

MODELISATION DE LA TEMPERATURE DE SURFACE D'UNE CHAUSSEE A COURTE ECHEANCE PAR TRANSFERT DE DONNEES METEOROLOGIQUES

Michel Frémond*, Laurent Labbé**, Patrick Lerat*, Rym Lassoued*

*Laboratoire central des Ponts et Chaussées, 58, boulevard Lefebvre, 75732 Paris Cedex 15, France, Mel : Michel.Fremond@lcpc.fr, TEL : +33-1-40-43-54-40 / FAX : +33-1-40-43-54-50, Mel : Patrick.Lerat@lami.enpc.fr, TEL : +33-1-64-15-37-03 / FAX : +33-1-64-15-37-41,

** Centre Inter-régional Nord, Météo-France, 18, rue Elisée Reclus, 59651 Villeneuve d'Ascq Cedex, France, Mel : laurent.labbe@meteo.fr, TEL : +33-3-20-67-66-38 / FAX : +33-3-20-67-66-93.

1. Résumé

L'état de surface de la route constitue pour l'utilisateur l'un des facteurs importants pris en compte dans sa stratégie de conduite. En période hivernale, cet état évolue en fonction des conditions météorologiques, des caractéristiques de la chaussée, des interventions réalisées pour la viabilité ainsi que du trafic.

Les exploitants des réseaux routiers disposent d'outils de prévision et de certains systèmes d'aide à la décision. Ces outils de prévision et d'intervention sont perfectibles et méritent d'être analysés afin d'améliorer leurs performances. Pour ce faire, une recherche thématique sur l'étude du comportement thermique de l'état de surface d'une chaussée en période hivernale, intitulée "Exploitation Hivernale des Chaussées", a été entreprise par le Laboratoire central des Ponts et Chaussées en collaboration avec MÉTÉO-FRANCE.

Dans cette communication, nous développons un modèle de prévision de la température de surface d'une chaussée, à courte échéance (trois heures), en tenant compte des caractéristiques thermiques et physiques de la chaussée ainsi que des conditions météorologiques. Ce modèle COGEL est le fruit du couplage du module GEL1D, modélisant le comportement du sol et du module COBEL, modélisant l'atmosphère. Le premier, GEL1D permet d'étudier l'évolution du champ de température dans un massif unidimensionnel multicouche. Le second, COBEL permet de prévoir la formation de brouillard dans l'atmosphère, donc de connaître la distribution des variables d'état de l'atmosphère (la température, l'humidité, etc, ...) dans la couche limite nocturne située entre la surface du sol et environ 1500 mètres d'altitude.

La méthode de couplage adoptée pour la mise en œuvre de COGEL préserve globalement les structures des deux modules GEL1D et COBEL. L'interface entre ces modules s'effectue par échange de flux d'énergie.

Pour valider ce module, des mesures ont été recueillies sur deux sites expérimentaux routiers, circulés et non circulés. Plusieurs exemples de simulation sont exposés. On constate une bonne cohérence entre les résultats simulés et les mesures expérimentales.

2. Introduction

L'état de surface de la route constitue pour l'utilisateur l'un des facteurs importants qu'il prend en compte dans sa stratégie de conduite. En période hivernale, cet état évolue en fonction des conditions météorologiques, en particulier de la température (Cames-Pintaux, Lerat, Dupas, 2000). Nous présentons dans le paragraphe 3 le modèle COGEL de prévision de cette température à courte échéance : on calcule trois heures à l'avance la température de surface de la chaussée en fonction des caractéristiques thermiques et physiques de celle-ci et du sol ainsi qu'en fonction des prévisions

météorologiques. Ce modèle résulte du couplage du modèle COBEL de Météo-France (Labbé, 1996) qui prédit la distribution des variables d'état de l'atmosphère et du modèle GEL1D du Laboratoire central des Ponts et Chaussées (Caniard, Dupas, Frémond, Lévy, 1975) qui prédit la température d'une chaussée en condition hivernale. Deux applications, présentées dans le paragraphe 4, à des sites du nord de la France montrent l'aptitude du modèle à prédire les conditions thermiques qui intéressent les usagers. Ces applications ont consisté à prédire la température de surface de 15h à 6h du matin le lendemain.

D'autres recherches sur la formation du verglas ont été conduites (Lassoued, 2000 ; Frémond, 2001).

3. Le Modèle

Il couple les modèles COBEL et GEL1D qui interagissent sur la surface de la chaussée. On décrit brièvement ces deux modèles.

3.1. Le Modèle COBEL

Il modélise la couche limite nocturne, du sol à 1500 m d'altitude. C'est un modèle qui fait appel à un schéma de transfert radiatif pour les flux de rayonnement infrarouge et à un schéma microphysique pour la gestