet de protéger le point de mesure du vent.

Pour éviter les erreurs de lecture et d'autres problèmes inhérents au thermomètre infrarouge, 3 points de mesure de la température sont considérés par emplacement (photo A.1.4 et figure A.1.7).

*Note:*

L'étalonnage du thermomètre infrarouge, aux températures proches de la température de l'enrobé bitumineux nouvellement posé, montre que la précision ne dépasse pas 2 °C.



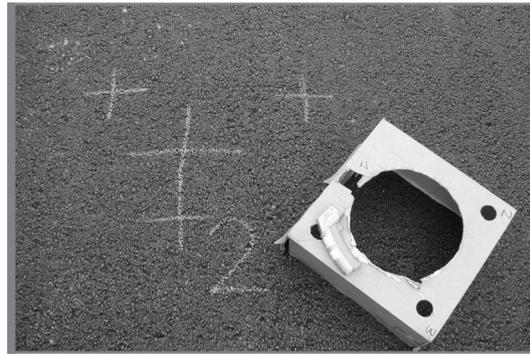
**Photo A.1.1** Sonde de température Cuivre-Constantan



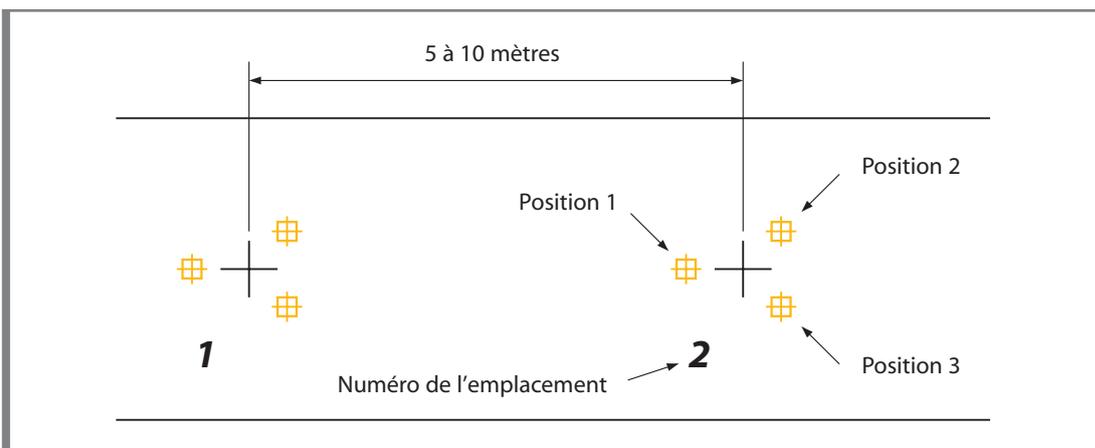
**Photo A.1.2** Thermomètre infrarouge



**Photo A.1.3** Mesure de la température au centre de la bande d'enrobé bitumineux



**Photo A.1.4** Configuration des points de mesure par emplacement



**Figure A.1.7** Configuration des emplacements de mesure

### A.1.4.2 Caractéristiques des chantiers de validation

Lors de cette première approche, des mesures ont été prises sur 4 chantiers différents. Leurs caractéristiques sont reprises aux tableaux A.1.3 et A.1.4.

Chantier	Période	$T_{air}$	Vent	Type d'enrobé	Épaisseur	$T_{pose}$
1	Décembre	0 °C	Modéré	BB-3A <sup>1</sup>	6 cm	150 °C
2	Mars	9 °C	Modéré à fort	BB-1B <sup>2</sup>	5 cm	160 °C
3	Juillet	20 °C	Modéré	SMA-B6 <sup>3</sup>	5 cm	165 °C
4	Juillet	30 °C	Très faible	SMA-B1 <sup>4</sup>	5 cm	160 °C

<sup>1</sup> Béton bitumineux de sous-couche (calibre 0/20)

<sup>2</sup> Béton bitumineux de couche d'usure (calibre 0/14)

<sup>3</sup> Stone Mastic Asphalt (calibre 0/14) avec bitume polymère neuf

<sup>4</sup> Stone Mastic Asphalt (calibre 0/14) avec bitume routier

**Tableau A.1.3** *Caractéristiques des différents chantiers de validation*

Chantier	Durée des mesures	Nombre de mesure
1	65 min	3 x 5
2	85 min	5 x 1
3	170 min	5 x 3
4	192 min	5 x 3

**Tableau A.1.4** *Descriptif des mesures*

### A.1.4.3 Comparaison entre le modèle de calcul restreint et les résultats de mesure

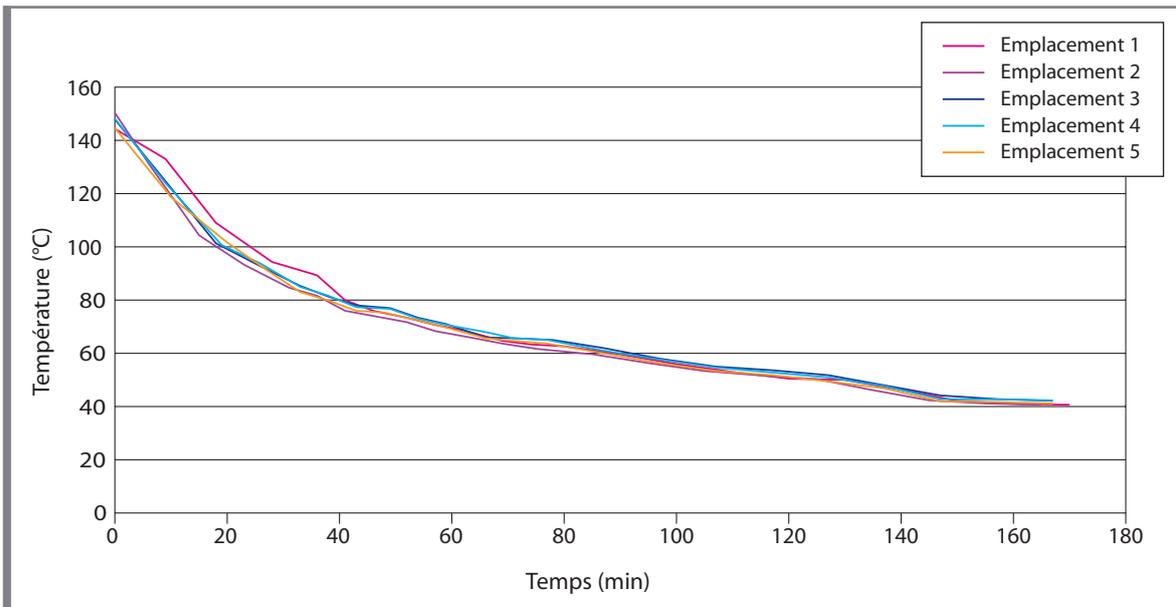
Les chantiers n° 1 et 2 ont permis d'affiner la méthodologie, notamment pour le choix des emplacements (au centre de la bande d'enrobé nouvellement posé) et pour le nombre de points de mesure par emplacement. Cependant, leur durée de mesure étant limitée (tableau A.1.4), nous ne détaillons ci-après que les chantiers n° 3 et 4.

#### A.1.4.3.1 Chantier n° 3

Ce chantier de pose d'une couche de SMA-B6 a été réalisé par temps sec, vent modéré et ciel couvert. La figure A.1.8 présente les courbes moyennes de refroidissement des 5 emplacements de mesure. Pour rappel, chaque courbe représente la moyenne de 3 courbes individuelles.

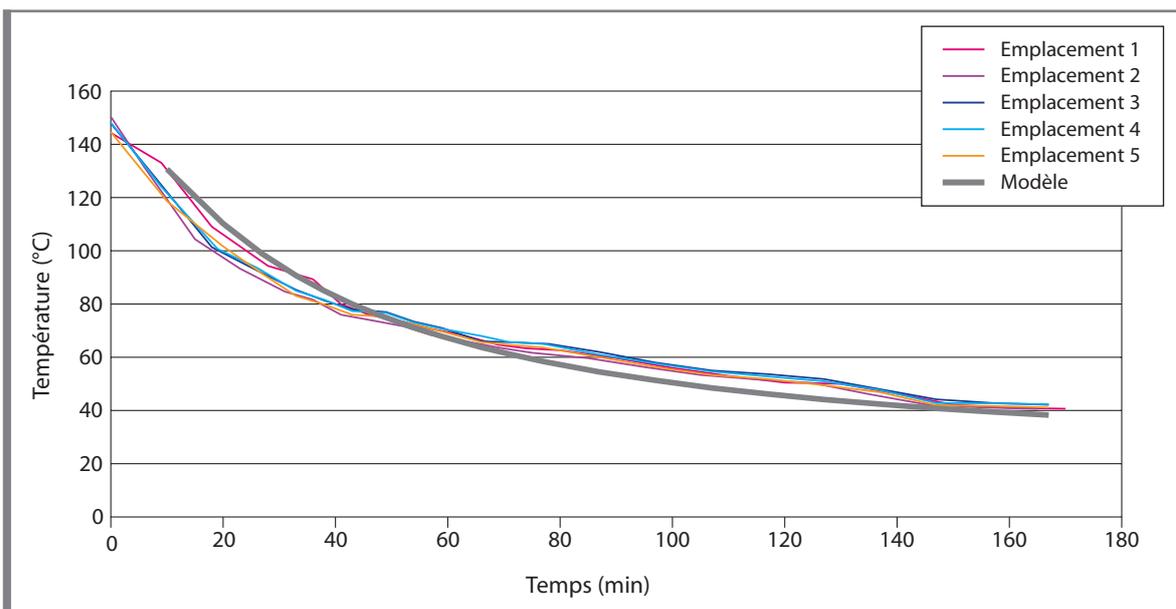
Les paramètres introduits dans le modèle de calcul sont les suivants:

- une température moyenne de l'air de 20 °C;
- une température initiale de pose de 165 °C;
- une température du support de 14 °C;
- une épaisseur de couche de SMA-B6 de 5 cm;
- une conductivité du SMA-B6 de 0,7 W/m.°C;
- une chaleur spécifique du SMA-B6 de 880 J/kg.°C;
- une masse volumique du SMA-B6 de 2 400 kg/m<sup>3</sup>;
- un coefficient de convection de 15 W/m.°C (ce qui correspond à un vent modéré).



**Figure A.1.8** Chantier n° 3 - Refroidissement de la couche de SMA-B6 nouvellement posée

La figure A.1.9 présente les courbes moyennes de refroidissement mesurées sur chantier en comparaison avec la courbe de refroidissement obtenue à l'aide du modèle de calcul.



**Figure A.1.9** Chantier n° 3 - Comparaison entre les courbes mesurées et la courbe calculée

Quoique l'on observe un léger «décrochage» des courbes mesurées par rapport à la courbe calculée dans l'intervalle de temps (70 min; 150 min), nous pouvons considérer que les courbes mesurées et la courbe calculée sont corrélées.

*Note:*

Une instabilité numérique liée au modèle de calcul ne permet pas d'obtenir des valeurs de température plausibles durant les 10 premières minutes du refroidissement de la couche.

#### A.1.4.3.2 Chantier n° 4

Ce chantier de pose d'une couche de SMA-B1 a été réalisé par temps sec, par vent très faible et par ciel dégagé. La mesure du refroidissement de l'enrobé bitumineux a eu lieu vers 12:00 (par fort ensoleillement).

La figure A.1.10 présente les courbes moyennes de refroidissement des 5 emplacements de mesure. La mesure du refroidissement de l'enrobé bitumineux de l'emplacement 3 ayant subi un retard, la courbe corrigée est également présentée (courbe *Emplacement 3 corrigé*). Elle est la translatée de la courbe initiale.

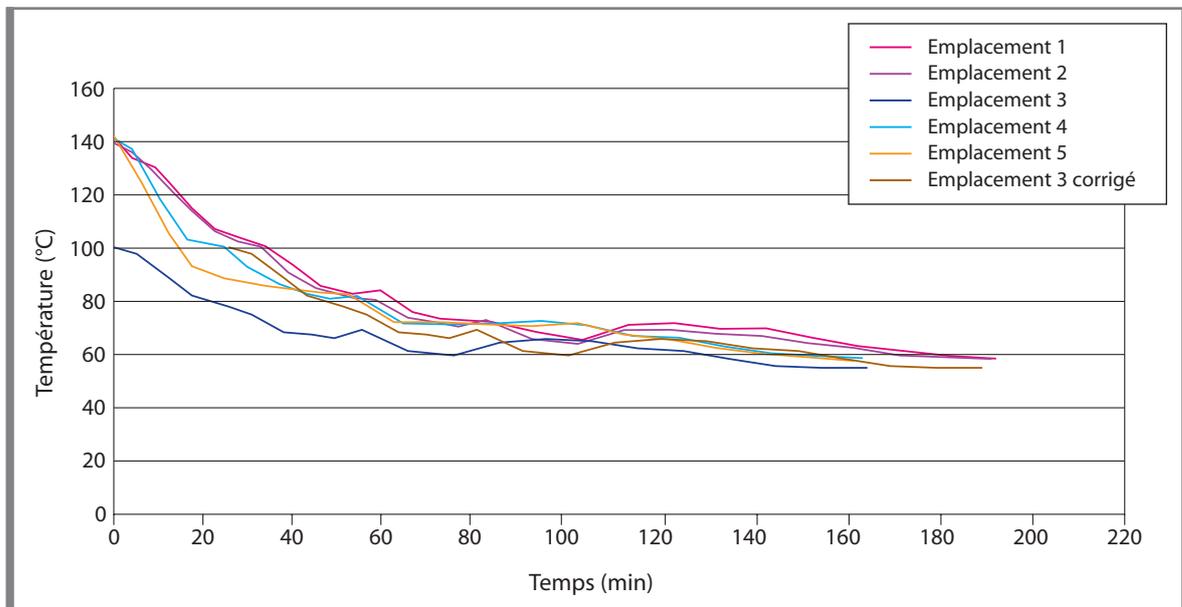


Figure A.1.10 Chantier n° 4 - Refroidissement de la couche de SMA-B1 nouvellement posée

Les paramètres introduits dans le modèle de calcul sont les suivants:

- une température moyenne de l'air de 30 °C;
- une température initiale de pose de 160 °C;
- une température du support de 14 °C;
- une épaisseur de couche de SMA-B6 de 5 cm;
- une conductivité du SMA-B6 de 0,7 W/m.°C;
- une chaleur spécifique du SMA-B6 de 880 J/kg.°C;
- une masse volumique du SMA-B6 de 2 400 kg/m<sup>3</sup>;
- un coefficient de convection de 5 W/m.°C (ce qui correspond à une vitesse de vent très faible).

La figure A.1.11 présente les courbes moyennes de refroidissement mesurées sur chantier en comparaison avec la courbe de refroidissement obtenue à l'aide du modèle de calcul.

Dans ce cas de figure, un net décrochage entre les courbes mesurées et la courbe calculée apparaît après 80 minutes de refroidissement, à environ 70 °C. Après 190 minutes, une différence de 20 °C est observée.

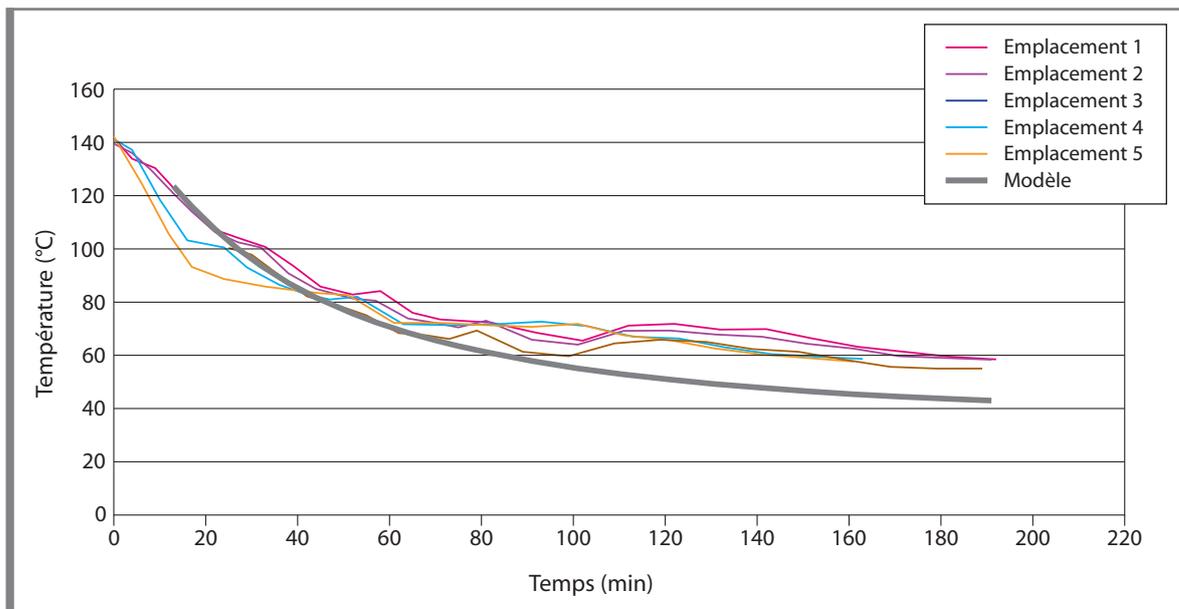


Figure A.1.11 Chantier n° 4 - Comparaison entre les courbes mesurées et la courbe calculée

#### A.1.4.4 Limitations du modèle de calcul restreint

Cette première approche semble donner une bonne estimation du phénomène de refroidissement d'une couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée par ciel couvert. De plus, les valeurs retenues pour les différents paramètres ( $h$ ,  $c$ ,  $\lambda$  et  $\rho$ ) entrant en ligne de compte dans le modèle semblent être en accord avec la réalité.

Le modèle de calcul ne considère que les phénomènes de conduction et de convection de la chaleur; il fait abstraction du transfert d'énergie par rayonnement solaire. Si l'influence du rayonnement est vraisemblablement négligeable au début du refroidissement de la couche d'enrobé, nous constatons que dans des conditions extrêmes de températures de l'air et de vitesse du vent (chantier n° 4: température élevée, vent très faible), celui-ci influence la descente en température. Il est dès lors nécessaire d'intégrer ce facteur dans le modèle de calcul.

Enfin, la prévision du refroidissement de l'enrobé bitumineux ne peut se faire en prenant l'hypothèse d'une température de l'air constante. Il est en effet nécessaire de tenir compte des fluctuations pouvant, dans certains cas, diminuer le temps d'attente avant réouverture de la voirie au trafic (température plus basse la nuit par exemple).



# Chapitre A.2

## Transfert de chaleur par rayonnement

Une surface disposée sur le sol terrestre est soumise à différentes formes de transfert de chaleur par rayonnement, à savoir: rayonnements solaires, rayonnement atmosphérique et rayonnement terrestre.

- *Rayonnements solaires*

La surface considérée 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 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. 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*.

- *Rayonnement atmosphérique*

L'énergie absorbée par les constituants de l'atmosphère est essentiellement convertie en énergie radiative de grande longueur d'onde. En effet, cette énergie provoque un échauffement des molécules. 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*.

- *Rayonnement terrestre*

Pour la même raison que le rayonnement atmosphérique, la surface considérée émet un rayonnement de grande longueur d'onde (infrarouge) vers la voûte céleste pour engendrer le *rayonnement terrestre*.

### A.2.1 Les différentes formes de rayonnement solaire

#### A.2.1.1 Facteurs influençant l'intensité du rayonnement solaire

La révolution de la terre autour du soleil, l'inclinaison de l'axe des pôles de la terre, la rotation de cette dernière et, à l'échelle terrestre, le climat, la pollution ainsi que des facteurs propres au site sont autant de facteurs qui influencent considérablement le rayonnement solaire. Nous détaillons chacun de ces paramètres ci-après.

##### A.2.1.1.1 Grandeurs temporelles

Le rayonnement solaire varie avec le temps. Cette notion de temps peut admettre différentes définitions:

- le *temps solaire (TS)*: il s'agit du «temps vrai», celui qui correspond à la position réelle du soleil à l'instant et au lieu considérés. Lorsque la hauteur du soleil est maximale, le temps solaire *TS* est fixé comme étant égal à 12 h;
- le *temps légal (TL)*: il s'agit du temps communément appelé heure locale;
- le *temps universel (UT)*: il s'agit du temps légal du méridien de Greenwich (longitude = 0,00°).

Au niveau du Méridien de Greenwich, le temps légal est égal au temps universel mais n'est pas égal au temps solaire. En effet, en fonction du jour de l'année, le soleil passe au méridien du lieu tantôt avant, tantôt après le midi solaire. Cette variation est due à deux caractéristiques du mouvement de la terre et du soleil:

- l'inclinaison de l'axe de rotation de la terre sur le plan de son orbite;
- la trajectoire elliptique de l'orbite terrestre.

La variation annuelle de l'écart entre le midi solaire et le midi moyen est appelée *équation du temps (ET)* (min). Il est à noter qu'elle est périodique d'une année à l'autre et qu'elle présente un maximum de plus de 14 min début février et un minimum de -16 min début novembre. L'équation du temps est déterminée par les relations simplifiées suivantes (réf. 26):

$$C = 1,914^\circ \sin(M) + 0,02^\circ \sin(2M) \quad (15)$$

$$M = 357^\circ + 0,9856^\circ \cdot j \quad (16)$$

$C$  équation du centre (de la terre) qui correspond à l'influence de l'ellipticité de l'orbite terrestre (°);  
 $M$  anomalie moyenne (°);  
 $j$  numéro du jour de l'année à dater du 1er janvier.

et:

$$R = -2,466^\circ \sin(2L) + 0,053^\circ \sin(4L) \quad (17)$$

$$L = 280^\circ + C + 0,9856^\circ \cdot j \quad (18)$$

$R$  réduction de l'équateur qui correspond à l'inclinaison de l'axe terrestre (°);  
 $L$  longitude vraie du soleil (°).

Enfin, on a:

$$ET = (C + R) \cdot 4 \quad (19)$$

*Note:*

Les coefficients correspondent aux paramètres de l'orbite terrestre en 2005 et restent valables jusqu'en 2015.

Pour une longitude égale à 0,00° le temps solaire est donné par la relation:

$$TS = UT - ET \quad (20)$$

Pour une autre longitude, cette relation devient:

$$TS = TL - C_{lieu} - ET - \frac{I_{lieu}}{15} \quad (21)$$

$C_{lieu}$  différence entre le temps légal et le temps universel (h). Ce coefficient dépend du pays et du moment de l'année. En Belgique, l'heure légale est en avance d'une heure sur le temps universel en hiver, et de deux heures en été;  
 $I_{lieu}$  longitude du lieu considéré (°).

### A.2.1.1.2 Trajectoire elliptique de la révolution de la terre autour du soleil

L'énergie solaire reçue par la terre est variable et dépend de la distance terre-soleil. En effet, la terre tourne autour du soleil en parcourant une trajectoire elliptique dont le plan est appelé l'écliptique. 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.

L'écliptique est incliné d'un angle approximativement constant de  $23,45^\circ$  par rapport au plan équatorial terrestre.

La figure A.2.1 schématise la révolution de la terre autour du soleil.

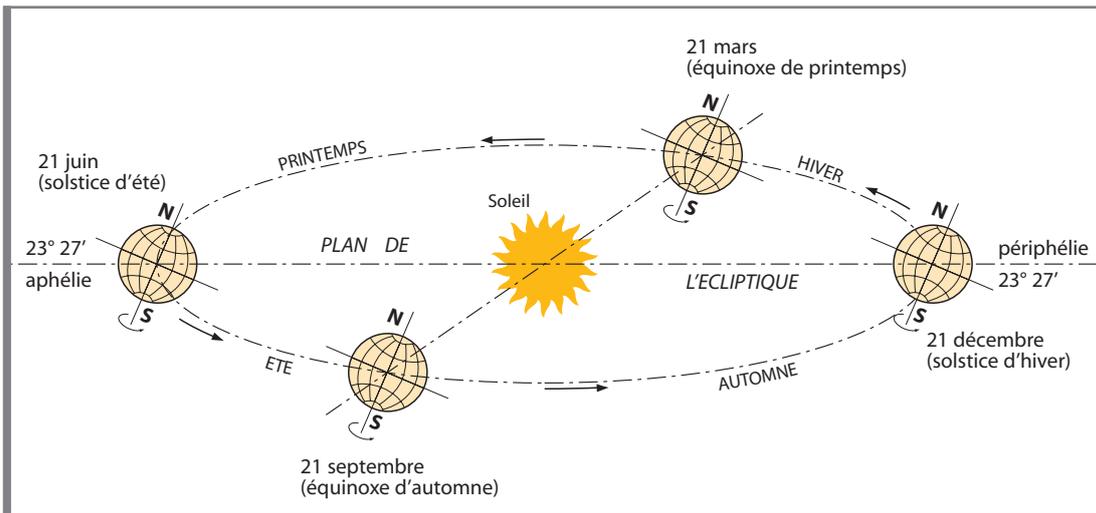


Figure A.2.1 Révolution de la terre autour du soleil (réf. 31)

### A.2.1.1.3 Coordonnées du soleil

#### ▪ Coordonnées équatoriales

La superposition de la rotation et de la révolution de la terre induit des mouvements apparents du soleil sur une sphère fictive appelée sphère céleste.

En un lieu donné, on définit (figure A.2.2):

- la *verticale du lieu*: ligne qui perce la sphère céleste en deux points diamétralement opposés: le Zénith (Z) et le Nadir (Z');
- l'*horizon*: plan passant par le centre de la terre (O) tout en étant perpendiculaire à la verticale du lieu.

La terre tourne sur elle-même autour de l'axe des pôles (PP'). Le plan passant par le centre de la terre (O) qui est perpendiculaire à l'axe des pôles est appelé équateur céleste.

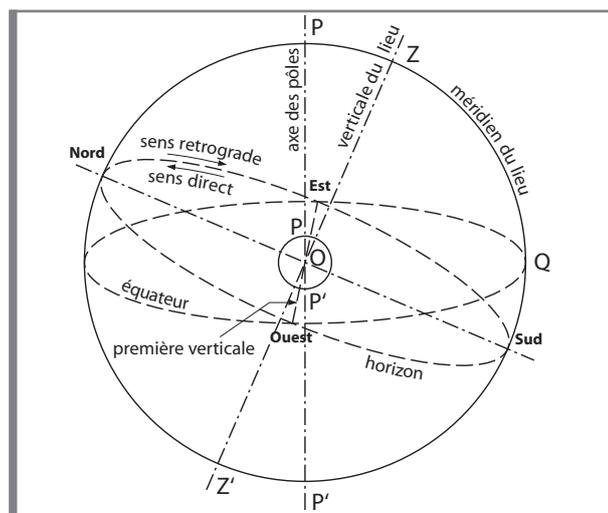


Figure A.2.2 Sphère céleste (réf. 31)

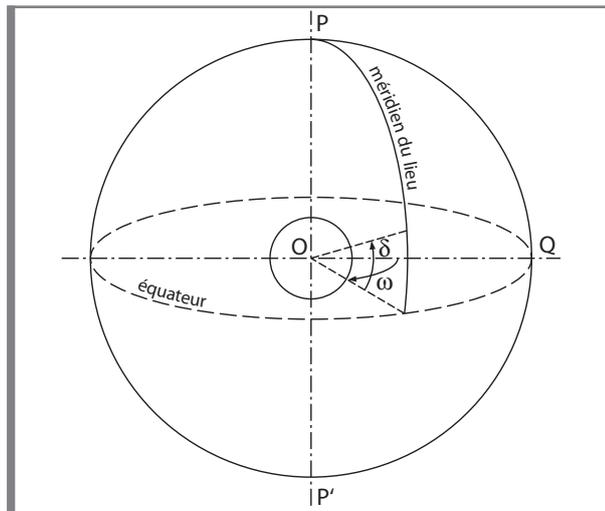
Si l'on considère l'équateur céleste, les coordonnées équatoriales du soleil sont:

- la *déclinaison du soleil*  $\delta$ : cette coordonnée représente l'inclinaison du soleil perçue par rapport à l'équateur céleste. Elle est déterminée par la relation suivante:

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin(0,980^\circ (j + 284)) \quad (22)$$

- l'*angle horaire du soleil*  $\omega$ : cette coordonnée est mesurée sur l'équateur céleste entre le cercle horaire du soleil et le plan du méridien du lieu. Elle est exprimée en fonction du temps solaire par la relation suivante:

$$\omega = 15^\circ (TS - 12) \quad (23)$$



**Figure A.2.3** Coordonnées équatoriales

▪ *Coordonnées locales*

Si l'on considère un observateur situé à une latitude  $\phi$ , les coordonnées locales du soleil sont:

- l'*angle zénithal solaire*  $\zeta$ : angle formé par la verticale du lieu considéré et la direction du soleil. Cet angle dépend de la latitude  $\phi$  du lieu considéré, de la déclinaison  $\delta$  et de l'angle horaire  $\omega$ . Il est donné par la relation suivante (réf. 23):

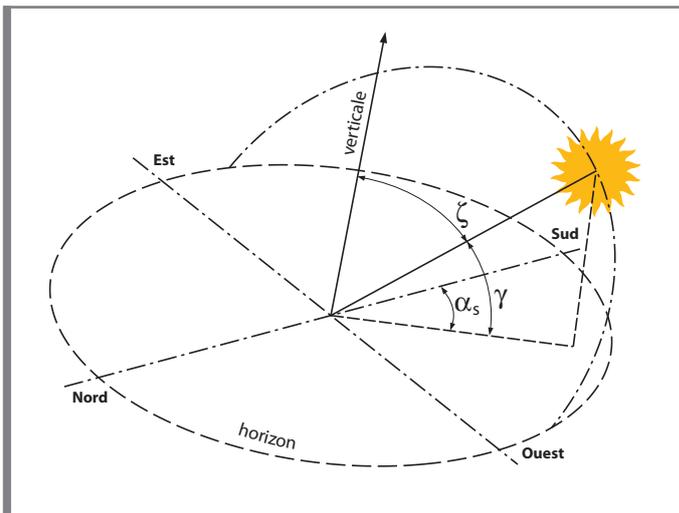
$$\cos \zeta = (\sin \phi \cdot \sin \delta) + (\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega) \quad (24)$$

- l'*angle d'élévation solaire*  $\gamma$ : angle complémentaire de l'angle zénithal ( $\zeta = \frac{\pi}{2} - \gamma$ ).  
On a:

$$\sin \gamma = \cos \zeta \quad (25)$$

- l'*angle azimutal solaire*  $\alpha_s$ : cet angle est représentatif du second mouvement apparent du soleil vis-à-vis d'un observateur mobile. Celui-ci est compté à partir du sud dans le sens rétrograde (figure A.2.2).  
On a:

$$\sin \alpha_s = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos \gamma} \quad (26)$$



**Figure A.2.4** Coordonnées locales du soleil

#### A.2.1.1.4 Nébulosité

La nébulosité est par définition la fraction de la voûte céleste occultée en un lieu et à un instant donné par tout ou partie des nuages.

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.

Dans notre approche, nous considérons les conditions nuageuses suivantes:

- *ciel serein*: le ciel est dépourvu de nuage;
- *ciel couvert*: l'intensité nuageuse est telle que le rayonnement solaire direct ne parvient pas au sol;
- *ciel partiellement couvert*: situation intermédiaire aux deux conditions précédentes.

#### A.2.1.1.5 Facteurs de site

##### ▪ Latitude et longitude 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 de ce lieu.

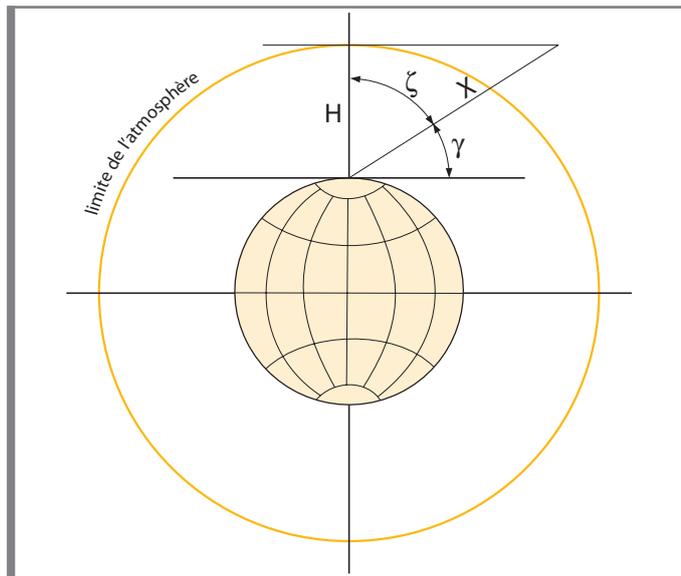
En ce qui concerne la longitude, son influence a été étudiée au A.2.1.1.1 *Grandeurs temporelles*.

##### ▪ Altitude

En toute généralité, le rayonnement solaire s'intensifie avec l'altitude. Etant donné les conditions topographiques de la Belgique, cet effet est négligé.

##### ▪ Masse d'air optique

L'épaisseur d'air traversée par le rayonnement solaire est plus importante lorsque le soleil est à l'horizon que lorsque celui-ci est au zénith. Cette variation horaire de l'épaisseur d'air traversée par le rayonnement solaire est englobée dans la notion de masse d'air optique.



**Figure A.2.5** Distances intervenant dans la détermination de la masse d'air optique

La masse d'air optique  $m$  est définie par la relation suivante:

$$m = \frac{X}{H} \quad (27)$$

$X$  longueur du trajet dans l'atmosphère d'un rayon solaire d'angle zénithal  $\zeta(m)$  ;  
 $H$  longueur du trajet dans l'atmosphère d'un rayon solaire d'angle zénithal nul ( $m$ ).

Pour un angle d'élévation solaire  $\gamma$  (complémentaire de  $\zeta$ ) supérieur à  $10^\circ$ , la relation suivante peut être adoptée:

$$m = \csc \gamma \quad (28)$$

Pour  $\gamma$  inférieur à  $10^\circ$ , un terme correctif doit être appliqué. La relation devient:

$$m = \frac{1}{\sin \gamma + 0,15 (\gamma + 3,885)^{-1,253}} \quad (29)$$

#### A.2.1.1.6. Extinction du rayonnement solaire

L'extinction du rayonnement solaire lors de sa traversée de l'atmosphère est expliquée par deux phénomènes : l'absorption et la diffusion d'une partie du rayonnement.

Les caractéristiques absorbantes de l'atmosphère sont déterminées par la présence des éléments suivants :

- le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ );
- la vapeur d'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ );
- l'ozone ( $\text{O}_3$ );
- les aérosols (particules en suspension dans l'air): grains de sables, poussières, particules organiques, fumées, etc.

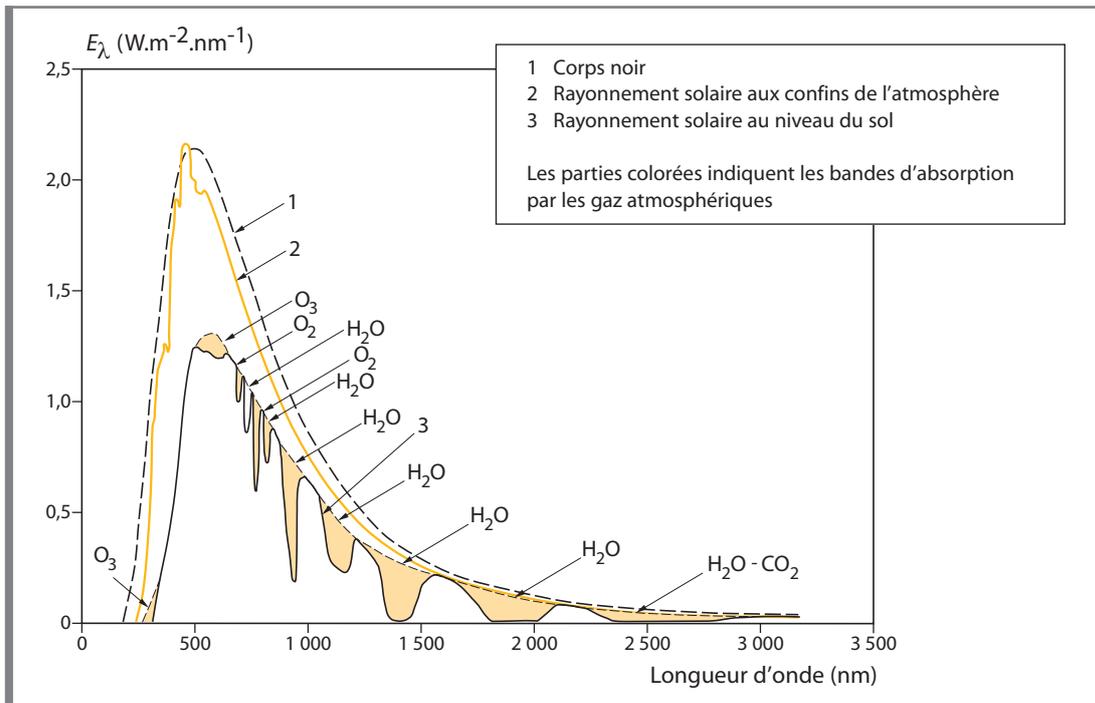


Figure A.2.6 Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre (réf. 20 et 31)

Les gaz de l'atmosphère, la vapeur d'eau et les particules en suspension sont responsables du phénomène de diffusion. Si le phénomène d'absorption donne lieu à une redistribution d'énergie sous forme infrarouge, la diffusion a pour effet de redistribuer l'énergie dans toutes les directions sans changement de longueur d'onde.

L'extinction du rayonnement solaire est déterminée par la connaissance des paramètres suivants:

- *Épaisseur optique de Rayleigh par unité de masse:*

L'épaisseur optique de Rayleigh est un concept théorique qui représente le facteur total d'extinction du rayonnement à travers une atmosphère pure et sèche pour une masse d'air unitaire:

$$\delta_R = \frac{1}{0,9 m + 9,4} \quad (30)$$

$\delta_R$  épaisseur optique de Rayleigh.

- *Effet de trouble atmosphérique*

Il est nécessaire d'appliquer un facteur d'atténuation à l'épaisseur optique de Rayleigh pour tenir compte de la composition réelle de l'atmosphère. Ce complément d'atténuation est apporté par le facteur de trouble atmosphérique.

Le facteur de trouble atmosphérique peut être défini comme étant «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» (réf. 29).

Comme vu précédemment, l'atmosphère comporte toute une série de constituants qui ont chacun la propriété d'absorber une partie du rayonnement. 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 (éruptions volcaniques, émanations de vapeur d'eau issues d'une tour de refroidissement, pollution atmosphérique, etc.).

Chacun de ces constituants filtre le rayonnement solaire avec une importance variable qui dépend de leur longueur d'onde. Le taux de pénétration du rayonnement solaire dans l'atmosphère peut s'exprimer par un facteur de trouble atmosphérique qui influence la quantité de flux de chaleur que le sol capte.

De tous les paramètres qui entrent en considération dans le calcul du rayonnement solaire, le facteur total de trouble de l'atmosphère est certainement un des plus difficiles à estimer. En effet, ce facteur dépend fortement de conditions locales comme, par exemple, la pollution urbaine ou industrielle de la zone considérée.

Les principaux paramètres qui influencent le facteur de trouble atmosphérique sont:

- l'altitude du site  $z$ ;
- la pression de vapeur d'eau au sol;
- le coefficient d'Angström  $\beta_A$  qui caractérise le contenu de l'atmosphère en aérosols;
- l'angle d'élévation solaire  $\gamma$ ;
- l'époque de l'année tenant compte des variations journalières et saisonnières du facteur de trouble.

En pratique, il n'est pas possible de déterminer ces paramètres pour chaque condition locale. Aussi une relation issue d'une étude statistique menée à Uccle de 1951 à 1980 est proposée (réf. 29 et 30). Cette relation caractérise les conditions de trouble moyen par ciel serein:

$$T_L = 3,372 + 0,053 \gamma - 0,296 \cos(30 \cdot k) \quad (31)$$

$T_L$  facteur total de trouble de Linke;  
 $k$  mois de l'année.

Il est également possible de se référer au trouble minimal  $T_{Lm}$  qui correspond aux valeurs moyennes des minima mensuels du facteur total de trouble:

$$T_{Lm} = 2,730 + 0,027 \gamma - 0,198 \cos(30 \cdot k) \quad (32)$$

Ces relations sont considérées valables pour l'ensemble de la Belgique.

Précisons que ce facteur est d'application pour des conditions de ciel serein. L'influence des nuages sera traitée ultérieurement.

Le facteur d'extinction du rayonnement solaire représentatif du lieu considéré est égal au produit de  $\delta_R$  par  $T_L$ . Il en découle un facteur d'atténuation qui inclut tous les constituants de l'atmosphère.

#### A.2.1.2 Calcul du rayonnement solaire direct sur une surface horizontale

Ce paragraphe est issu de la réf. 27. Il décrit le rayonnement solaire direct atteignant une surface horizontale au sol pour les différentes conditions de nébulosité.

##### A.2.1.2.1 Rayonnement direct sur une surface horizontale par ciel serein

Cette composante du rayonnement solaire se déduit du flux de rayonnement solaire reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires et placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 km d'altitude) en lui appliquant un facteur d'atténuation qui traduit le phénomène d'extinction du rayonnement lors de son trajet dans l'atmosphère.

Le rayonnement solaire direct sur une surface réceptrice horizontale peut se calculer par la relation suivante:

$$I_c = I_{0j} \cdot \exp(-m \cdot \delta_R \cdot T_L) \cdot \sin\gamma \quad (33)$$

$I_c$  rayonnement direct sur une surface horizontale par ciel serein ( $\text{W/m}^2$ );  
 $m$  masse d'air optique;  
 $\delta_R$  épaisseur optique de Rayleigh par unité de masse;  
 $T_L$  facteur total de trouble atmosphérique;  
 $I_{0j}$  flux de rayonnement solaire reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires ( $\text{W/m}^2$ ). Il peut être estimé par la formule suivante:

$$I_{0j} = I_0 \cdot K_d \quad (34)$$

$I_0$  constante solaire. La constante solaire est une valeur moyenne du flux de rayonnement solaire égale à  $1353 \text{ W/m}^2$ ;  
 $K_d$  facteur correcteur du flux de rayonnement solaire qui tient compte de la variation de la distance terre-soleil induite par la trajectoire elliptique de la terre;

$$K_d = 1 + 0,03344 \cos(0,9856 \cdot j - 2,8^\circ) \quad (35)$$

$j$  numéro du jour de l'année à dater du 1er janvier.

#### A.2.1.2.2 Rayonnement direct sur une surface horizontale par ciel couvert

Par définition, lorsque le ciel est totalement couvert, le rayonnement solaire direct est nul. On a :

$$I_b = 0 \quad (36)$$

$I_b$  rayonnement direct sur une surface horizontale par ciel couvert ( $\text{W/m}^2$ ).

#### A.2.1.2.3 Rayonnement direct sur une surface horizontale par ciel partiellement couvert

Diverses théories existent. Toutes font intervenir le rayonnement direct par ciel serein, affecté d'une fonction correctrice qui dépend de la théorie utilisée.

Nous avons adopté, pour le rayonnement direct, la relation proposée à la réf. 27, représentative des conditions d'ensoleillement prévalant en Belgique.

$$I_\sigma = \bar{\sigma}_d^n \cdot I_c \quad (37)$$

$I_\sigma$  rayonnement solaire direct sur une surface horizontale par ciel partiellement couvert;  
 $\bar{\sigma}_d$  fraction d'insolation moyenne journalière. Pratiquement, elle traduit les conditions de nébulosité;

$$n = 1 + 0,36 \cdot \bar{\sigma}_d \quad (38)$$

#### A.2.1.3 Calcul du rayonnement solaire diffus sur une surface horizontale

Ce paragraphe décrit le rayonnement solaire diffus atteignant une surface horizontale au sol pour les différentes conditions de nébulosité. Toutes les relations sont issues de la réf. 30.

##### A.2.1.3.1 Rayonnement diffus sur une surface horizontale par ciel serein

La méthode retenue permettant d'estimer le rayonnement solaire diffus par ciel serein est basée sur de nombreuses mesures de répartition lumineuse issues de la photométrie<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> La photométrie s'intéresse entre autres à la luminance (flux émis par unité de surface projetée et par unité d'angle solide) de l'atmosphère terrestre.

L'intégration de l'apport de chaque unité infinitésimale d'angle solide qui constitue la voûte céleste permet d'obtenir l'intensité lumineuse arrivant sur une surface unitaire:

$$f_i = \frac{L_c(\gamma_i, \alpha_i)}{L_c(\gamma_i = \pi/2)} = \frac{(0,910 + 10 \exp(-3\varepsilon) + 0,45 \cos^2 \varepsilon) \cdot (1 - \exp(-0,32 \csc \gamma_i))}{0,27385 \cdot (0,910 + 10 \exp(-3\zeta) + 0,45 \sin^2 \gamma)} \quad (39)$$

$f_i$  intensité lumineuse par unité de surface;  
 $L_c(\gamma_i, \alpha_i)$  luminance du point de ciel de hauteur  $\gamma_i$  et d'azimut  $\alpha_i$  (W/m<sup>2</sup>);  
 $L_c(\gamma_i = \pi/2)$  luminance du zénith (W/m<sup>2</sup>). Celle-ci est égale à:

$$L_c(\gamma_i = \pi/2) = L'_c(\gamma) + L''_c(T) \quad (40)$$

$$L'_c(\gamma) = 0,8785 \gamma - 0,01322 \gamma^2 + 0,0003434 \gamma^3 \quad (41)$$

$$L''_c(T) = 0,44347 + 0,03644 \cdot T_L \quad (42)$$

$\zeta$  angle zénithal solaire (°);  
 $\varepsilon$  distance angulaire entre la direction du point du ciel considéré et la direction du soleil (°):

$$\varepsilon = \arccos(\sin \gamma_i \cdot \sin \gamma + \cos \gamma_i \cdot \cos \gamma \cdot \cos(\alpha_s - \alpha_i)) \quad (43)$$

En discrétisant l'hémisphère céleste en zones de 5 degrés, on obtient le rayonnement diffus  $D_c$  sur une zone horizontale par ciel serein (W/m<sup>2</sup>):

$$D_c = K_d \cdot L_c(\gamma_i = \pi/2) \cdot \left\{ 0,0076154 \cdot \sum_{\gamma_i=2,5^\circ}^{87,5^\circ} \sum_{\alpha_i=2,5^\circ}^{357,5^\circ} f_i \cdot \sin \gamma_i \cdot \cos \gamma_i \right\} \quad (44)$$

#### A.2.1.3.2. Rayonnement diffus sur une surface horizontale par ciel couvert

La relation suivante donne particulièrement de bons résultats pour les mois d'été lorsque que la hauteur du soleil est supérieure à 10°:

$$D_b = 2,444 \cdot K_d \cdot L_b(\gamma_i = \pi/2) \quad (45)$$

$D_b$  rayonnement diffus sur une surface horizontale par ciel couvert (W/m<sup>2</sup>);

$$L_b(\gamma_i = \pi/2) = 81,23 \cdot (1 + 0,36 \times \sin \gamma) \cdot \sin \gamma \quad (46)$$

#### A.2.1.3.3 Rayonnement diffus sur une surface horizontale par ciel partiellement couvert

L'expression du rayonnement diffus par ciel partiellement couvert  $D_\sigma$  est la suivante (W/m<sup>2</sup>):

$$D_\sigma = D_b \cdot (1 - \bar{\sigma}_h) + D_c \cdot (B \cdot \bar{\sigma}_h + (1-B) \cdot \bar{\sigma}_h^2) \quad (47)$$

$$B = 1,37 + 0,71 \sin \gamma \quad (48)$$

$$\bar{\sigma}_h = \zeta \cdot \bar{\sigma}_d \quad (49)$$

$\bar{\sigma}_h$  fraction d'insolation moyenne horaire

$$\zeta = 0,5 + 1,023 \cdot (1 - \exp(-0,0956 \times \gamma)) \cdot (1 - \bar{\sigma}_d) \quad (50)$$

#### A.2.1.4 Calcul du rayonnement solaire global sur une surface horizontale

Le rayonnement solaire global sur une surface horizontale au sol est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus.

Ainsi, pour le rayonnement par ciel serein, le rayonnement global est donné par la relation suivante ( $W/m^2$ ):

$$G_c = I_c + D_c \quad (51)$$

Pour le rayonnement par ciel totalement couvert, le rayonnement direct étant nul, l'expression du rayonnement global est la suivante ( $W/m^2$ ):

$$G_b = D_b(0,0) \quad (52)$$

Enfin, pour le rayonnement par ciel partiellement couvert, la relation est la suivante ( $W/m^2$ ):

$$G_\sigma = I_\sigma + D_\sigma \quad (53)$$

#### A.2.1.5 Albédo

La surface terrestre n'absorbe pas totalement le rayonnement solaire incident. Une partie est réfléchie vers l'atmosphère. La fraction du rayonnement effectivement absorbée s'appelle l'absorptance. Le rapport du rayonnement réfléchi par une surface au rayonnement incident s'appelle l'albédo (ou réflectance). Il dépend de:

- l'angle d'incidence du rayonnement incident;
- la nature du sol et son degré hygrométrique;
- l'humidité de la surface de réflexion;
- la longueur d'onde du rayonnement incident.

L'albédo d'un enrobé bitumineux se situe entre 0,10 et 0,20. Nous choisissons de considérer une valeur moyenne de 0,15.

Le rayonnement solaire global réellement capté par le revêtement bitumineux ( $\phi_{ray}$ ) est donc donné par la relation suivante ( $W/m^2$ ):

$$\phi_{ray} = 0,85 \cdot G \quad (54)$$

## A.2.2 Rayonnements terrestre et atmosphérique

Tout corps émet naturellement un rayonnement vers son environnement. La puissance rayonnée dépend de la nature du corps et de sa température. Elle peut être exprimée par la formule de Stephan-Boltzmann. Nous ne considérons ci-après que les contributions du rayonnement atmosphérique et du rayonnement terrestre.

Le rayonnement atmosphérique  $L\downarrow$  est donné par la relation suivante:

$$L\downarrow = \varepsilon_a \times \sigma (T_{air} + 273,16)^4 \quad (55)$$

$\sigma$  constante de Stephan-Boltzmann. Elle est égale à  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C}^4)$ ;  
 $T_{air}$  température de l'air (°C);  
 $\varepsilon_a$  émissivité de l'air par ciel couvert. Elle est donnée par la relation suivante:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \cdot (1 + 0,12 \cdot N^2) \quad (56)$$

$\varepsilon_0$  émissivité de l'air par ciel serein. Elle est donnée par la relation suivante:

$$\varepsilon_0 = 1 - 0,261 \cdot \exp(0,000777 \cdot T_{air}^2) \quad (57)$$

$N$  fraction du ciel couvert (%). Elle peut être approchée par la relation suivante:

$$N = 1 - \bar{\sigma}_d \quad (58)$$

Le rayonnement terrestre  $L\uparrow$  est donné par la relation suivante:

$$L\uparrow = \varepsilon_s \cdot \sigma (T_s + 273,16)^4 \quad (59)$$

$T_s$  température de la surface (°C);  
 $\varepsilon_s$  émissivité de la surface. Dans le cas d'un enrobé bitumineux, elle est comprise entre 0,88 et 0,95.

Considérant la contribution de ces deux rayonnements, le bilan radiatif (rayonnement infrarouge)  $L_r$  est donné par la relation suivante ( $\text{W}/\text{m}^2$ ):

$$L_r = L\uparrow + L\downarrow \quad (60)$$

# Chapitre A.3

## Elaboration du modèle de calcul final

Ce chapitre détaille l'élaboration du modèle final qui paramétrise la variation horaire et journalière de la température de l'air et qui incorpore les différentes formes de rayonnement. Ce modèle est ensuite validé et l'influence des différents paramètres est montrée.

Pour rappel, les différents échanges thermiques qui interagissent entre la surface du revêtement et l'environnement, sont schématisés, à la figure A.3.1.

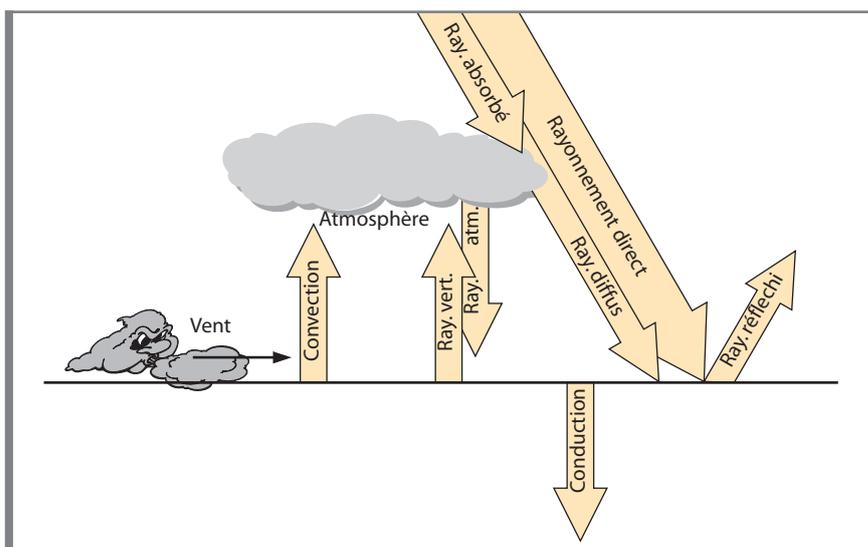


Figure A.3.1 Principaux échanges thermiques entre la surface du revêtement et l'environnement

### A.3.1 Hypothèses prises en compte dans le modèle de calcul final

Une structure routière (revêtement, fondation, sous-fondation et sol) est constituée de couches de nature et de caractéristiques thermiques différentes (tableau A.1.1). Contrairement à la première approche, il semble opportun de les distinguer dans la modélisation de la structure. La figure A.3.2 schématise la structure, l'indice «*i*» de la couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée étant égal à 1 et celui du massif étant égal à *n*.

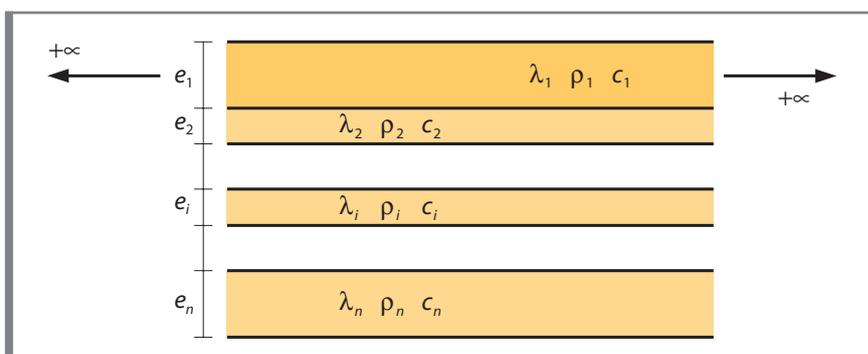


Figure A.3.2 Modélisation de la structure

Dans cette approche, le massif n'est plus semi-infini dans la direction verticale. Cependant, la température est considérée comme constante à une profondeur de 1 m, profondeur maximale prise en compte dans le modèle.

Les hypothèses suivantes sont prises en compte:

- les différentes couches de la structure sont infinies dans le plan horizontal;
- les différentes couches de la structure sont considérées isotropes et homogènes;
- la vitesse du vent est constante sur toute la période considérée;
- la température de la structure est constante à la profondeur de 1 m;
- les effets de bords (pour la couche nouvellement posée) ne sont pas pris en compte;
- tout apport éventuel d'eau à la surface du revêtement est négligé;
- il y a conservation du flux en tout point du massif;
- le rayonnement solaire agit uniquement à la surface du revêtement. Il ne constitue donc pas une source interne de chaleur.

### A.3.2 Paramétrisation de la variation de la température de l'air

La paramétrisation de la variation de la température de l'air, en fonction du jour et de l'heure, utilisée dans le modèle est issue de la réf. 32.

Cette paramétrisation permet d'affiner le modèle de calcul et notamment de tenir compte de l'amplitude thermique diurne (différence entre la température la plus chaude et la plus froide au sein d'une même journée). La variation de la température de l'air influence le transfert de chaleur par convection et le rayonnement atmosphérique.

La loi de variation horaire est développée en série de Fourier comme suit:

$$T_{air} = \frac{A + B \cos \omega t + C \cos 2\omega t + D \sin \omega t + E \sin 2\omega t}{10} \quad (61)$$

$T_{air}$  température de l'air (°C);

$$\omega = \frac{2\pi}{24} \quad (62)$$

$t$  temps universel TU (h);  
 $A, B, C, D, E$  paramètres tenant compte des variations journalières. Ils sont eux-mêmes développés en séries de Fourier. Par exemple pour  $A$ , on a:

$$A = K + L \cos \omega j + M \cos 2\omega j + N \sin \omega j + P \sin 2\omega j \quad (63)$$

$j$  numéro du jour de l'année à dater du 1er janvier;  
 $K, L, M, N, P$  paramètres dépendant de la fraction d'insolation.

$$\omega = \frac{2\pi}{366} \quad (64)$$

Les valeurs des paramètres  $K, L, M, N, P$ <sup>3</sup> sont données dans les tableaux suivants en fonction de l'insolation définie comme suit:

- journées à ciel serein:  $\bar{\sigma}_d \geq 0,8$
- journées à ciel couvert:  $\bar{\sigma}_d \leq 0,2$
- autres journées:  $0,2 < \bar{\sigma}_d < 0,8$

<sup>3</sup> Ces valeurs ont été déterminées pour la station d'Uccle. On les considère valables pour l'ensemble de la Belgique.

Journées à ciel serein					
	K	L	M	N	P
<b>A</b>	108,01	-100,21	-9,74	-21,76	4,72
<b>B</b>	-35,58	18,06	4,79	-0,22	0,20
<b>C</b>	9,28	2,92	-3,32	-2,17	0,55
<b>D</b>	-26,54	12,54	4,44	-3,88	-2,27
<b>E</b>	1,88	5,69	-0,94	-0,94	1,36

**Tableau A.3.1** Valeurs des paramètres par ciel serein

Journées à ciel couvert					
	K	L	M	N	P
<b>A</b>	96,86	-59,82	-0,62	-25,20	5,36
<b>B</b>	-12,17	7,31	0,72	-0,21	-0,10
<b>C</b>	2,35	0,05	-0,92	-0,40	0,33
<b>D</b>	-8,43	2,23	0,51	-1,03	-1,04
<b>E</b>	1,73	-0,18	-0,72	0,02	0,16

**Tableau A.3.2** Valeurs des paramètres par ciel couvert

Autres journées					
	K	L	M	N	P
<b>A</b>	101,81	-74,52	-2,64	-24,24	3,95
<b>B</b>	-23,62	14,73	2,09	-0,59	0,38
<b>C</b>	6,05	1,02	-2,10	-1,40	0,11
<b>D</b>	-15,13	8,37	2,01	-2,62	-0,79
<b>E</b>	3,54	2,25	-0,82	-0,28	1,05

**Tableau A.3.3** Valeurs des paramètres pour les autres situations

### A.3.3 Modélisation de l'évolution des températures dans la structure

#### A.3.3.1 Equations du champ thermique

L'équation du champ thermique pour chacune des couches  $i$  de la structure est:

$$\frac{\delta^2 T_i}{\delta x^2} - \frac{1}{a_i} \frac{\delta T_i}{\delta t} = 0 \quad (65)$$

$a_i$  diffusivité thermique de la couche  $i$  (m<sup>2</sup>/s);  
 $T_i$  température de la couche  $i$  (°C).

#### A.3.3.2 Conditions aux limites

##### A.3.3.2.1 Interface air – enrobé bitumineux

L'interface air – enrobé bitumineux nouvellement posée (d'indice  $i = 1$ ) est soumise à un flux rayonné, bilan de l'ensemble des phénomènes radiatifs:

$$r = \phi_{ray} + L\downarrow - L\uparrow \quad (66)$$

Elle est également le siège des phénomènes de conduction et de convection. L'hypothèse de conservation du flux permet de donner la condition limite suivante:

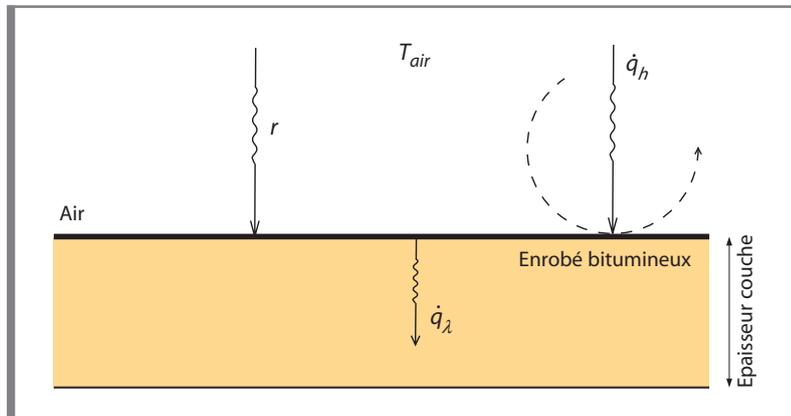
$$\dot{q}_\gamma = \dot{q}_h + r \quad (67)$$

En développant chaque terme, on a:

$$-\lambda_1 \frac{\delta T_1}{\delta x} \Big|_{x=0} = h \cdot (T_{air} - T_1(x,t)|_{x=0}) + \phi_{ray} + L\downarrow - L\uparrow \quad (68)$$

ou encore:

$$-\lambda_1 \frac{\delta T_1}{\delta x} \Big|_{x=0} = h \cdot T_1(x,t)|_{x=0} + L\uparrow = h \cdot T_{air} + \phi_{ray} + L\downarrow \quad (69)$$



**Figure A.3.3** Interface air – enrobé bitumineux

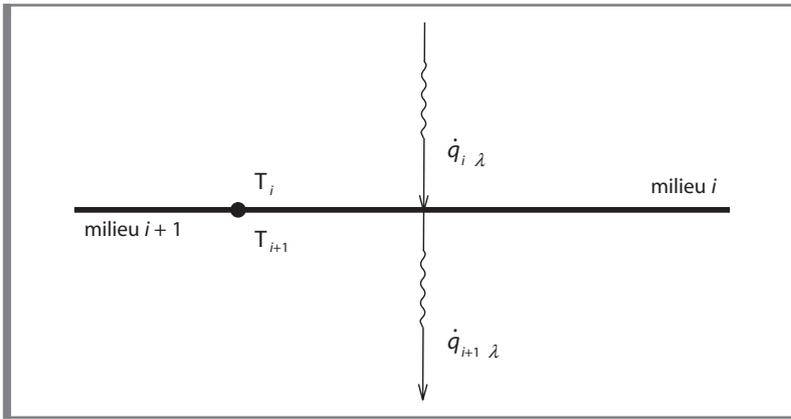
#### A.3.3.2.2 Interface entre deux couches

Soient les couches d'indice  $i$  et  $i + 1$ , seule une condition de conservation du flux de conduction est à prendre en compte à l'interface entre ces couches:

$$-\lambda_i \frac{\delta T_1}{\delta x} \Big|_{x=(i,i+1)} = -\lambda_{i+1} \frac{\delta T_{i+1}}{\delta x} \Big|_{x=(i,i+1)} \quad (70)$$

et

$$T_i(x,t)|_{x=(i,i+1)} = T_{i+1}(x,t)|_{x=(i,i+1)} \quad (71)$$



**Figure A.3.4** Interface entre deux couches de la structure

### A.3.3.2.3 Condition à une profondeur d'un mètre

A une profondeur suffisamment importante, la température de la structure n'est plus influencée par l'apport calorifique de la couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée. Cette profondeur est, par hypothèse, égale à 1 m. On peut donc déduire la relation suivante:

$$T_n(x = 1m, t) = Cte \quad (72)$$

$Cte$  température constante à la profondeur de 1 m (°C).

### A.3.3.3 Distribution initiale des températures dans la structure

La répartition initiale, au temps  $t = 0$ , des températures dans la structure est donnée par la relation suivante:

$$T_i(x, 0) = f(x) \quad (73)$$

$f(x)$  fonction donnant la distribution initiale des températures dans la structure (°C).

Cette distribution est donnée à la figure A.1.4.

### A.3.3.4 Système d'équations

L'évolution des températures dans la structure, d'un état initial vers l'état final correspondant à un nouvel équilibre thermique, est donnée par le système d'équations suivant:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\delta^2 T_i}{\delta x^2} - \frac{1}{a_i} \frac{\delta T_i}{\delta t} = 0 \\ -\lambda_1 \frac{\delta T_1}{\delta x} \Big|_{x=0} = h \cdot T_1(x, t) \Big|_{x=0} + L \uparrow = h \cdot T_{air} + \phi_{ray} + L \downarrow \\ -\lambda_i \frac{\delta T_1}{\delta x} \Big|_{x=(j,i+1)} = -\lambda_{i+1} \frac{\delta T_{i+1}}{\delta x} \Big|_{x=(j,i+1)} \\ T_i(x, t) \Big|_{x=(j,i+1)} = T_{i+1}(x, t) \Big|_{x=(j,i+1)} \\ T_n(x = 1m, t) = Cte \\ T_i(x, 0) = f(x) \end{array} \right. \quad (74)$$

### A.3.4 Implémentation du modèle de calcul final

Le modèle de calcul final a fait l'objet d'une implémentation par différences finies. Le détail est donné à la réf. 23.

### A.3.5 Validation du modèle de calcul final

#### A.3.5.1 Méthodologie

La méthodologie retenue pour valider le modèle de calcul sur chantier est identique à celle utilisée lors de la première validation (cf. A.1.4 *Validation et limitation du modèle de calcul restreint*).

Une amélioration a cependant été apportée dans la prise en compte de la vitesse du vent. En effet, un thermo-anémomètre a été utilisé (photo A.3.1). Celui-ci permet, entre autres, d'obtenir les vitesses de vent moyenne, maximale et minimale sur la période de mesure. Il était placé à une hauteur de 1 m à proximité de la couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée.



Photo A.3.1 Thermo-anémomètre

#### A.3.5.2 Caractéristiques des chantiers

Lors de cette seconde phase de validation, des mesures ont été prises sur 4 chantiers différents. Leurs caractéristiques sont reprises aux tableaux A.3.4 et A.3.5.

Chantier	Date	$T_{air}$ (°C)	$T_{support}$ (°C)	$T_{pose}$ (°C)	$v_{vent}$ (m/s)	Nébulosité (%)
5	10/04/2005	10,5	10	171	1,24	85
6	07/04/2005	11,1	10	153	0,80	70 à 80
7	08/04/2005	10,1	9	155	1,00	100
8	28/09/2004	18,2	13	165	1,10	100

Tableau A.3.4 Caractéristiques des différents chantiers de validation

Chantier	Heure de départ	Durée des mesures (min)	Nombre de mesures
5	9:28	115	5 x 3
6	11:43	115	3 x 3
7	11:24	82	3 x 3
8	10:36	150	4 x 3

**Tableau A.3.5** Descriptif des mesures

Le modèle final nécessitant la connaissance de la structure, celle-ci est reprise au tableau A.3.6 pour chaque chantier. Enfin, les caractéristiques thermiques des matériaux sont données au tableau A.3.7.

Chantier	Nouvelle couche (mm)		Sous-couche (mm)		Fondation (mm)		Massif
5	BB-4C <sup>1</sup>	40	RBIT <sub>racl</sub> <sup>3</sup>	20	Pavage	150	Sable
6	SMA-C <sup>2</sup>	40	BB-3D	30	Pavage	150	Sable
7	BB-4C	40	RBIT <sub>racl</sub>	30	Pavage	160	Sable
8	BB-3A	50	-	-	Empierrement	200	Sable

<sup>1</sup> Béton bitumineux de couche d'usure (calibre 0/10)

<sup>2</sup> Stone Mastic Asphalt (calibre 0/10)

<sup>3</sup> Revêtement bitumineux dont une partie a été raclée

**Tableau A.3.6** Structure des différents chantiers de validation

Matériau	$\lambda$ (W/m.°C)	$c$ (J/kg.°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
BB-4C	2,0	869	2 350
SMA-C	1,2	921	2 400
BB-3A	2,0	869	2 350
BB-3D	2,0	869	2 350
RBIT <sub>racl</sub>	2,0	921	2 400
Pavage	2,4	794	2 400
Empierrement	1,31	837	1 750
Sable	0,33	879	1 520

**Tableau A.3.7** Caractéristiques thermiques des matériaux

Note:

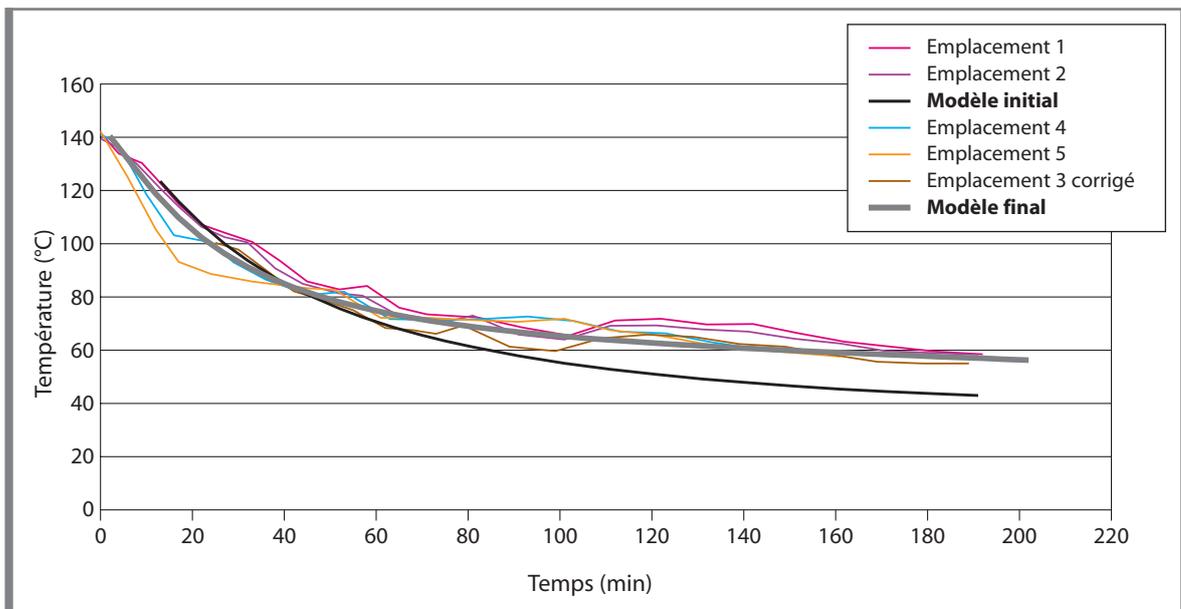
- La détermination des matériaux et de leur épaisseur ne ressort pas d'investigations mais des informations communiquées par l'entrepreneur effectuant les travaux. Elles sont donc indicatives.
- Le massif est la partie de la structure située entre la fondation et 1 m de profondeur. Il comprend une sous-fondation éventuelle. Dans un but de simplification, le sable a été choisi comme matériau constitutif du massif.

### A.3.5.3 Comparaison entre le modèle final et les résultats de mesure

#### A.3.5.3.1 Chantier n° 4

Nous avons vu au A.1.4.3.2 que le modèle initial ne permettait pas de modéliser correctement la descente en température d'une couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée lorsque les conditions d'ensoleillement étaient importantes et que la vitesse du vent était très faible.

La courbe de descente en température a été recalculée à l'aide du modèle final en tenant compte d'une vitesse du vent égale à 0,5 m/s. Cette courbe est présentée à la figure A.3.5.



**Figure A.3.5** Chantier n° 4 - Comparaison entre les courbes mesurées et la courbe calculée avec le modèle final

Nous constatons que la courbe calculée à l'aide du modèle final donne une bonne approximation de la descente en température de la couche d'enrobé nouvellement posée.

#### A.3.5.3.2 Nouveaux chantiers

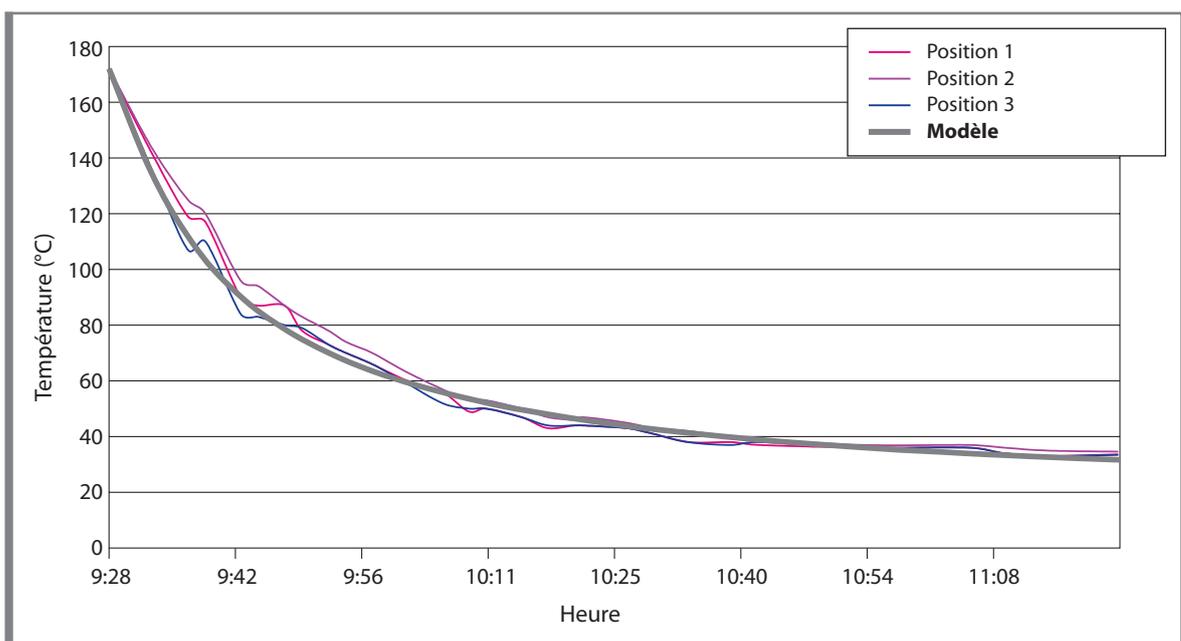
*Note:*

Le modèle final tenant compte de la variation horaire de la température de l'air:

- la courbe de descente en température est donnée en fonction de l'heure;
- la courbe calculée ne peut être comparée qu'à une seule courbe mesurée (sauf si le laps de temps entre la mesure de température des différents emplacements est réduit).

▪ Chantier n° 5

La figure A.3.6 donne la comparaison entre la courbe calculée et les courbes mesurées au niveau de l'emplacement 1.

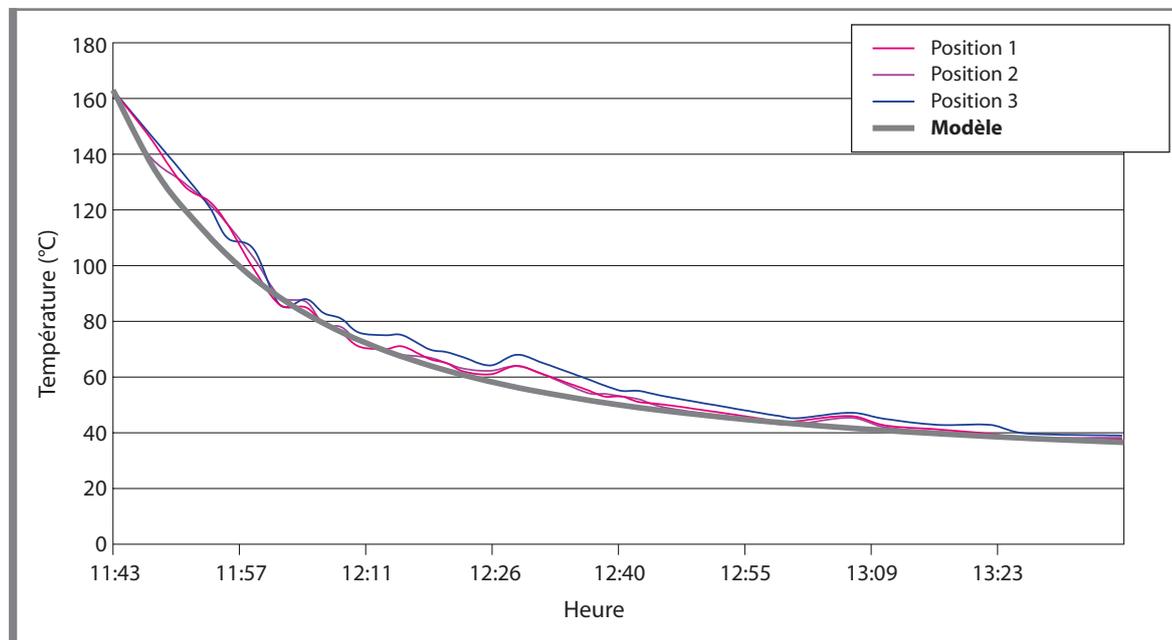


**Figure A.3.6** Chantier n° 5 - Emplacement 1 - Comparaison entre les courbes mesurées et la courbe calculée

On constate une bonne corrélation entre le modèle et la réalité. Un comportement similaire est constaté pour les autres emplacements.

▪ *Chantier n° 6*

La figure A.3.7 donne la comparaison entre la courbe calculée et les courbes mesurées au niveau de l'emplacement 3.



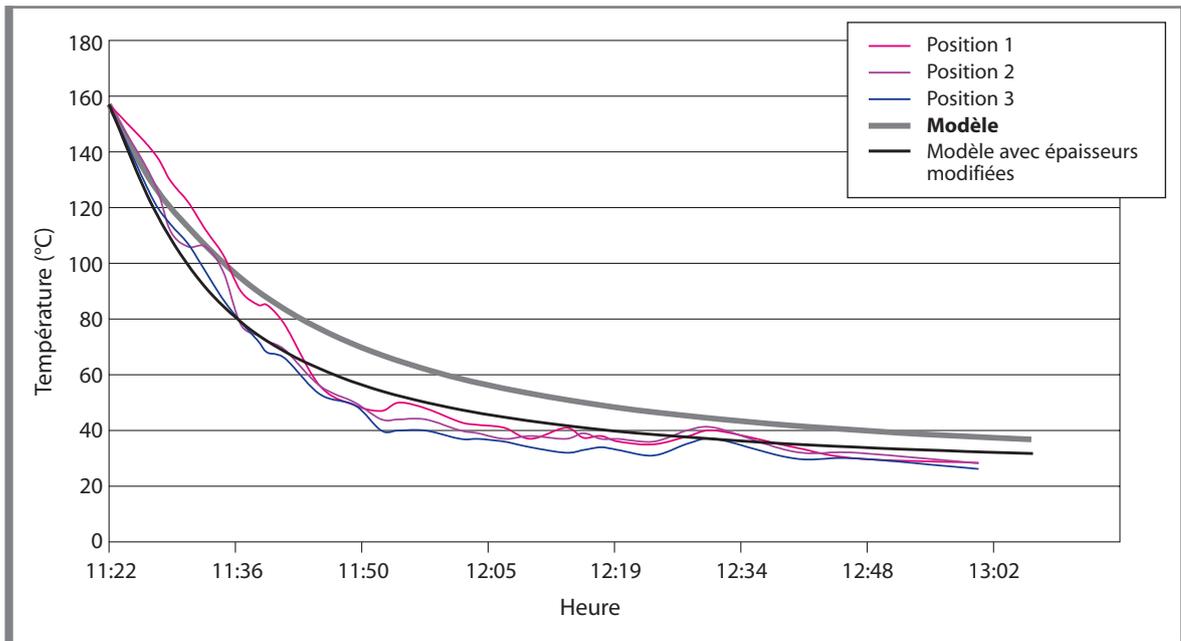
**Figure A.3.7** Chantier n° 6 - Emplacement 3 - Comparaison entre les courbes mesurées et la courbe calculée

On constate une bonne corrélation entre le modèle et la réalité pour l'emplacement 3. En ce qui concerne l'emplacement 2 (figure A.3.8), la courbe calculée est supérieure à celles observées sur chantier. Cette différence semble être due à une erreur dans les épaisseurs prises en compte dans le modèle. En effet, le chantier considéré consistait en le raclage du revêtement bitumineux jusqu'au pavage (présentant un bombement important), en la pose d'une couche d'enrobé bitumineux de type BB-3D en épaisseur variable de manière à compenser le bombement du pavage et, en la pose d'une couche de roulement en enrobé bitumineux de type SMA-C (normalement en épaisseur constante). La mesure de la température étant prise au centre de la bande (correspondant au centre de la voirie pour ce chantier), il est fortement probable que les épaisseurs annoncées n'aient pas été atteintes à cet endroit.

L'épaisseur des couches d'enrobé bitumineux a été modifiée comme suit:

- SMA-C: 40 mm → 30 mm;
- BB-3D: 30 mm → 20 mm.

La courbe calculée obtenue est présentée à la figure A.3.8.

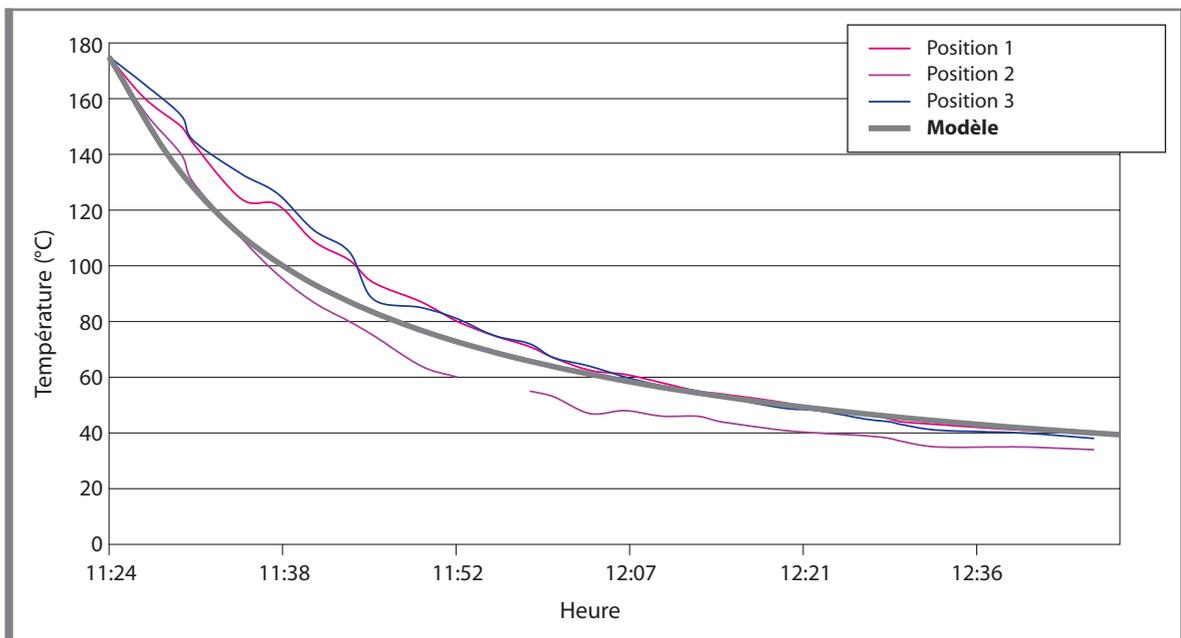


**Figure A.3.8** Chantier n°6 - Emplacement 2 - Comparaison entre les courbes mesurées et la courbe calculée

On constate que la courbe *Modèle avec épaisseurs modifiées* colle mieux à la réalité. Après un temps de refroidissement de 100 min, la différence entre les deux courbes calculées est d'environ 5 °C.

▪ Chantier n°7

La figure A.3.9 donne la comparaison entre la courbe calculée et les courbes mesurées au niveau de l'emplacement 3.



**Figure A.3.9** Chantier n°7 - Emplacement 3 - Comparaison entre les courbes mesurées et la courbe calculée

On constate une bonne corrélation entre le modèle et la réalité.

## Chantier n° 8

La figure A.3.10 donne la comparaison entre la courbe calculée et les courbes moyennes par emplacement. La prise en compte de tous les emplacements a été possible dans ce cas-ci vu le faible laps de temps entre les mesures.

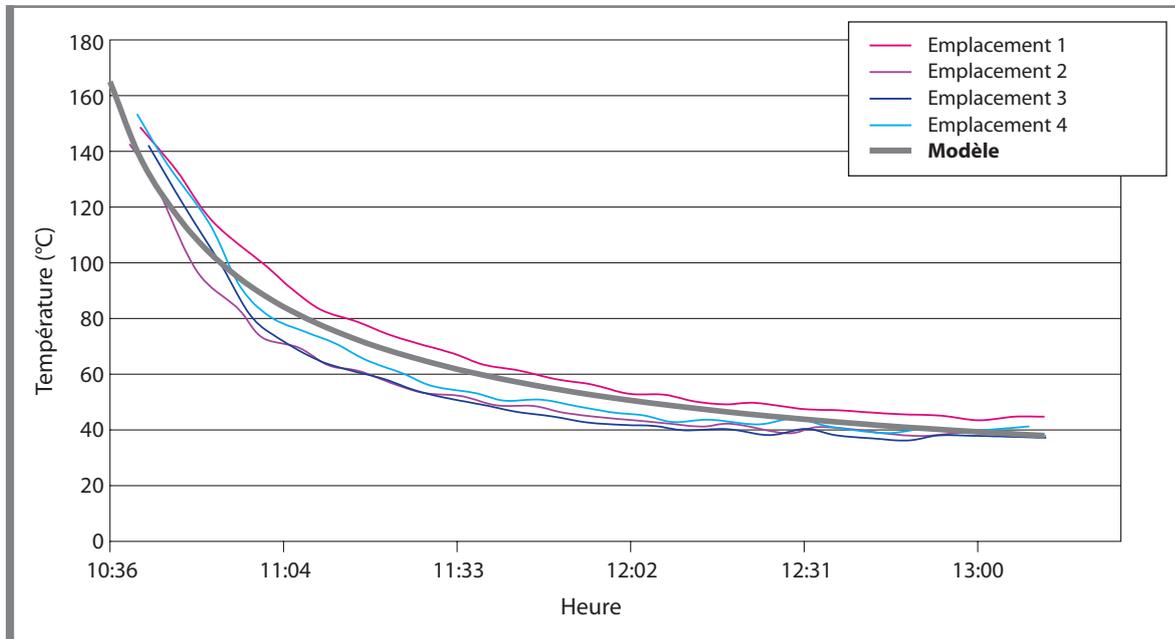


Figure A.3.10 Chantier n° 8 - Comparaison entre les courbes mesurées et la courbe calculée

On constate que la courbe calculée colle aux courbes mesurées.

### A.3.5.4 Commentaires

La validation a été réalisée pour des enrobés usuels (bétons bitumineux et SMA). Il n'a pas été possible de réaliser des mesures sur un chantier de pose d'enrobé drainant (ED), couche pour laquelle on peut supposer que la descente en température est plus rapide puisque c'est un enrobé ouvert.

La validation montre que le modèle traduit bien la réalité du chantier même dans des cas extrêmes de température et de vitesse du vent.

Il apparaît que l'épaisseur des couches influence la descente en température mais de façon limitée.

## A.3.6 Etude de la variation des paramètres du modèle

Dans ce paragraphe, nous étudions l'influence de la variation des paramètres liés aux conditions climatiques sur la courbe de refroidissement d'une couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée. Le refroidissement de couches d'épaisseurs et de compositions différentes est aussi étudié.

### A.3.6.1 Choix des paramètres

Mis à part les caractéristiques thermiques des matériaux constitutifs de la structure, les paramètres nécessaires au modèle de calcul final sont identiques à ceux utilisés pour le premier modèle. Ils sont repris au A.1.3 *Détermination des paramètres nécessaires au modèle de calcul restreint*.

Les valeurs des caractéristiques thermiques, mentionnées au tableau A.1.1, sont variables d'une référence à l'autre et ce, parfois fortement. Les valeurs utilisées pour la validation du modèle de calcul final

permettent d'affiner ces caractéristiques. Il faut cependant noter que la conductivité thermique, la chaleur spécifique et la masse volumique des couches de la structure situées sous le revêtement n'influencent que très peu la courbe d'évolution de la température dans la couche d'enrobé nouvellement posée. Quant aux couches d'enrobé bitumineux, dont la couche nouvellement posée, la variation de leurs caractéristiques thermiques influence significativement la descente en température pendant un certain temps; cette influence s'estompe après quelques heures de refroidissement.

La structure envisagée est présentée au tableau A.3.8.

Matériau	Epaisseur (mm)	$\lambda$ (W/m.°C)	$c$ (J/kg.°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
BB-1B	50	2,00	869	2 350
BB-3A	70	2,00	869	2 350
Empierrement	200	1,31	837	1 750
Sous-fondation en sable	200	1,00	879	1 520
Sol cohésif	480	1,59	1 214	2 066

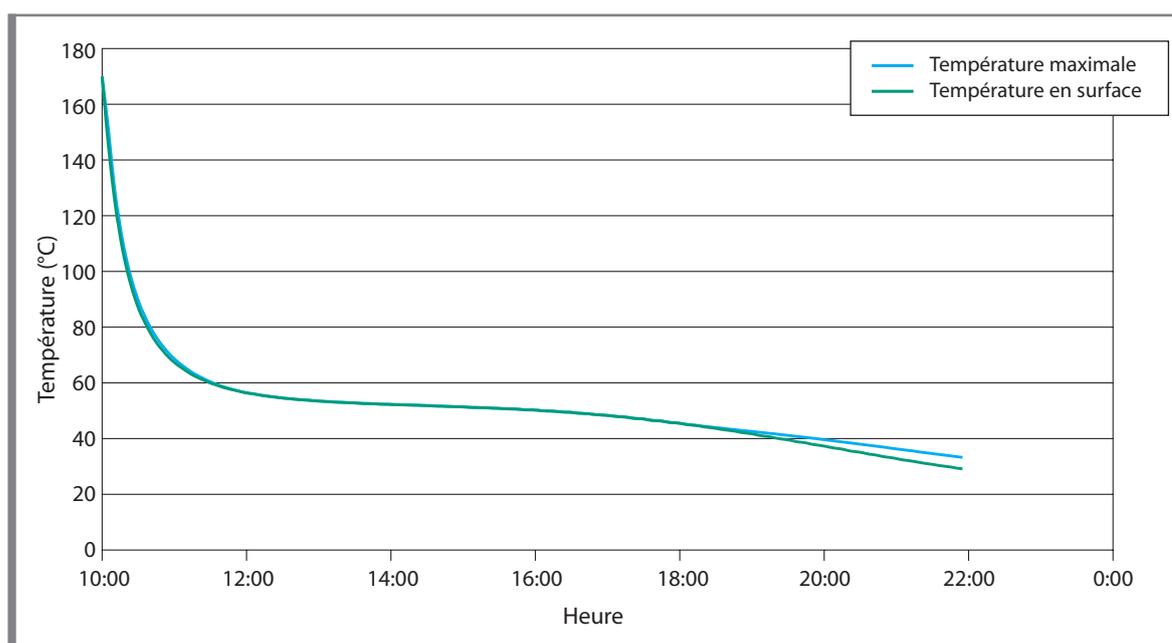
**Tableau A.3.8** Caractéristiques thermiques des matériaux

La température de pose est égale à 170 °C, la température de remise en circulation est égale à 33 °C (bitume 50/70) et la température du support est égale à 14 °C.

Sauf lorsque l'influence du paramètre concerné est étudiée, les courbes de descente en température de la couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée sont données pour:

- une mise en œuvre le 15 juillet;
- un début de compactage à 10:00;
- une vitesse de vent de 0,5 m/s;
- un ciel serein.

Dans ce paragraphe, nous considérons la température maximale dans la couche d'enrobé bitumineux nouvellement posé. Cette température correspond à la température de surface au début du refroidissement et à d'autres moments, dans certaines conditions de rayonnement. La figure A.3.11 compare la température maximale et la température en surface de la couche.



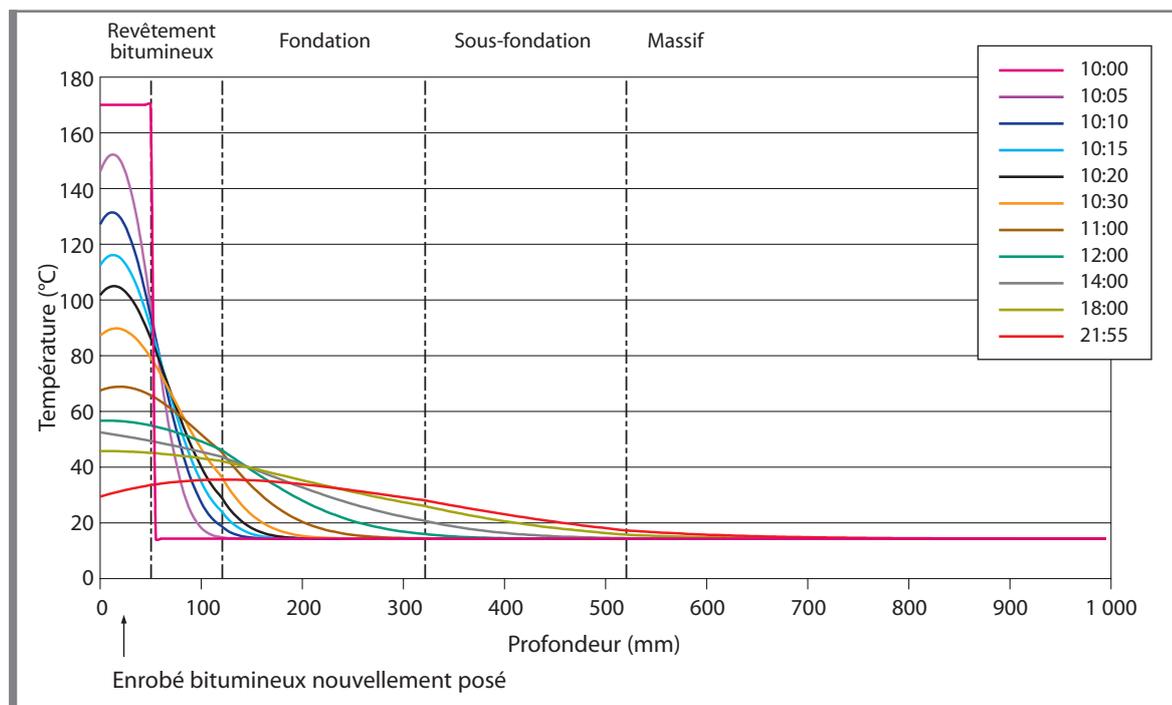
**Figure A.3.11** Refroidissement de l'enrobé nouvellement posée: températures maximale et en surface

Note:

Les deux courbes présentent un point d'inflexion vers 17:00. Celui-ci est dû, entre autres, à la diminution de la puissance des rayonnements solaire et atmosphérique par rapport à celle du rayonnement terrestre.

### A.3.6.2 Evolution de la température au sein de la structure

La figure A.3.12 illustre l'évolution de la température au sein de la structure. On distingue clairement au temps  $T = 0$  (10:00) une température de 170 °C dans la couche nouvellement posée et une température de 14 °C pour le reste de la structure. On constate également que la température reste constante sous une profondeur de 800 mm.



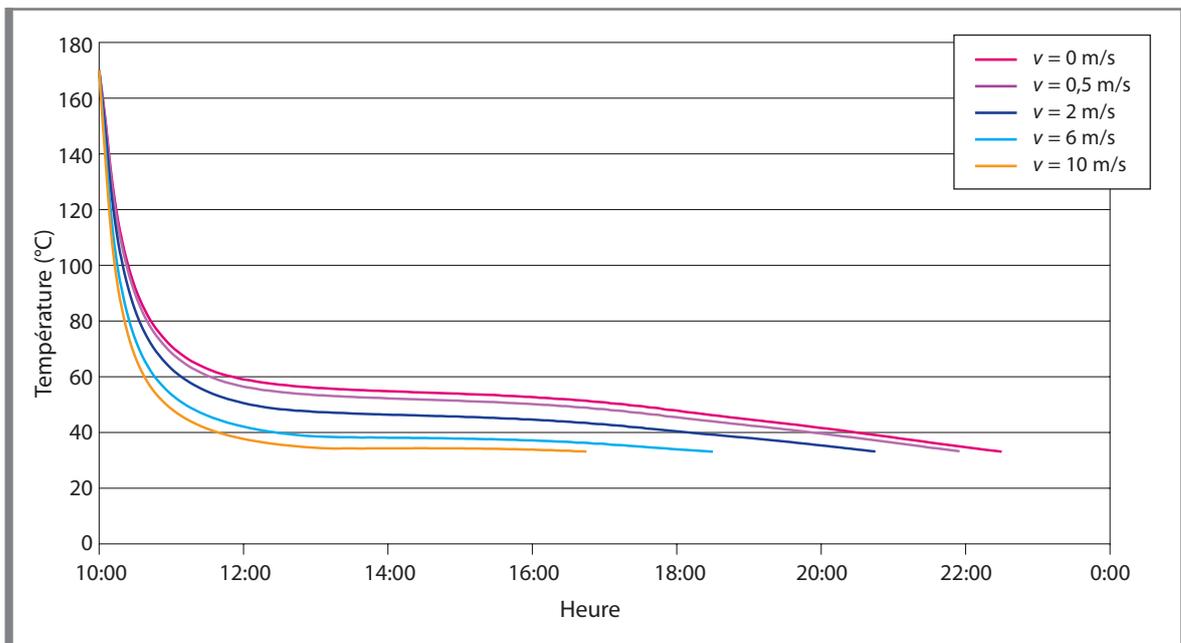
**Figure A.3.12** Evolution de la température au sein de la structure

Contrairement à ce que l'on observe à la figure A.1.5 illustrant la descente en température d'une couche de BB-1B nouvellement posée, calculée avec le premier modèle, on relève que la température maximale ne se trouve pas à tout moment dans la nouvelle couche:

- on constate qu'à 21:55, la température maximale est située à l'interface BB-3A/Empierrement. Ce phénomène est lié principalement à l'évolution de la température de l'air (plus basse la nuit);
- la température est maximale, à la surface du nouvel enrobé bitumineux, à 14:00. C'est dans ce cas les rayonnements solaire et atmosphérique qui en sont la cause (ciel serein).

### A.3.6.3 Influence de la vitesse du vent sur le refroidissement

La vitesse du vent influence le refroidissement de la couche d'enrobé bitumineux par le biais du phénomène de convection. En effet, plus cette vitesse augmente, plus le temps nécessaire au refroidissement est court. Les courbes de refroidissement de l'enrobé bitumineux sont présentées à la figure A.3.13 pour une vitesse de vent comprise entre 0 et 10 m/s.

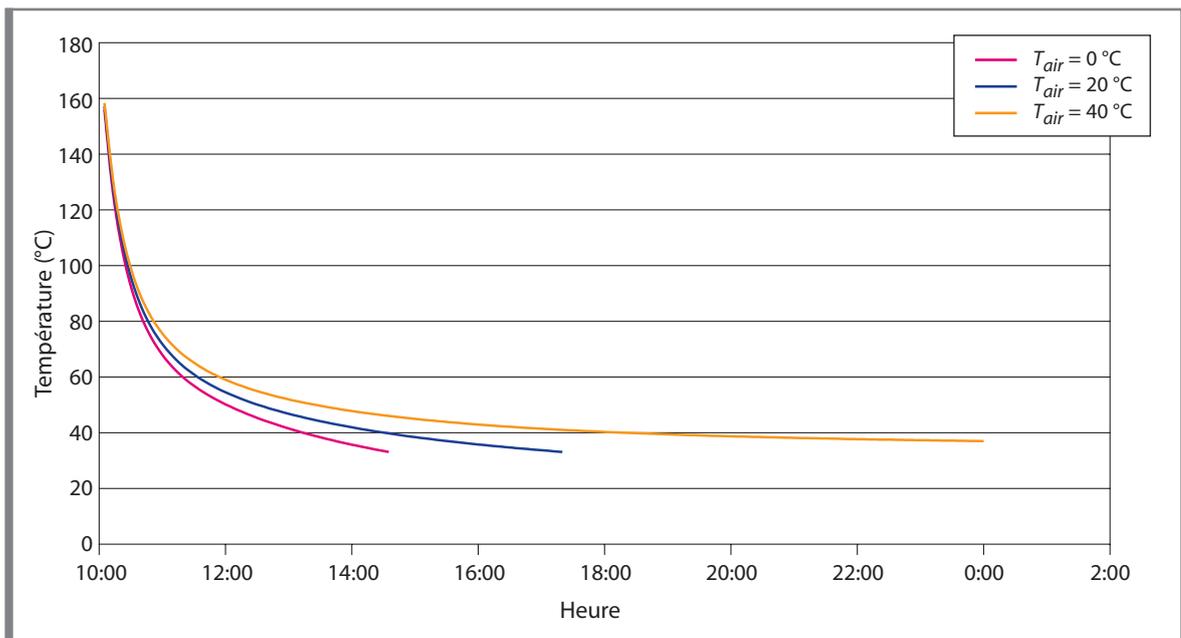


**Figure A.3.13** Influence de la vitesse du vent sur le refroidissement de la couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée

#### A.3.6.4 Influence de la température de l'air et des formes de rayonnement sur le refroidissement

La température de l'air dépend entre autres, des rayonnements solaire et atmosphérique. Il est donc nécessaire de considérer leur influence sur le refroidissement de la couche d'enrobé bitumineux en parallèle avec celle de la température de l'air. L'influence du rayonnement terrestre est également pris en compte ici.

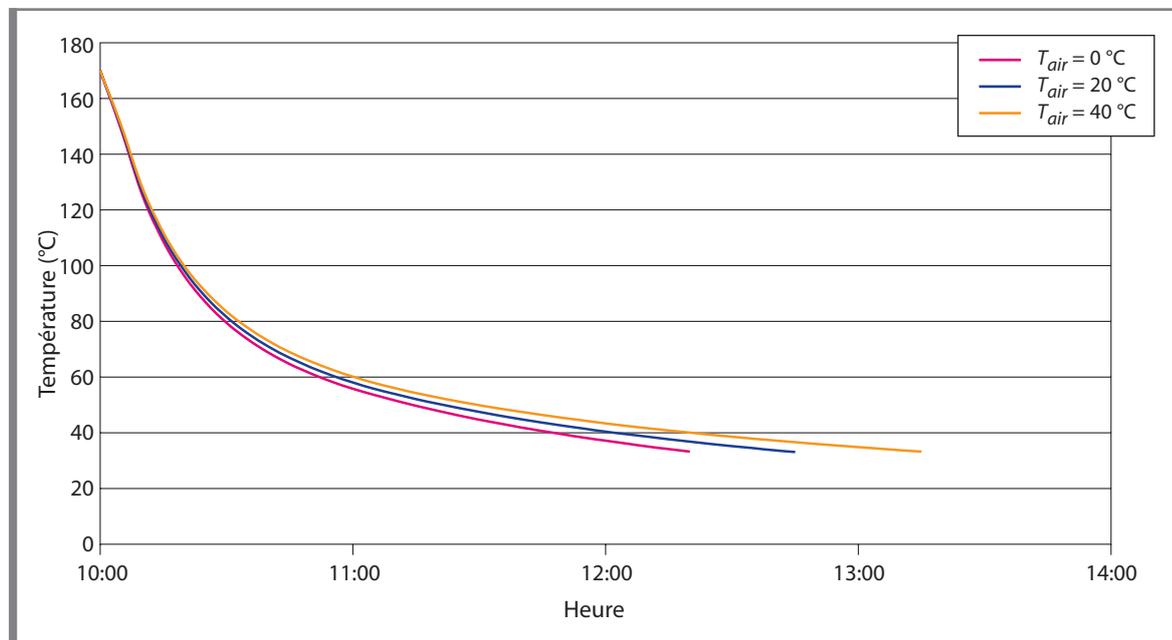
Dans une première approche, identique à celle du modèle de calcul restreint, nous ne considérons pas l'influence des différents types de rayonnement sur le refroidissement. Précisons que la température de l'air est considérée constante sur toute la durée du refroidissement. La figure A.3.14 illustre le phénomène pour trois températures de l'air différentes, à savoir: 0 °C, 20 °C et 40 °C.



**Figure A.3.14** Influence de la température de l'air sur le refroidissement de la couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée (les différents types de rayonnements ne sont pas pris en compte)

On constate que pour une température de l'air de 40 °C, la température dans la couche d'enrobé bitumineux n'atteint jamais le seuil fixé à 33 °C. Comme constaté lors de la validation du premier modèle de calcul, cette approche ne reflète pas la réalité.

La figure A.3.15 illustre le refroidissement de la couche d'enrobé bitumineux pour les mêmes températures de l'air, le rayonnement terrestre étant dans ce cas considéré. Dans ce cas également, la température de l'air est constante sur toute la durée du refroidissement.



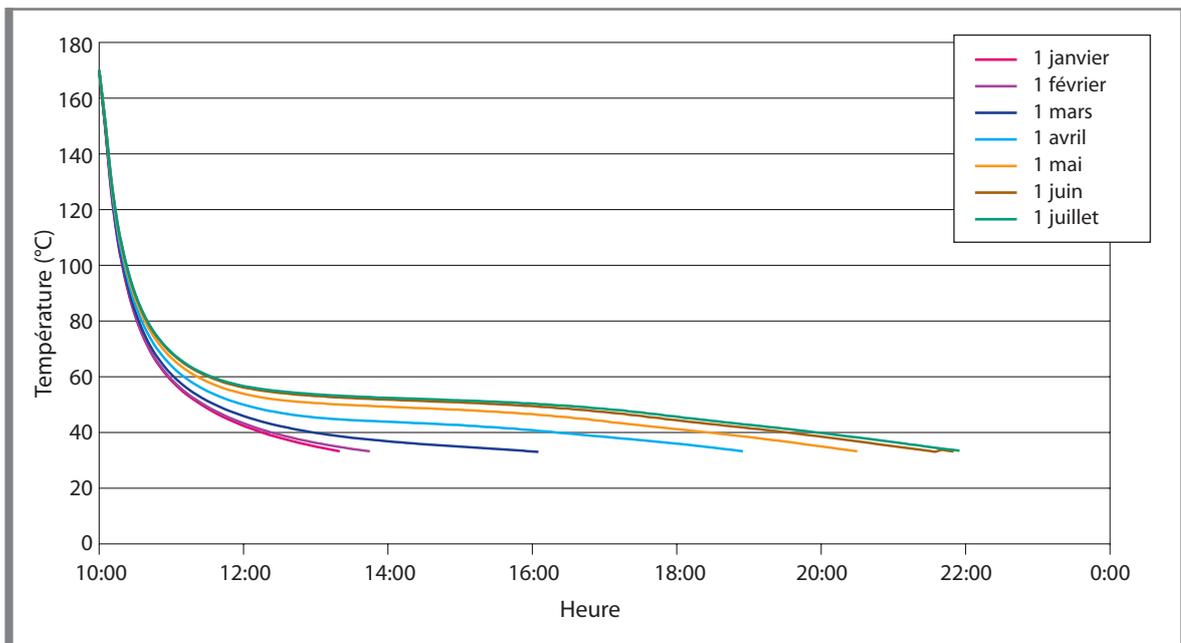
**Figure A.3.15** Influence de la température de l'air sur le refroidissement de la couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée (seul le rayonnement terrestre est pris en compte)

La température de 33 °C est atteinte dans tous les cas, et ce beaucoup plus rapidement que pour le cas précédent. Cela montre l'influence du transfert de chaleur par rayonnement, de la couche d'enrobé bitumineux vers l'atmosphère, sur le refroidissement de l'enrobé bitumineux. Par conséquent, il est important de prendre le rayonnement terrestre en compte.

Enfin, la figure A.3.16 illustre le refroidissement de la couche d'enrobé bitumineux pour différentes dates d'exécution. Ces courbes intègrent :

- le rayonnement solaire;
- le rayonnement atmosphérique;
- le rayonnement terrestre;
- la variation horaire de la température de l'air.

Les dates considérées sont les premiers de chaque mois.



**Figure A.3.16** Influence de la date d'exécution sur le refroidissement de la couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée

La durée de refroidissement est la plus petite le 1<sup>er</sup> janvier et la plus longue le 1<sup>er</sup> juillet. Les durées de refroidissement des mois d'août à décembre sont semblables, respectivement, à celles des mois de juin à février.

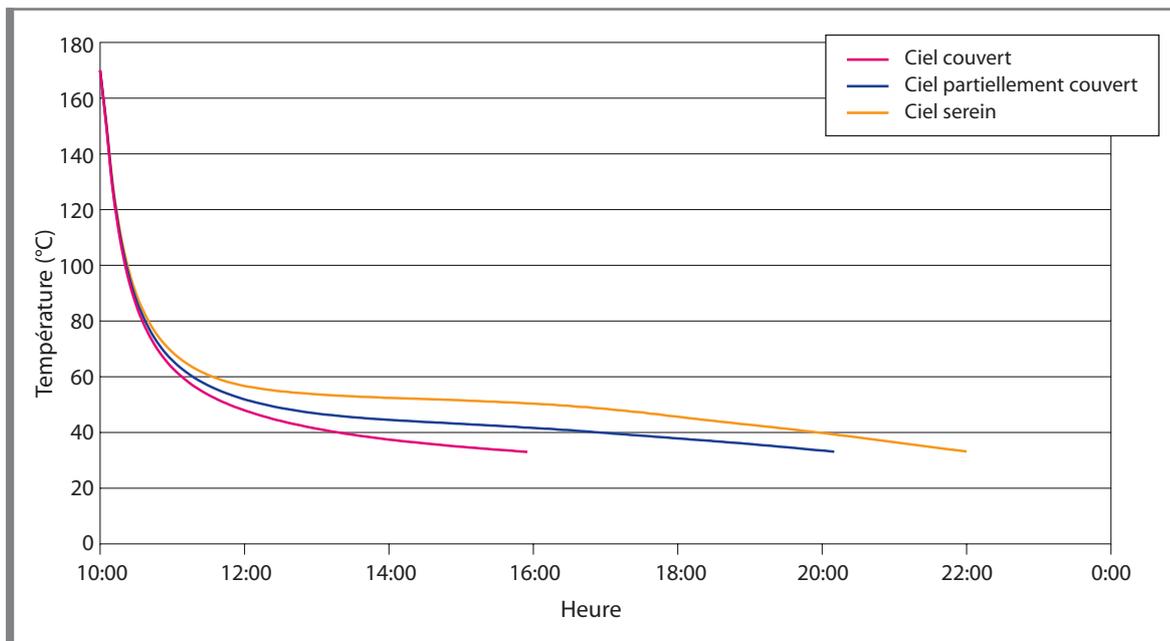
Le tableau A.3.9 présente la durée de refroidissement de la couche d'enrobé bitumineux pour les jours considérés.

Date de pose	Durée du refroidissement (min)
1 janvier	219
1 février	253
1 mars	363
1 avril	539
1 mai	633
1 juin	696
1 juillet	722
1 août	702
1 septembre	631
1 octobre	516
1 novembre	339
1 décembre	247

**Tableau A.3.9** Durée du refroidissement en fonction de la date de pose

#### A.3.6.5 Influence de la nébulosité sur le refroidissement

Le couvert nuageux peut fortement influencer la durée du refroidissement de la couche d'enrobé bitumineux puisqu'il agit directement sur la quantité de flux de rayonnement atteignant la surface du revêtement. La figure A.3.17 illustre ce phénomène.



**Figure A.3.17** Influence de la nébulosité sur le refroidissement de la couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée

La durée du refroidissement peut être jusqu'à deux fois plus rapide quand le ciel est couvert (359 min par rapport à 719 min lorsque le ciel est serein).

#### A.3.6.6 Influence de l'heure de pose sur le refroidissement

L'heure de pose, ou plus précisément, l'heure du début de compactage de la couche d'enrobé bitumineux a une influence sur sa durée de refroidissement. Cette influence est liée à la puissance de rayonnement à laquelle est soumise la couche d'enrobé bitumineux tout au long de la journée. Ainsi, lorsque le compactage est réalisé en fin de journée, la puissance absorbée est moindre et le refroidissement plus rapide.

Le tableau A.3.10 reprend la durée de refroidissement de la couche d'enrobé nouvellement posée en fonction de l'heure de pose.

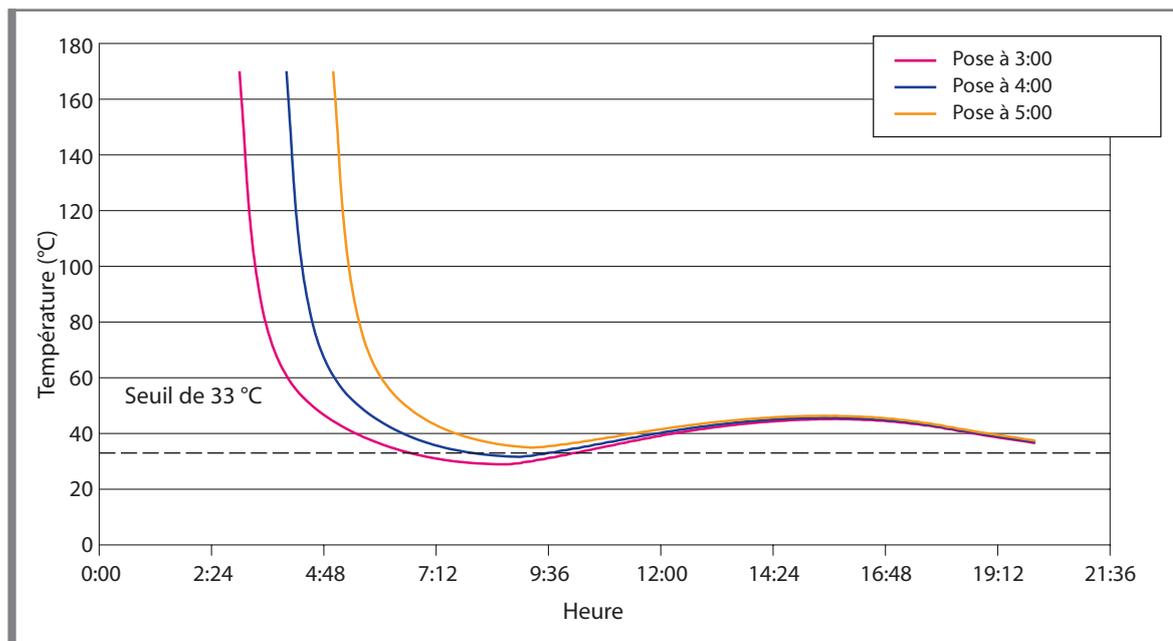
Notons qu'il s'agit du scénario le plus sévère puisque la date de pose est le 15 juillet, le ciel est serein (nébulosité de 0 %) et la vitesse du vent très faible.

Heure de pose	Durée du refroidissement (min)	Heure de pose	Durée du refroidissement (min)
0:00	222	12:00	602
1:00	219	13:00	542
2:00	217	14:00	483
3:00	218	15:00	427
4:00	238	16:00	374
5:00	987	17:00	327
6:00	935	18:00	289
7:00	883	19:00	262
8:00	830	20:00	244
9:00	775	21:00	234
10:00	719	22:00	229
11:00	661	23:00	226

**Tableau A.3.10** Durée du refroidissement en fonction de l'heure de pose pour une mise en œuvre le 15 juillet

De 20:00 à 4:00, la durée de refroidissement est d'environ 4 heures. Cela est dû au fait que pendant ce laps de temps, le flux de rayonnement solaire et atmosphérique est très faible et la température de l'air varie peu.

A 5:00, la durée de refroidissement passe subitement à environ 16 heures. Cela signifie que la température seuil de 33 °C n'est atteinte que 16 heures après la mise en œuvre. L'explication réside dans le fait que le modèle de calcul final arrête les itérations dès que la température seuil est atteinte et ne tient donc pas compte d'une remontée éventuelle de la température de la couche, conséquence de l'augmentation de la température de l'air et des rayonnements solaire et atmosphérique très importants à cette époque de l'année. On comprend dès lors que la température des couches d'enrobé bitumineux, posées avant 5:00, remonte au dessus du seuil. La figure A.3.18 illustre ce phénomène.



**Figure A.3.18** Augmentation de la température de la couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée

A titre de comparaison, le tableau A.3.11 reprend les durées de refroidissement de la couche d'enrobé bitumineux pour une pose réalisée le 15 janvier.

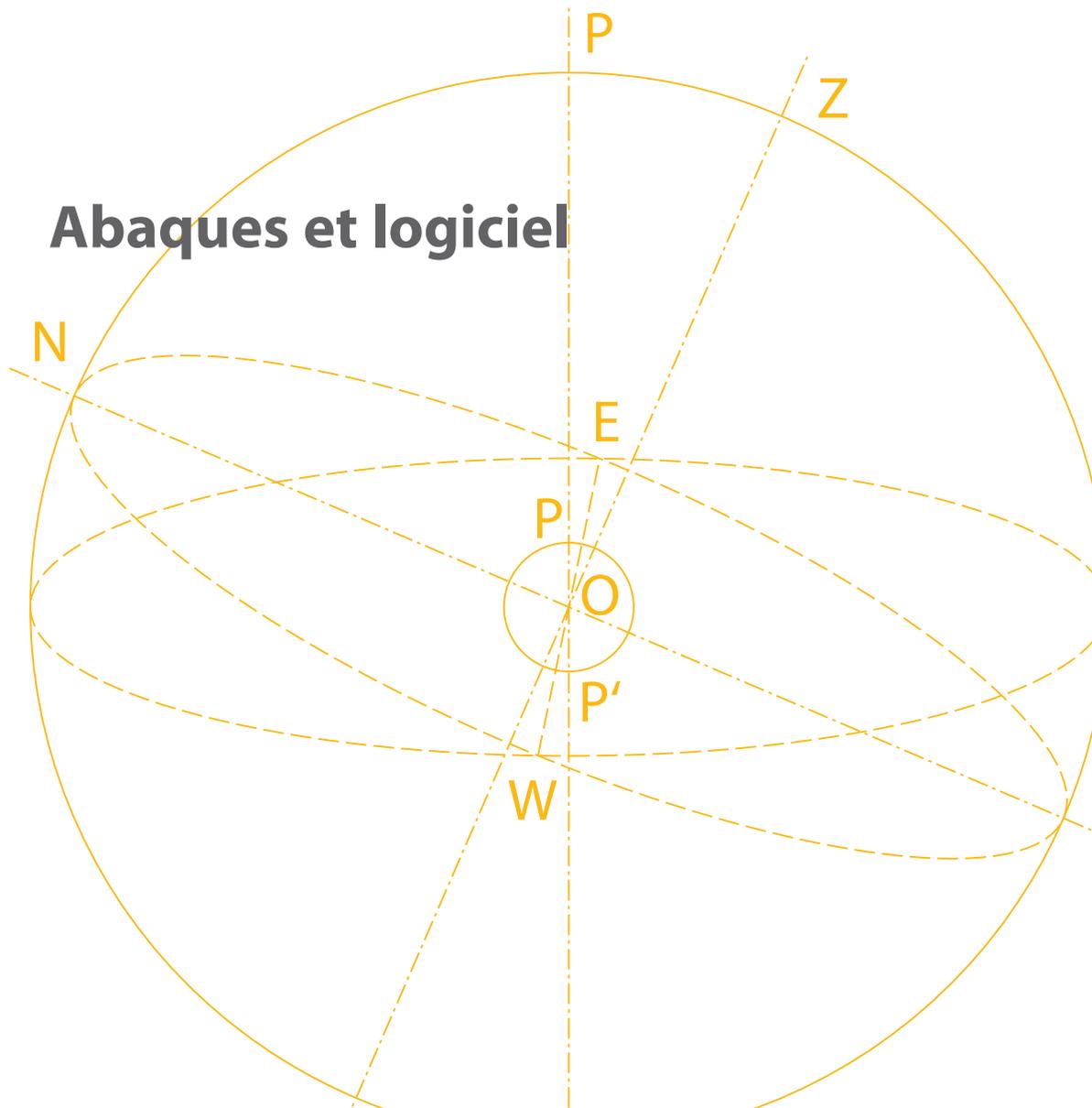
Dans ce cas, la température de la couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée ne remonte jamais au-dessus de la température seuil de 33 °C quelle que soit l'heure de pose.

Heure de pose	Durée du refroidissement (min)	Heure de pose	Durée du refroidissement (min)
0:00	174	12:00	232
1:00	174	13:00	226
2:00	174	14:00	213
3:00	173	15:00	199
4:00	172	16:00	188
5:00	171	17:00	181
6:00	170	18:00	178
7:00	170	19:00	176
8:00	173	20:00	174
9:00	186	21:00	174
10:00	207	22:00	174
11:00	226	23:00	174

**Tableau A.3.11** Durée du refroidissement en fonction de l'heure de pose pour une mise en œuvre le 15 janvier

# Partie B

## Abaques et logiciel





# Chapitre B.1

## Utilisation des abaques

### B.1.1 Limitations

Comme nous l'avons montré au A.3.6 *Etude de la variation des paramètres du modèle*, un nombre important de paramètres influence, parfois considérablement, le refroidissement de la couche d'enrobé nouvellement posée. Pour réaliser les abaques, il est nécessaire de considérer ces différents paramètres pour lesquels quelques valeurs significatives sont choisies en vue de limiter au maximum le nombre de situations à traiter:

- l'épaisseur de la couche d'enrobé nouvellement posée (2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8 cm);
- la vitesse du vent:
  - vent faible (1 m/s);
  - vent modéré (7 m/s);
  - vent fort (15 m/s);
- la nébulosité:
  - ciel serein (0 %);
  - ciel partiellement couvert (50 %);
  - ciel couvert (100 %);
- la température initiale de l'enrobé bitumineux (170, 160 et 150 °C);
- la température de remise en circulation (30, 40 et 50 °C);
- la date de pose, le 15<sup>ème</sup> jour du mois étant retenu comme représentatif du mois considéré (janvier, février, mars, avril, mai, juin et juillet).

La combinaison de ces paramètres amène au nombre de 567 abaques de 7 courbes (une par mois). Un moyen de diminuer ce nombre serait d'établir des corrélations entre les diverses situations. Ces corrélations amenant généralement à des relations du 4<sup>ème</sup> degré et étant fortement limitées, nous préférons joindre au présent document un logiciel donnant l'heure de remise en circulation en fonction de ces différents paramètres.

Néanmoins, la problématique du refroidissement de la couche d'enrobé nouvellement posée se pose la plupart du temps dans des conditions extrêmes de température, de vitesse du vent et de nébulosité. C'est pourquoi nous avons, en plus du logiciel, établi des abaques pour les conditions suivantes:

- épaisseurs: 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8 cm;
- vent faible et modéré;
- ciel serein;
- température initiale: 170 °C;
- température de remise en circulation: 30 °C.

Les caractéristiques géométriques et thermiques de la structure, prise en compte dans le logiciel et les abaques, sont données au tableau B.1.1:

Matériau	Épaisseur (mm)	$\lambda$ (W/m.°C)	$c$ (J/kg.°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
Couche d'enrobé	20 à 80	1,20	921	2 400
Enrobé existant	100	1,20	921	2 400
Massif	900	1,31	837	1 750

**Tableau B.1.1** Caractéristiques géométriques et thermiques de la structure

## B.1.2. Utilisation des abaques

Les abaques permettent de déterminer, à partir de l'heure de pose de la couche d'enrobé bitumineux, l'heure à laquelle la voirie peut être rendue au trafic.

Afin d'illustrer l'utilisation des abaques, prenons l'exemple de la pose d'une couche d'enrobé bitumineux de 2 cm d'épaisseur, à 11:00 au mois d'avril et par vent faible:

- *étape 1*: repérer 11:00 sur l'axe des abscisses et tracer une ligne verticale jusqu'à la courbe correspondant au mois d'avril (en orange, trait plein);
- *étape 2*: tracer une ligne horizontale à partir du point d'intersection entre la courbe et la ligne verticale. Lire l'heure de remise en circulation sur l'axe des ordonnées (environ 18:00).

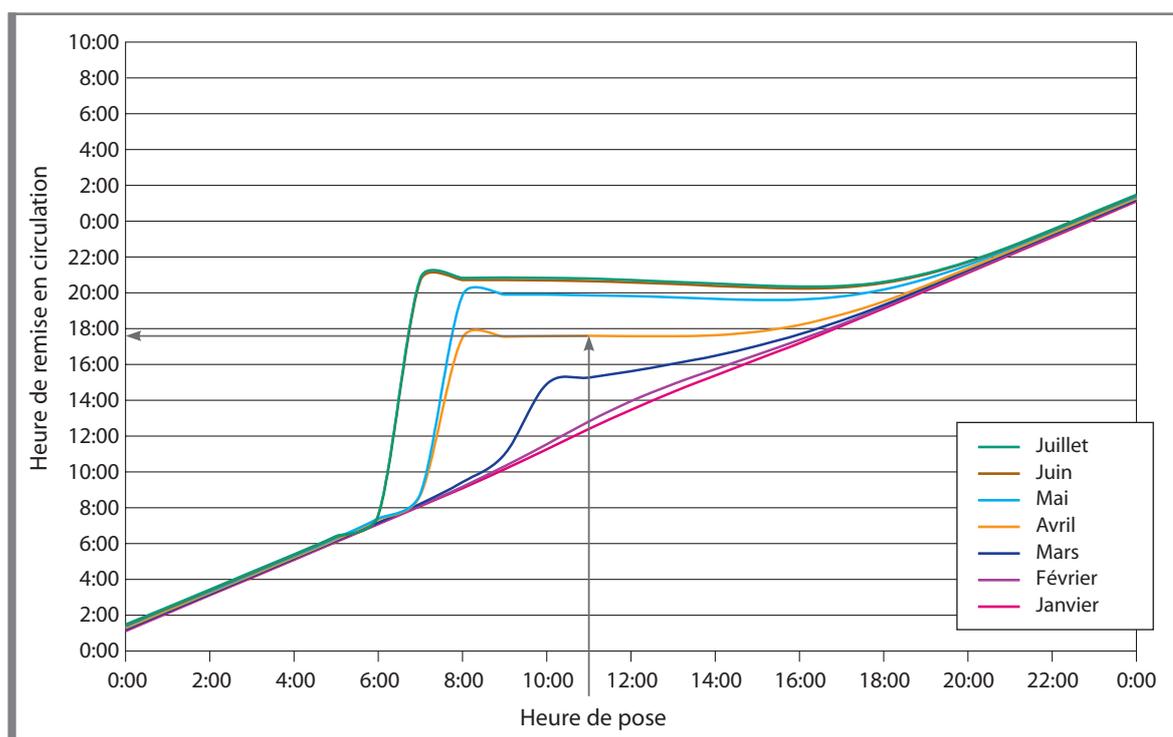


Figure B.1.1 Exemple d'utilisation des abaques

# Chapitre B.2

## Utilisation du logiciel

Le logiciel EvalTREB LE joint s'utilise comme suit:

1. entrer l'épaisseur de la couche d'enrobé nouvellement posée;
2. entrer la température initiale de l'enrobé;
3. entrer la température de remise en circulation;
4. entrer la vitesse du vent (choix entre vent faible, modéré et fort);
5. entrer la nébulosité (choix entre ciel serein, partiellement couvert et couvert);
6. entrer la date et l'heure de pose de la couche;
7. cliquer sur *Calcul*.

L'interface utilisateur du logiciel est reprise à la figure B.2.1.

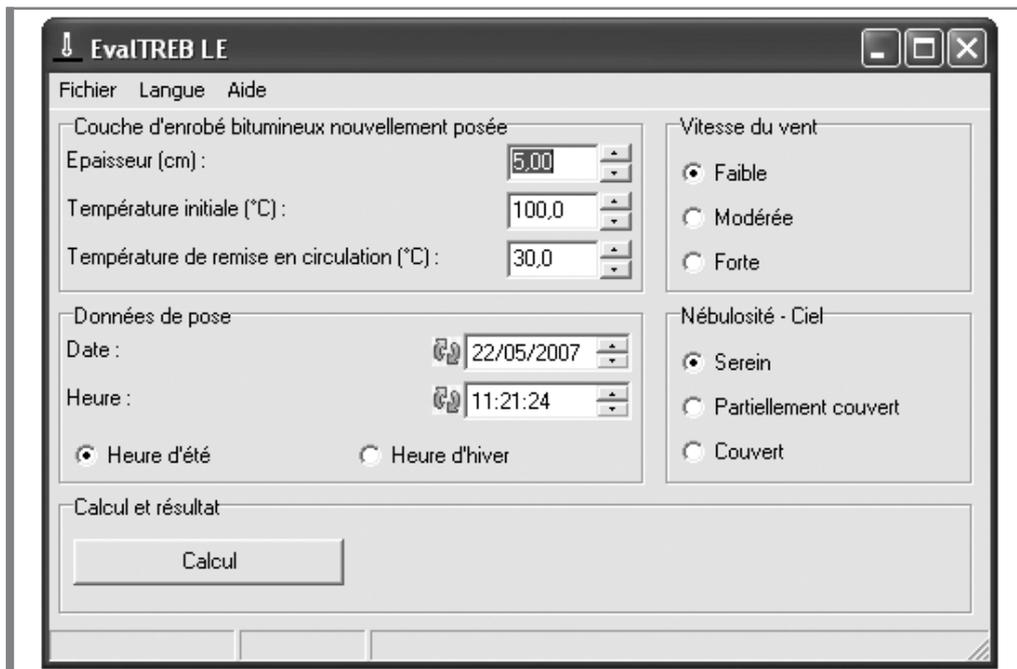


Figure B.2.1 Interface utilisateur du logiciel



# Chapitre B.3

## Abaques

Ci-après sont repris les quatorze abaques donnant, en fonction de l'épaisseur de la couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée, le temps d'attente minimum entre la fin de la mise en œuvre et la réouverture d'une voirie au trafic dans des conditions extrêmes de température, de nébulosité et de vitesse de vent. Les hypothèses suivantes ont été retenues pour le calcul prévisionnel de ces cas extrêmes:

- épaisseur: 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8 cm;
- vitesse du vent: 1 m/s (vent faible) et 7 m/s (vent modéré);
- nébulosité: 0 % (ciel serein);
- température initiale: 170 °C;
- température de remise en circulation: 30 °C.

Les caractéristiques géométriques et thermiques de la structure prise en compte dans les abaques sont données au tableau B.1.1.

Épaisseur = 2 cm

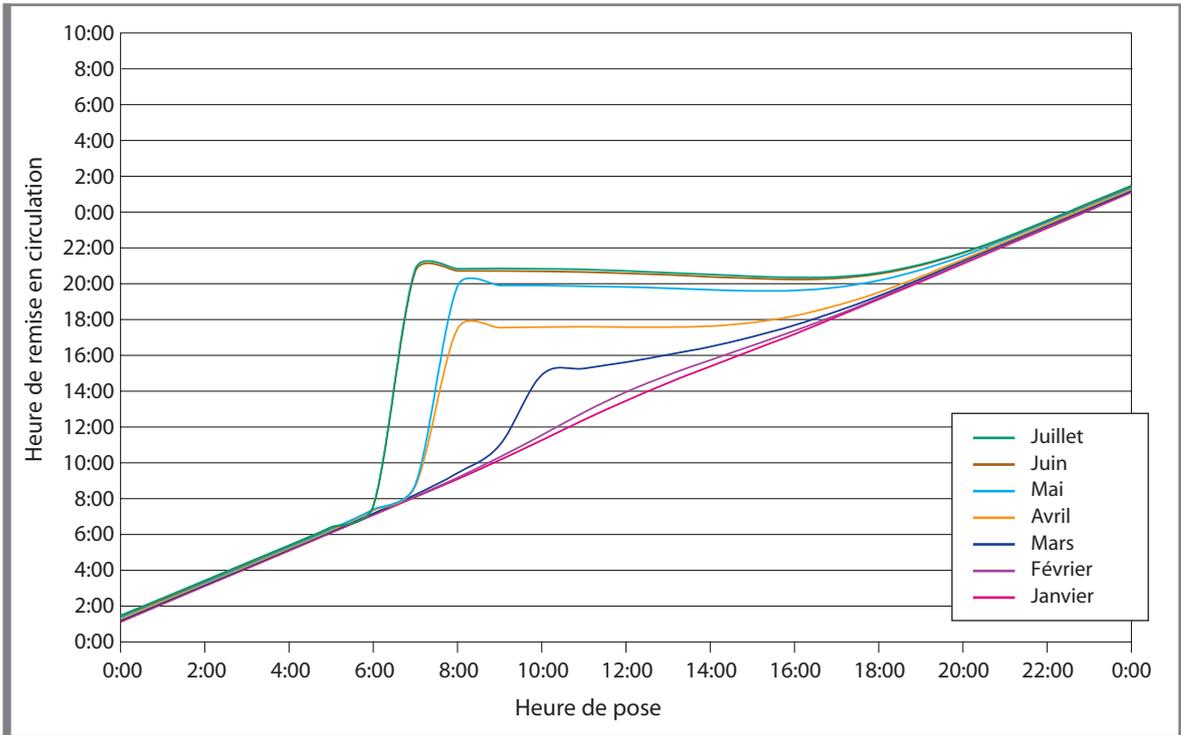


Figure B.3.1 Abaque 1: épaisseur 2 cm; vent faible (1 m/s); ciel serein (0 %)

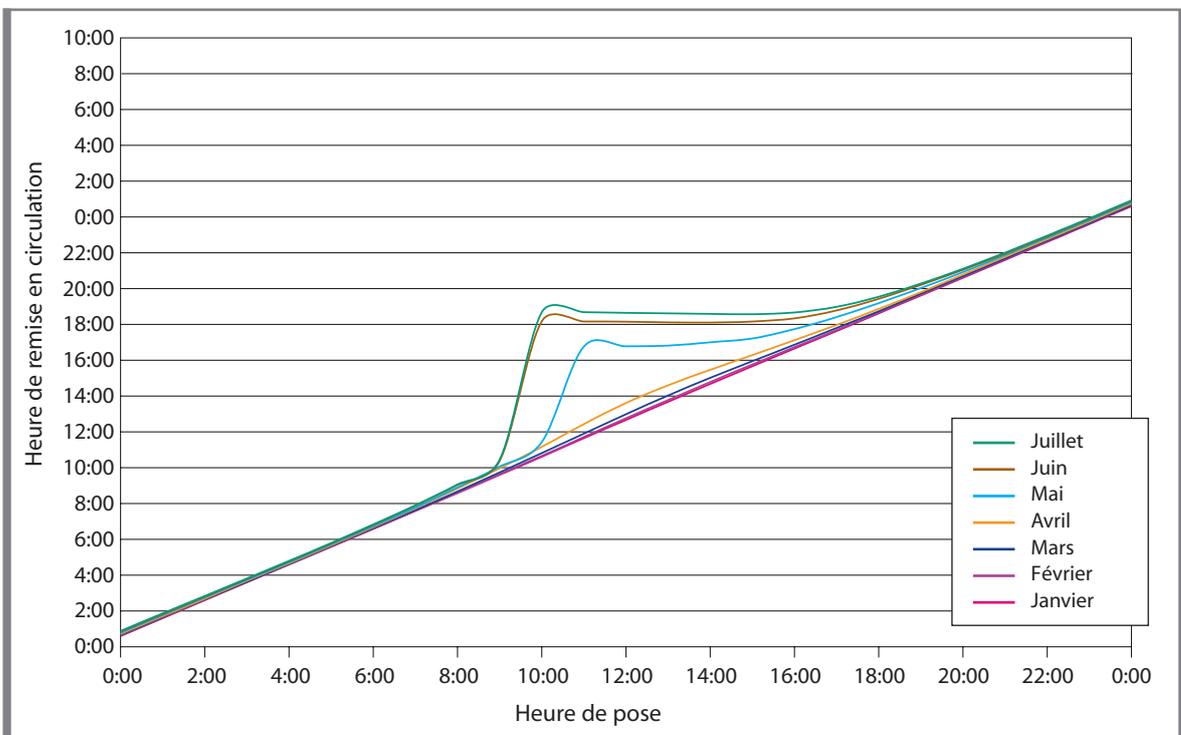
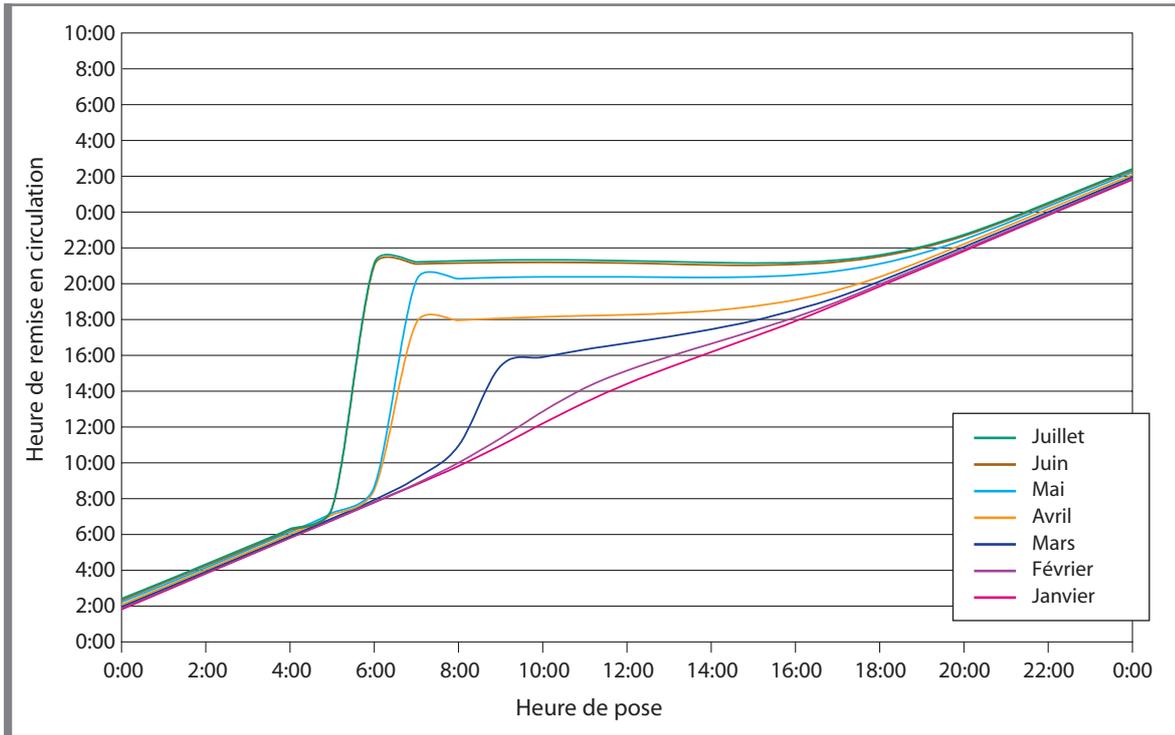
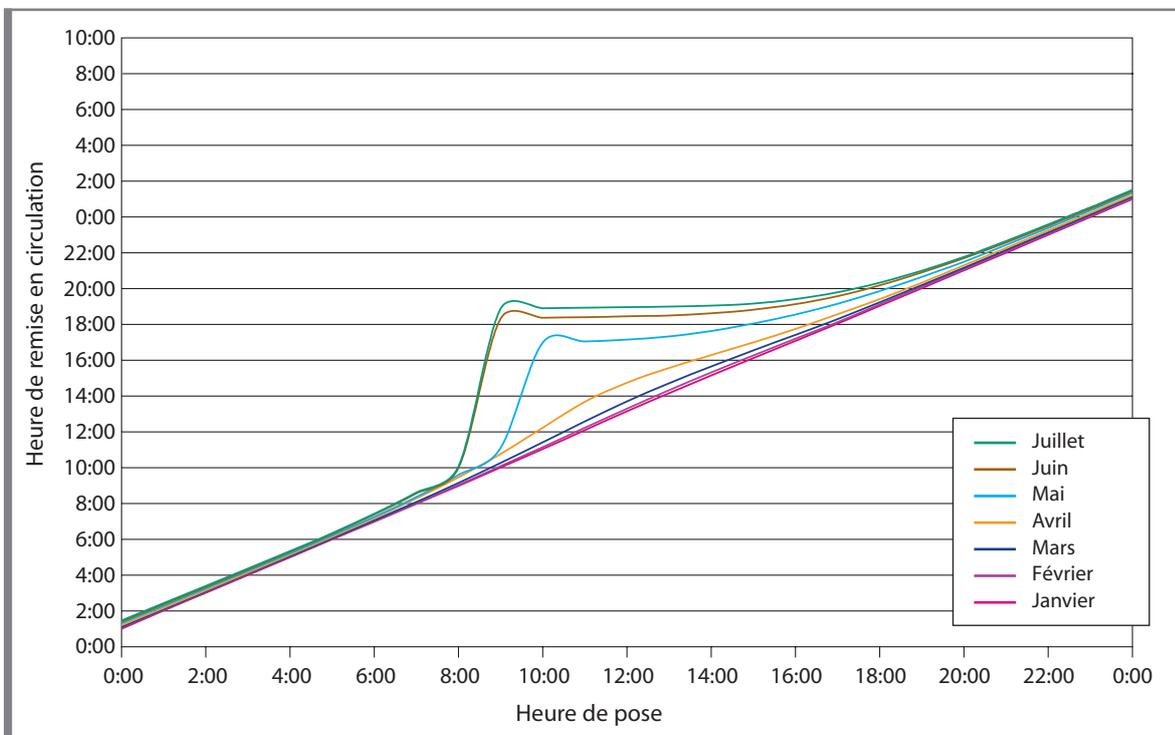


Figure B.3.2 Abaque 2: épaisseur 2 cm; vent modéré (7 m/s); ciel serein (0 %)

## Épaisseur = 3 cm



**Figure B.3.3** Abaque 3:  
épaisseur 3 cm; vent faible (1 m/s); ciel serein (0 %)



**Figure B.3.4** Abaque 4:  
épaisseur 3 cm; vent modéré (7 m/s); ciel serein (0 %)

Épaisseur = 4 cm

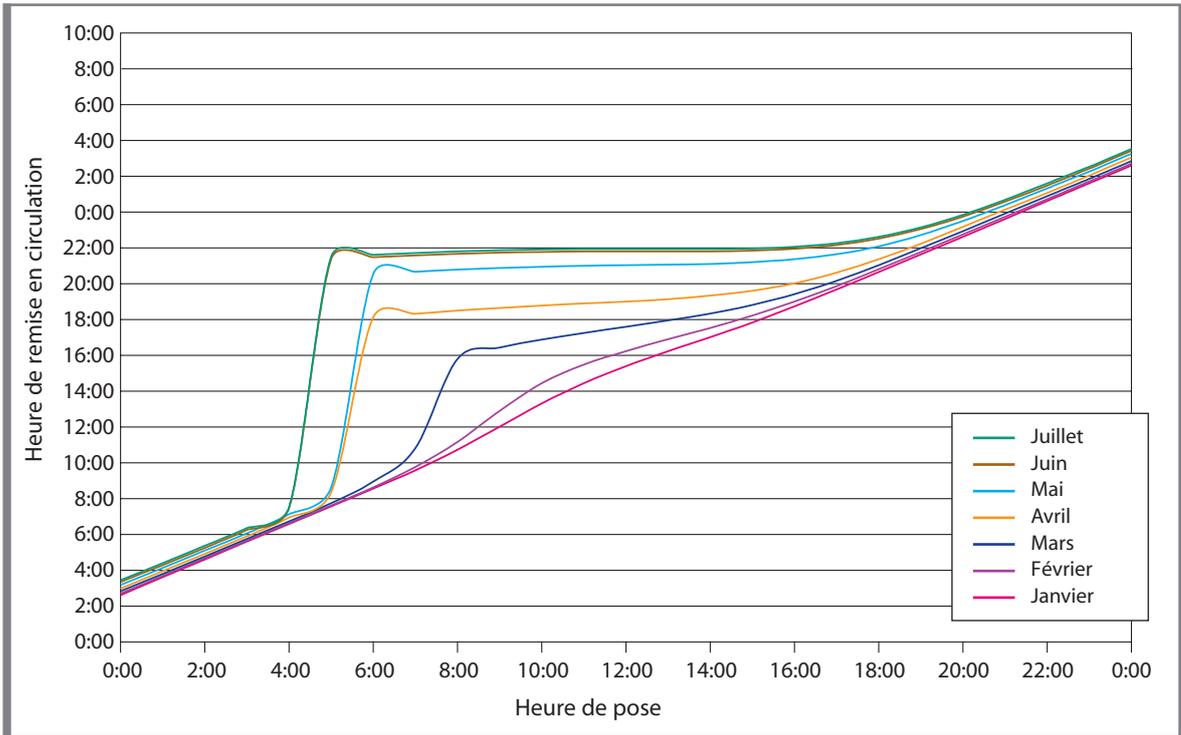


Figure B.3.5 Abaque 5: épaisseur 4 cm; vent faible (1 m/s); ciel serein (0 %)

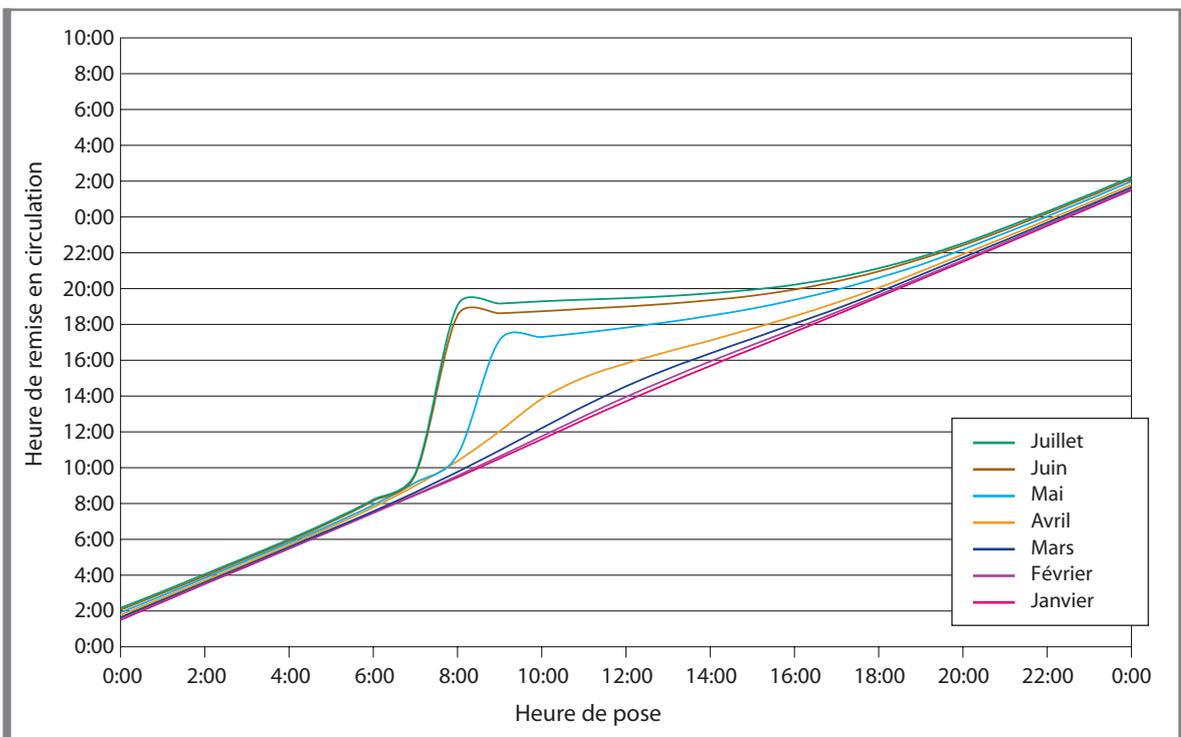
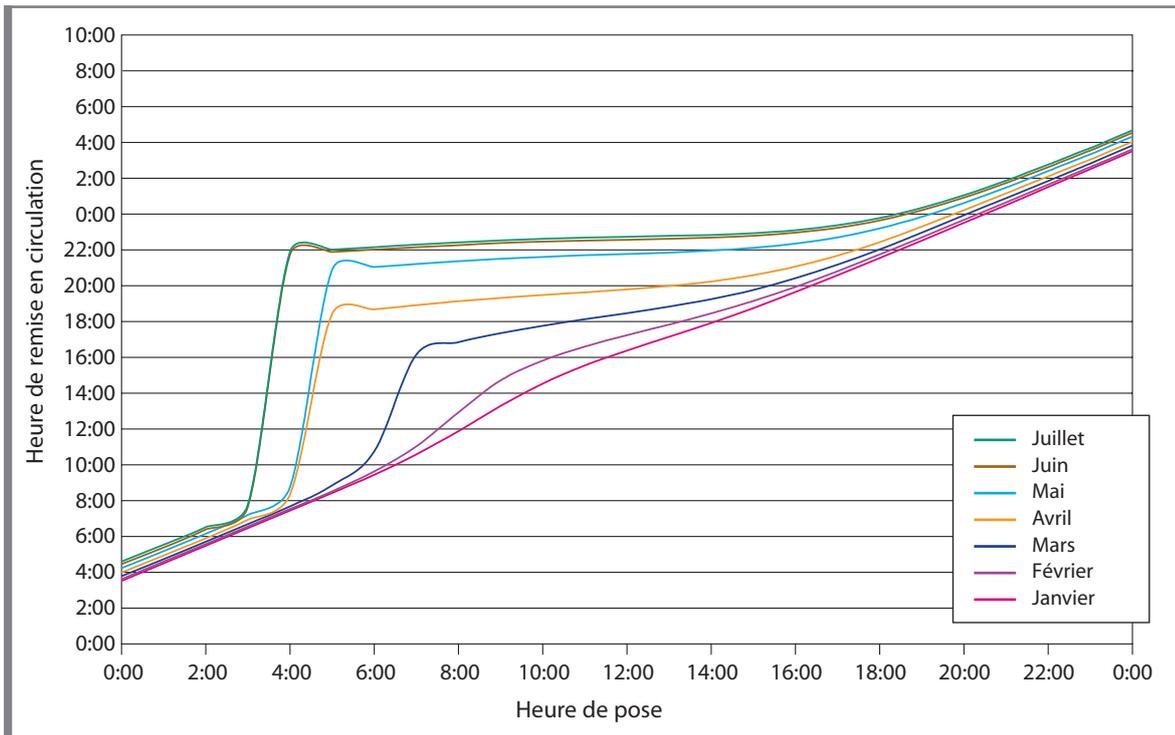
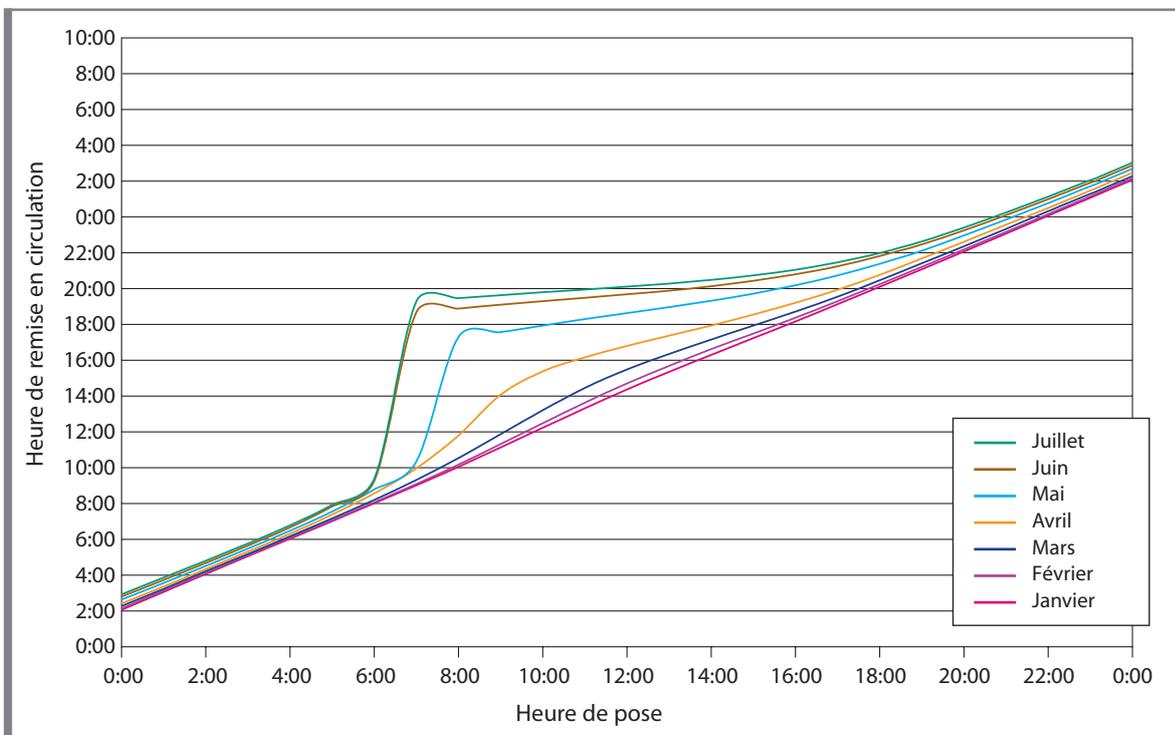


Figure B.3.6 Abaque 6: épaisseur 4 cm; vent modéré (7 m/s); ciel serein (0 %)

## Épaisseur = 5 cm



**Figure B.3.7** Abaque 7:  
épaisseur 5 cm; vent faible (1 m/s); ciel serein (0 %)



**Figure B.3.8** Abaque 8:  
épaisseur 5 cm; vent modéré (7 m/s); ciel serein (0 %)

Épaisseur = 6 cm

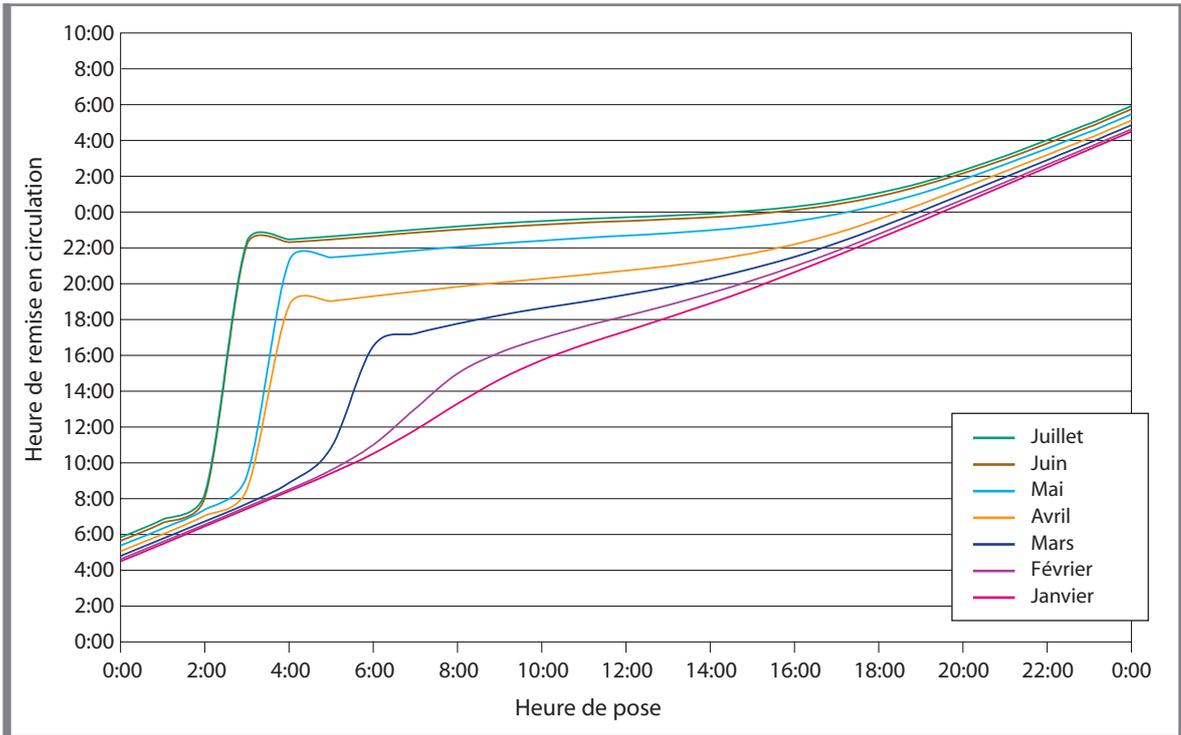


Figure B.3.9 Abaque 9: épaisseur 6 cm; vent faible (1 m/s); ciel serein (0 %)

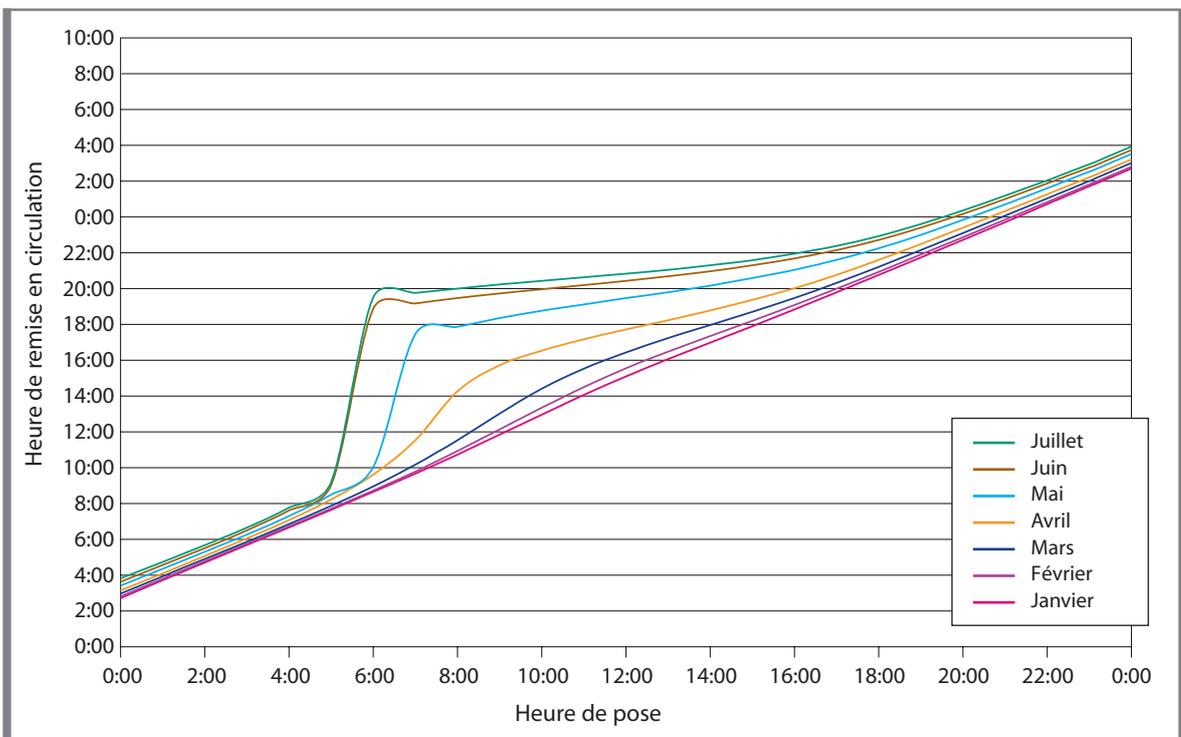
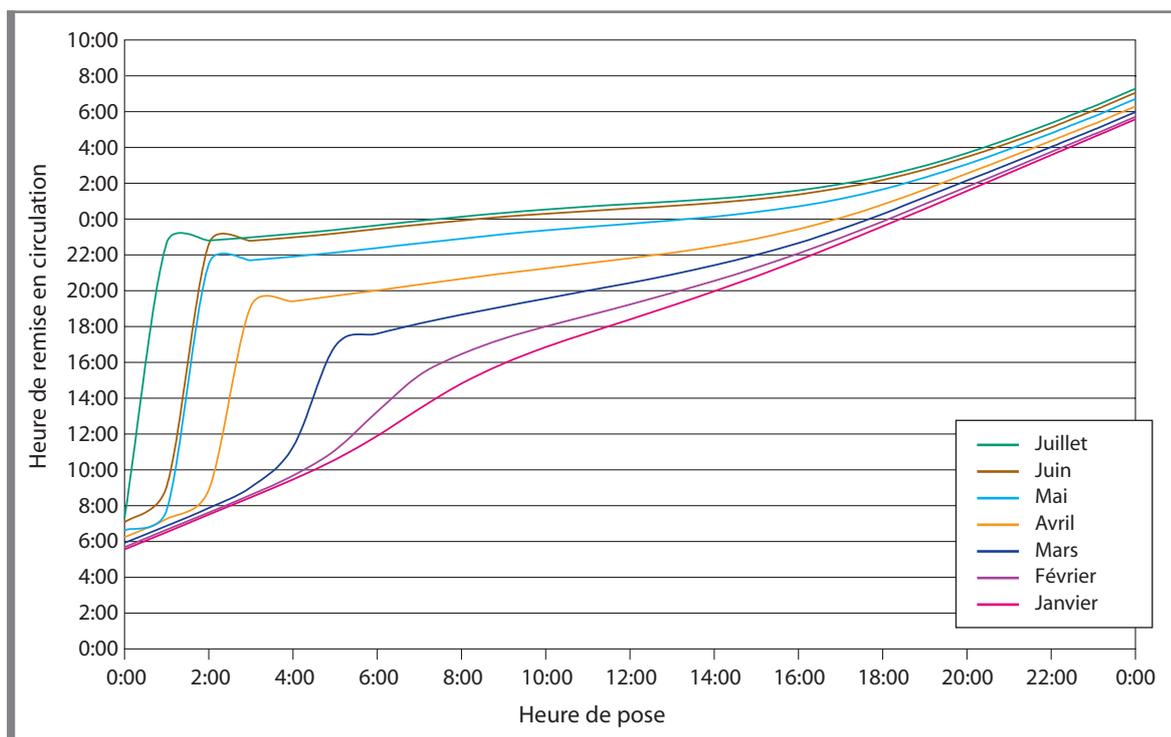
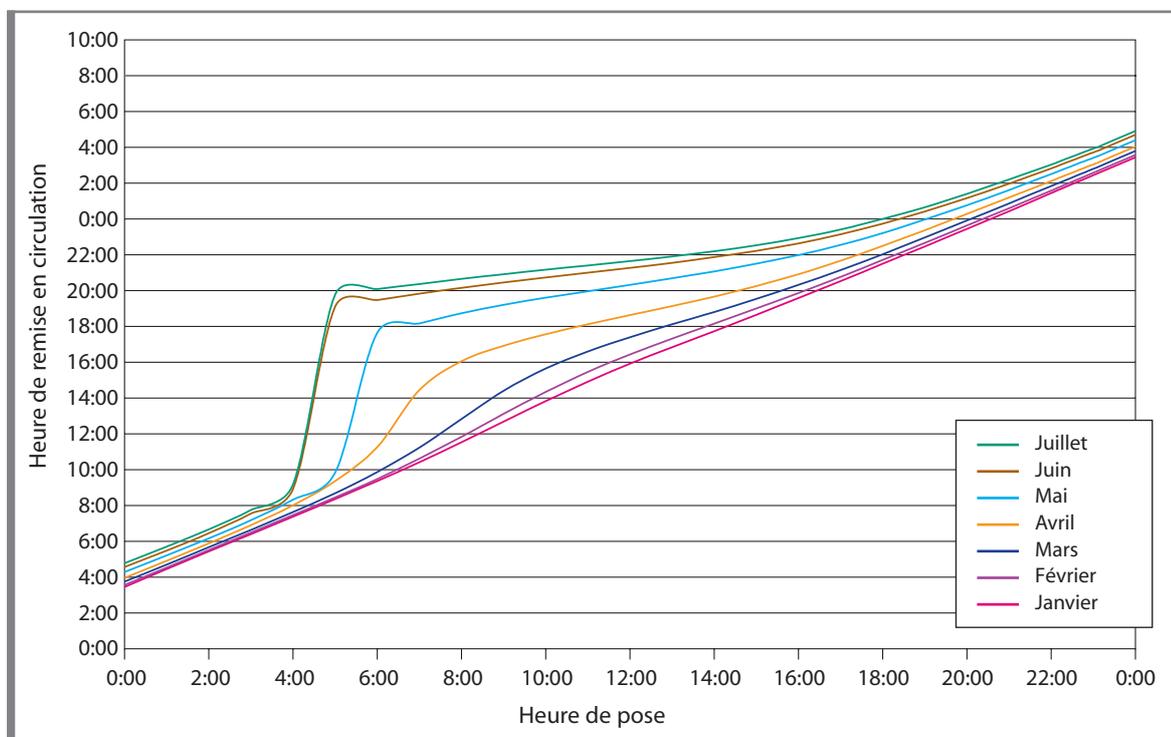


Figure B.3.10 Abaque 10: épaisseur 6 cm; vent modéré (7 m/s); ciel serein (0 %)

## Épaisseur = 7 cm



**Figure B.3.11** Abaque 11:  
épaisseur 7 cm; vent faible (1 m/s); ciel serein (0 %)



**Figure B.3.12** Abaque 12:  
épaisseur 7 cm; vent modéré (7 m/s); ciel serein (0 %)

Épaisseur = 8 cm

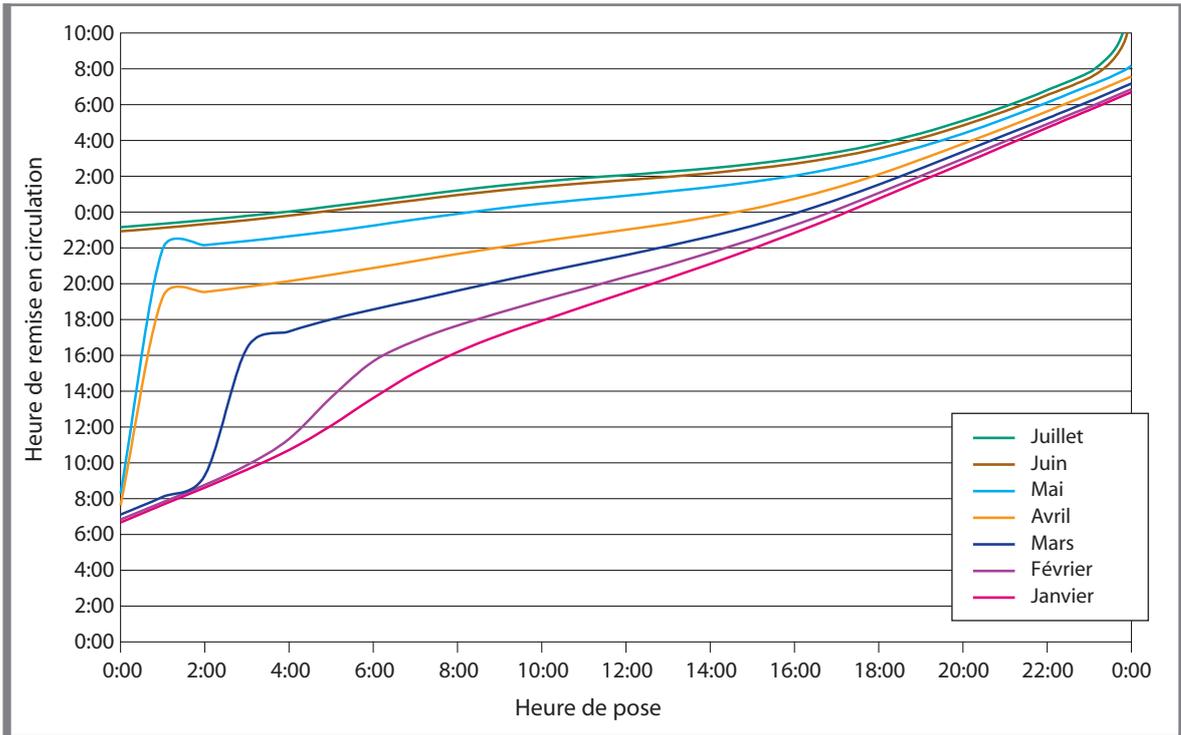


Figure B.3.13 Abaque 13: épaisseur 8 cm; vent faible (1 m/s); ciel serein (0 %)

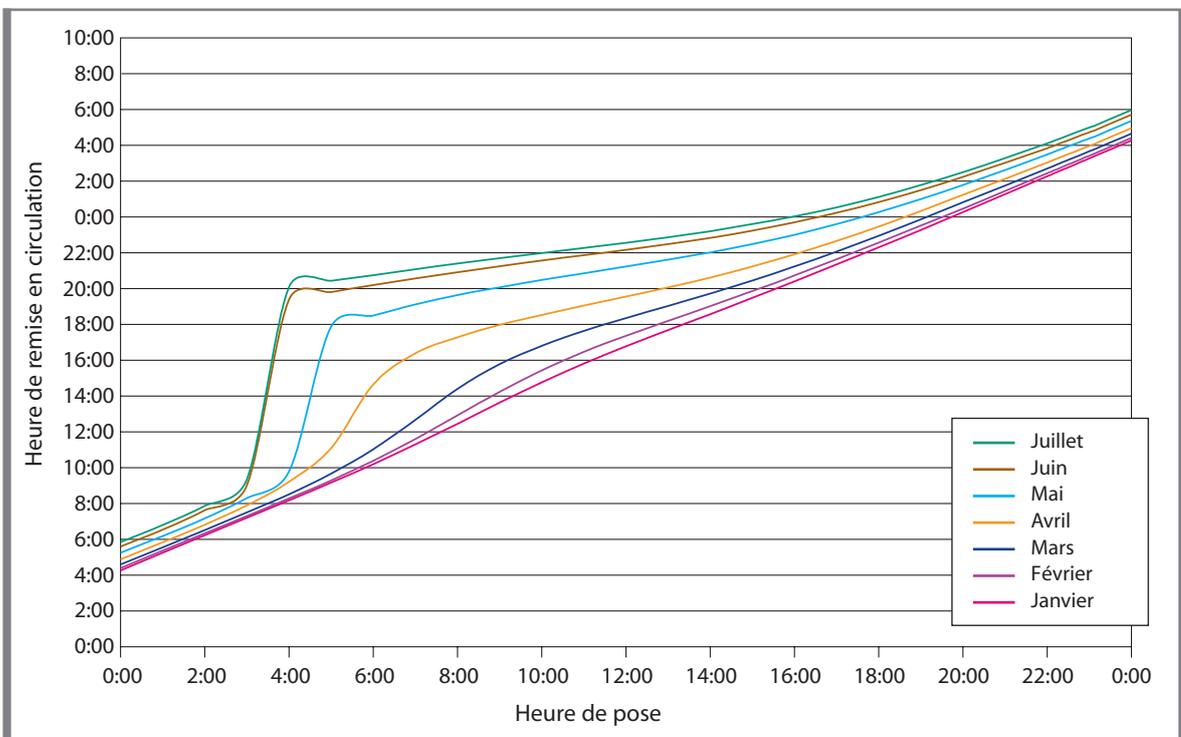


Figure B.3.14 Abaque 14: épaisseur 8 cm; vent modéré (7 m/s); ciel serein (0 %)

## Conclusion et perspectives

Les différentes étapes de la modélisation de la descente en température d'une couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée et la validation sur chantier ont montré, entre autres, que:

- la vitesse du vent influence significativement la majeure partie du refroidissement de l'enrobé. Cette influence s'estompe pour des températures proches de 40 °C;
- le rayonnement a une influence considérable sur le refroidissement aux températures plus basses (en dessous de 80 °C);
- la température maximale de la couche n'est pas située au centre de celle-ci mais évolue entre la surface et la base, principalement en fonction de la variation des différentes formes de rayonnement;
- l'épaisseur de la couche d'enrobé nouvellement posée influence fortement son refroidissement; par contre, les caractéristiques géométriques et thermiques des couches sous-jacentes ont une moindre importance.

Sur base des 8 chantiers de validation, il apparaît que le modèle de calcul simule très bien le refroidissement de l'enrobé bitumineux pour autant que les caractéristiques géométriques et thermiques utilisées pour la simulation soient correctes. Il faut donc être attentif aux valeurs que l'on trouve dans la bibliographie (variant dans certains cas du simple au triple) ainsi qu'aux épaisseurs renseignées sur chantier.

La réalisation des abaques n'est pas chose aisée vu le nombre élevé de paramètres entrant en ligne de compte dans le refroidissement d'une couche d'enrobé, la nécessité de ne retenir que quelques valeurs pour ces paramètres et la difficulté d'établir des relations corrélées entre les situations observées. Il paraît donc judicieux de ne retenir que les cas extrêmes pour la présentation sous forme d'abaques. Un logiciel semble être un bon compromis entre l'utilisation pratique du compte rendu et la précision des résultats obtenus.

Enfin, l'étude des abaques montre que, dans des conditions extrêmes (ciel serein, vent faible et mise en œuvre en été), la pose de l'enrobé de nuit n'est efficace du point de vue réouverture de la voirie au trafic que jusqu'à une heure variant entre 0:00 pour une couche d'épaisseur de 8 cm et 6:00 pour une épaisseur de 2 cm. Passé cette limite, le bénéfice du travail de nuit sur la rapidité de remise en circulation de la voirie est anéanti principalement par l'action du rayonnement solaire.

En ce qui concerne les perspectives, ce modèle de calcul est susceptible de permettre la simulation d'autres phénomènes thermiques observés dans les structures routières, et notamment l'étude des cycles gel-dégel, ou encore, d'être utilisé pour la détermination des caractéristiques thermiques des matériaux constitutifs des structures routières.



## Liste des figures

A.1.1	Modélisation de la structure	5
A.1.2	Evolution de la densité de flux de chaleur dans un solide	6
A.1.3	Evolution de la température aux abords de la paroi d'un solide	7
A.1.4	Distribution initiale de températures	8
A.1.5	Evolution de la température dans une couche d'enrobé bitumineux de 5 cm d'épaisseur en fonction du temps	10
A.1.6	Essai de ramollissement Anneau & Bille	13
A.1.7	Configuration des emplacements de mesure	15
A.1.8	Chantier n° 3 - Refroidissement de la couche de SMA-B6 nouvellement posée	17
A.1.9	Chantier n° 3 - Comparaison entre les courbes mesurées et la courbe calculée	17
A.1.10	Chantier n° 4 - Refroidissement de la couche de SMA-B1 nouvellement posée	18
A.1.11	Chantier n° 4 - Comparaison entre les courbes mesurées et la courbe calculée	19
A.2.1	Révolution de la terre autour du soleil	23
A.2.2	Sphère céleste	23
A.2.3	Coordonnées équatoriales	24
A.2.4	Coordonnées locales du soleil	25
A.2.5	Distances intervenant dans la détermination de la masse d'air optique	26
A.2.6	Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre	27
A.3.1	Principaux échanges thermiques entre la surface du revêtement et l'environnement	33
A.3.2	Modélisation de la structure	33
A.3.3	Interface air – enrobé bitumineux	36
A.3.4	Interface entre deux couches de la structure	37
A.3.5	Chantier n° 4 - Comparaison entre les courbes mesurées et la courbe calculée avec le modèle final	40
A.3.6	Chantier n° 5 - Emplacement 1 - Comparaison entre les courbes mesurées et la courbe calculée	40
A.3.7	Chantier n° 6 - Emplacement 3 - Comparaison entre les courbes mesurées et la courbe calculée	41
A.3.8	Chantier n° 6 - Emplacement 2 - Comparaison entre les courbes mesurées et la courbe calculée	42
A.3.9	Chantier n° 7 - Emplacement 3 - Comparaison entre les courbes mesurées et la courbe calculée	42
A.3.10	Chantier n° 8 - Comparaison entre les courbes mesurées et la courbe calculée	43
A.3.11	Refroidissement de l'enrobé nouvellement posé: températures maximale et en surface	44
A.3.12	Evolution de la température au sein de la structure	45
A.3.13	Influence de la vitesse du vent sur le refroidissement de la couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée	46
A.3.14	Influence de la température de l'air sur le refroidissement de la couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée (les différents types de rayonnements ne sont pas pris en compte)	46
A.3.15	Influence de la température de l'air sur le refroidissement de la couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée (seul le rayonnement terrestre est pris en compte)	47
A.3.16	Influence de la date d'exécution sur le refroidissement de la couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée	48
A.3.17	Influence de la nébulosité sur le refroidissement de la couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée	49
A.3.18	Augmentation de la température de la couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée	50

B.1.1	Exemple d'utilisation des abaqués	54
B.2.1	Interface utilisateur du logiciel	55
B.3.1	Abaque 1: épaisseur 2 cm; vent faible (1 m/s); ciel serein (0 %)	58
B.3.2	Abaque 2: épaisseur 2 cm; vent modéré (7 m/s); ciel serein (0 %)	58
B.3.3	Abaque 3: épaisseur 3 cm; vent faible (1 m/s); ciel serein (0 %)	59
B.3.4	Abaque 4: épaisseur 3 cm; vent modéré (7 m/s); ciel serein (0 %)	59
B.3.5	Abaque 5: épaisseur 4 cm; vent faible (1 m/s); ciel serein (0 %)	60
B.3.6	Abaque 6: épaisseur 4 cm; vent modéré (7 m/s); ciel serein (0 %)	60
B.3.7	Abaque 7: épaisseur 5 cm; vent faible (1 m/s); ciel serein (0 %)	61
B.3.8	Abaque 8: épaisseur 5 cm; vent modéré (7 m/s); ciel serein (0 %)	61
B.3.9	Abaque 9: épaisseur 6 cm; vent faible (1 m/s); ciel serein (0 %)	62
B.3.10	Abaque 10: épaisseur 6 cm; vent modéré (7 m/s); ciel serein (0 %)	62
B.3.11	Abaque 11: épaisseur 7 cm; vent faible (1 m/s); ciel serein (0 %)	63
B.3.12	Abaque 12: épaisseur 7 cm; vent modéré (7 m/s); ciel serein (0 %)	63
B.3.13	Abaque 13: épaisseur 8 cm; vent faible (1 m/s); ciel serein (0 %)	64
B.3.14	Abaque 14: épaisseur 8 cm; vent modéré (7 m/s); ciel serein (0 %)	64

## Liste des tableaux

A.1.1	Paramètres thermiques de matériaux de chaussée	13
A.1.2	Température de remise en circulation pour quelques bitumes couramment utilisés	14
A.1.3	Caractéristiques des différents chantiers de validation	16
A.1.4	Descriptif des mesures	16
A.3.1	Valeurs des paramètres par ciel serein	35
A.3.2	Valeurs des paramètres par ciel couvert	35
A.3.3	Valeurs des paramètres pour les autres situations	35
A.3.4	Caractéristiques des différents chantiers de validation	38
A.3.5	Descriptif des mesures	39
A.3.6	Structure des différents chantiers de validation	39
A.3.7	Caractéristiques thermiques des matériaux	39
A.3.8	Caractéristiques thermiques des matériaux	44
A.3.9	Durée du refroidissement en fonction de la date de pose	48
A.3.10	Durée du refroidissement en fonction de l'heure de pose pour une mise en œuvre le 15 juillet	49
A.3.11	Durée du refroidissement en fonction de l'heure de pose pour une mise en œuvre le 15 janvier	50
B.1.1	Caractéristiques géométriques et thermiques de la structure	53

## Liste des photos

A.1.1	Sonde de température Cuivre-Constantan	15
A.1.2	Thermomètre infrarouge	15
A.1.3	Mesure de la température au centre de la bande d'enrobé bitumineux	15
A.1.4	Configuration des points de mesure par emplacement	15
A.3.1	Thermo-anémomètre	38

## Liste des symboles et abréviations

### Note

s.d. est renseigné lorsque la grandeur est sans dimension

Classement par ordre alphabétique

$a$	Diffusivité thermique	$m^2/s$
$a_i$	Diffusivité thermique de la couche $i$	$m^2/s$
$BB$	Béton bitumineux	s.d.
$c$	Chaleur spécifique	$J/kg.°C$
$C$	Equation du centre (de la terre)	$°$
$C_{lieu}$	Correction temporelle (la différence entre le temps légal et le temps universel)	$h$
$C_{te}$	Température constante à 1 mètre de profondeur dans le massif	$°C$
$D_b$	Rayonnement diffus reçu au sol sur une surface horizontale par ciel couvert	$W/m^2$
$D_c$	Rayonnement diffus reçu au sol sur une surface horizontale par ciel serein	$W/m^2$
$D_\sigma$	Rayonnement diffus reçu au sol sur une surface horizontale par ciel partiellement couvert	$W/m^2$
$ED$	Enrobé drainant	s.d.
$ET$	Equation du temps	$min$
$f_i$	Intensité lumineuse par unité de surface	s.d.
$F_m$	Fluage de l'enrobé	$N$
$f(x)$	Fonction donnant la distribution de température initiale dans la chaussée	$°C$
$G_b$	Rayonnement global reçu au sol sur une surface horizontale par ciel couvert	$W/m^2$
$G_c$	Rayonnement global reçu au sol sur une surface horizontale par ciel serein	$W/m^2$
$G_\sigma$	Rayonnement global reçu au sol sur une surface horizontale par ciel partiellement couvert	$W/m^2$
$h$	Coefficient de convection	$W/(m^2.°C)$
$H$	Longueur du trajet dans l'atmosphère d'un rayon solaire d'angle zénithal nul	$m$
$I_0$	Constante solaire	$W/m^2$
$I_{0j}$	Flux de rayonnement solaire à la limite supérieure de l'atmosphère	$W/m^2$
$I_b$	Rayonnement direct reçu au sol sur une surface horizontale par ciel couvert	$W/m^2$
$I_c$	Rayonnement direct reçu au sol sur une surface horizontale par ciel serein	$W/m^2$
$I_\sigma$	Rayonnement direct reçu au sol sur une surface horizontale par ciel partiellement couvert	$W/m^2$
$j$	Numéro du jour considéré à dater du 1 janvier de l'année	s.d.
$k$	Numéro du mois de l'année	s.d.
$K_d$	Facteur correcteur du flux de rayonnement solaire	s.d.
$l_{lieu}$	Longitude du lieu considéré	$°$
$L$	Longitude vraie du soleil	$°$
$L_c(\gamma_i, \alpha_i)$	Luminance du point de ciel de hauteur $\gamma_i$ et d'azimut $\alpha_i$	$W/m^2$
$L_c(\gamma_i = \pi/2)$	Luminance du zénith	$W/m^2$
$L \uparrow$	Rayonnement IR terrestre	$W/m^2$
$L \downarrow$	Rayonnement IR atmosphérique	$W/m^2$
$L_r$	Bilan des rayonnements IR	$W/m^2$
$m$	Masse d'air optique	s.d.
$M$	Anomalie moyenne	$°$
$N$	Pourcentage de ciel couvert	$\%$
$O$	Centre de la terre	s.d.
$PP'$	Axe des pôles de la terre	s.d.
$\dot{q}_h$	Densité de flux de chaleur échangé par convection	$W/m^2$
$\dot{q}_\lambda$	Densité de flux de chaleur échangé par conduction	$W/m^2$

$r$	Flux rayonné – bilan de l'ensemble des phénomènes radiatifs	W/m <sup>2</sup>
$R$	Réduction de l'équateur qui correspond à l'inclinaison de l'axe terrestre	°
$RBIT_{racl}$	Revêtement bitumineux dont une partie a été raclée	s.d.
$SMA$	Stone Mastic Asphalt	s.d.
$t$	temps universel $TU$	h
$T$	Champ de température	°C
$T_{A\&B}$	Température de ramollissement Anneau et Bille	°C
$T_{air}$	Température de l'air	°C
$T_{circulation}$	Température de remise en circulation	°C
$T_i$	Température de la couche «i»	°C
$T_I$	Trouble atmosphérique moyen par ciel serein	s.d.
$T_L$	Facteur total de trouble de Linke	n.b.
$T_{Lm}$	Trouble atmosphérique minimal par ciel serein	s.d.
$TL$	Temps légal	h
$T(M)$	Température d'un point quelconque $M$ de la paroi où se déroule l'échange convectif	°C
$T_{massif}$	Température du massif	°C
$T_{pose}$	Température de pose	°C
$T_s$	Température de la surface	°C
$TS$	Temps solaire	h
$UT$	Temps universel	h
$x$	Profondeur à partir de la surface supérieure de la nouvelle surface de roulement ( $x = 0$ )	m
$X$	Longueur du trajet dans l'atmosphère d'un rayon solaire d'angle zénithal $\zeta$	m
$z$	Altitude du site	s.d.
$Z$	Zénith	s.d.
$Z'$	Nadir	s.d.

#### Classement selon l'alphabet grec

$\alpha_s$	Angle azimutal solaire	°
$\beta_A$	Coefficient d'Angström	s.d.
$\gamma$	Angle d'élévation solaire	°
$\delta$	Déclinaison du soleil	°
$\delta_R$	Épaisseur optique de Rayleigh par unité de masse	s.d.
$\varepsilon$	Distance angulaire entre la direction d'un point du ciel considéré et la direction du soleil	°
$\varepsilon_0$	Emissivité de l'air par ciel serein	s.d.
$\varepsilon_a$	Emissivité de l'air par ciel couvert	s.d.
$\varepsilon_s$	Emissivité de la surface de l'enrobé bitumineux	s.d.
$\zeta$	Angle zénithal solaire	°
$v_{vent}$	Vitesse du vent	m/s
$\lambda$	Conductivité thermique du milieu	W/(m.°C)
$\rho$	Masse volumique	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	Constante de Stephan-Boltzmann	W/(m <sup>2</sup> .°C <sup>4</sup> )
$\bar{\sigma}_d$	Fraction d'insolation moyenne journalière	s.d.
$\bar{\sigma}_h$	Fraction d'insolation moyenne horaire	s.d.
$\varphi$	Source interne de chaleur au sein du matériau	W/m <sup>3</sup>
$\phi$	Latitude du lieu considéré	°
$\phi_{ray}$	Flux de rayonnement solaire tenant compte de l'albédo	W/m <sup>2</sup>
$\omega$	Angle horaire du soleil	°

## Références bibliographiques

1. **Observatoire National de la Route**  
*Dictionnaire de l'entretien routier - Thème 4: Viabilité hivernale*  
Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, Metz, France, 1998
2. **C. De Backer**  
*Les températures dans les structures routières – Mesures expérimentales – Méthode prévisionnelle*  
Rapport de recherche 180, Centre de recherches routières (CRR), Bruxelles, 1979
3. **J. P. Pfeiffer**  
*The Properties of Asphaltic Bitumen*  
Elsevier, New York, USA, 1950
4. **A. L. Straub, H. N. Schenck, F. E. Przybicien**  
*Bituminous Pavement Temperature related to Climate*  
HRB Record 256, p. 53-77, Highway Research Board (HRB), Washington DC, USA, 1968
5. **De Geest**  
*Thermische isolatie van brugdekken ter voorkoming van ijzel*  
Revue C Tijdschrift, Volume V n° 5, 1970
6. **J. Mauricio Ruiz**  
*Concrete Temperature Modeling and Strength Prediction using Maturity Concepts in the FHWA Hiperpav Software*  
7th International Conference on Concrete Pavements, Orlando, Florida, USA, 2001
7. **C. De Backer**  
*Aires de stationnement pour véhicules sur toitures de bâtiments. Etude d'informations – Synthèse des expériences et connaissances actuelles*  
CR 26/85, Centre de recherches routières (CRR), Bruxelles, 1985
8. **J. Taine, J.-P. Petit**  
*Transferts thermiques – Introduction aux sciences des transferts*  
[cours, données de base et exercices corrigés]  
3e édition, Dunod, Paris, France, 2003
9. **C. Saint-Blanquet, B. Fourcher**  
*Conduction de la chaleur*  
Syllabus de cours, Université de Nantes, France, 2003
10. **M. Frémond, L. Labbé, P. Lerat, R. Lassoued**  
*Modélisation de la température de surface d'une chaussée à courte échéance par transfert de données météorologiques*  
XIème Congrès International de la Viabilité hivernale, AIPCR 2002, Sapporo, Japon, 21-28 janvier 2002, 8 p.
11. *L'asphalte coulé – Définitions et caractéristiques*  
Association européenne de l'Asphalte (AEA), <http://aea.egv.emaa.online.fr/indexfr.html>, 2006

12. **Office des asphaltes**  
*Cahier des charges des asphaltes*  
Office des asphaltes, Antony, France, 1978
13. **M. Radoli, R. Green**  
*Thermal Stresses in Concrete Bridge Superstructures under Summer Conditions*  
Transportation Research Record 547, p. 23-36, Transportation Research Board (TRB), Washington DC, USA, 1975
14. **A. Neville**  
*Propriétés du béton*  
Eyrolles, Paris, France, 2001
15. **R. Cadiergues**  
*Isolation et protection des bâtiments*  
Eyrolles, Paris, France, 1965
16. **A. Philippe**  
*Méthodes provisoires d'évaluation des profondeurs atteintes par le gel dans les sols et chaussées*  
Bulletin de liaison des laboratoires routiers ponts et chaussées, n° 28, p. 1\_15-1\_30, Laboratoire central des Ponts et Chaussées, Paris, France, 1967
17. **Schwaderer**  
*Der Strassenbau in physikalisch-messtechnischer Betrachtung*  
Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 84, Bundesministerium für Verkehr, Bonn, Allemagne, 1969
18. **F. N. Finn**  
*Factors involved in the Design of Asphaltic Pavements*  
HRB Record 39, blz. 1-112, Highway Research Board (HRB), Washington DC, USA, 1967
19. **J. Côté, J.-M. Konrad**  
*Périodes à risques de givrage différentiel sur le territoire québécois: rapport CREIG-S2*  
Université de Laval, Faculté des Sciences et de Génie, Département de Génie civil, Laval, Canada, [2001?]
20. **Y. Jannot**  
*Thermique solaire*  
Association Libre Cours, Rocquencourt, France, 2003, <http://www.librecours.org/documents/13/1393.pdf>, 2006
21. *COST 336 - Falling Weight Deflectometer*  
Final Draft, <http://cordis-europe.eu/cost-transport/src/cost-336.htm>
22. **D. Léonard, O. Pilate**  
*The Development of Temperatures in Newly Laid Asphalt*  
Congrès Eurasphalt & Eurobitume, Vienne, Autriche, mai 2004

23. **D. Grillet**  
*Transferts thermiques appliqués aux revêtements routiers*  
Institut Supérieur Industriel ECAM, Bruxelles, 2005
24. **Institut belge de Normalisation (IBN)**  
*Bitumes et liants bitumineux – Détermination de la température de ramollissement – Méthode Bille et Anneau*  
NBN EN 1427:2000
25. **O. Pilate**  
*Evolution des températures dans une couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée: prise en compte du rayonnement*  
XXe Congrès belge de la Route, Association belge de la Route (ABR), Bruxelles, 28-30 septembre 2005
26. **J.-P. Cornec**  
*Du temps solaire au temps légal*  
<http://perso.orange.fr/jean-paul.cornec/equation.htm>, 2006
27. **R. Dogniaux**  
*Eclairage énergétique par ciel serein des parois orientées et inclinées*  
Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM), Bruxelles, 1973
28. **R. Dogniaux**  
*Meteorological Data Measurement Techniques and Solar Components*  
Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM), Bruxelles, 1980
29. **R. Dogniaux**  
*De l'influence de l'estimation du facteur total de trouble atmosphérique sur l'évaluation du rayonnement solaire direct par ciel clair*  
Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM), Bruxelles, 1984
30. **R. Dogniaux**  
*Eclairage énergétique solaire direct, diffus et global des surfaces orientées et inclinées*  
Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM), Bruxelles, 1984
31. **R. Dogniaux**  
*Les rayonnements solaire, atmosphérique et terrestre*  
Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM), Bruxelles, 1982
32. **R. Dogniaux**  
*Paramétrisation des variations horaires et journalières du rayonnement solaire global et de la température de l'air en Belgique*  
Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM), Bruxelles, 1983
33. **A. Billet**  
*Albédo – Comment la Terre est-elle chauffée par le Soleil*  
Dossier 6, Collection de l'Atelier d'exploration, France, 1996

Evolution de la température d'une couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée / Pilate, O.

- Bruxelles : Centre de recherches routières, 2007.

- 84 p. + 1 CD-ROM.

- (Compte rendu de recherche, 42).

Si la chaussée est réouverte au trafic avant que la couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée ne soit suffisamment refroidie, des dégradations prématurées peuvent survenir.

Un modèle prévisionnel permettant de calculer le temps nécessaire au refroidissement d'une couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée a été développé afin d'adapter le délai entre la mise en œuvre de cette couche et la réouverture de la chaussée au trafic en conséquence. Ce compte rendu de recherche décrit, dans une première partie, le développement de ce modèle de calcul. Dans une première approche, la modélisation de l'évolution de la température d'une couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée ne prenait en compte que le transfert de chaleur par conduction et convection. La validation de ce premier modèle restreint sur chantier a montré que dans certaines conditions extrêmes (degré d'ensoleillement élevé), le rayonnement solaire influençait significativement le refroidissement de l'enrobé. De plus, la température de l'air prise en compte avait été considérée comme constante tout le long du refroidissement de la couche d'enrobé bitumineux. Afin de tenir compte de tous ces phénomènes, le transfert de chaleur par rayonnement solaire a été intégré dans le modèle de calcul et une paramétrisation de la variation de la température de l'air a été proposée. Le modèle de calcul final a également été validé sur chantier. Dans une deuxième partie, l'auteur propose des abaques permettant de déterminer l'heure de remise en service à partir de l'heure de pose, dans des conditions extrêmes de température, de nébulosité et de vitesse de vent. Pour calculer le délai d'attente dans les autres cas, un logiciel convivial a été développé et est joint à ce compte rendu. L'objectif de ce travail est d'aider tant le maître d'ouvrage que l'entrepreneur dans sa recherche de la qualité des ouvrages routiers, et de lui proposer un outil pratique pour ce faire.

#### Classification ITRD

31 – Liants et matériaux hydrocarbonés ; 52 – Construction des chaussées et revêtements

#### Mots-clés ITRD

0122 – PREVISION ; 1104 – MISE EN SERVICE (ROUTE LIGNE TRANSP) ; 2515 – SOLEIL ; 2545 – CLIMAT ; 2554 – VENT ; 2980 – COUCHE DE ROULEMENT ; 3623 – MISE EN OEUVRE (APPL) ; 4967 – ENROBE ; 5414 – TEMPS (DUREE) ; 6464 – CALCUL ; 6473 – MODELE MATHEMATIQUE ; 6711 – REFROIDISSEMENT (MATER) ; 6722 – TEMPERATURE ; 6731 – TRANSFERT ; 6737 – RAYONNEMENT ; 6743 – CHALEUR ; 8645 – LOGICIEL

#### Termes additionnels

#### Commande

Réf. CR42/06

Prix 16,00 € (TVA 6 % non comprise)

Fax: +32 2 766 17 87

e-mail: [publication@brrc.be](mailto:publication@brrc.be)



Dépôt légal: D/2007/0690/4  
ISSN: 1376 - 9359





## **C e n t r e   d e   r e c h e r c h e s   r o u t i è r e s**

Etablissement reconnu par application de l'Arrêté-loi du 30 janvier 1947

boulevard de la Woluwe 42

1200 Bruxelles

Tél. : 02 775 82 20 - fax : 02 772 33 74

[www.crr.be](http://www.crr.be)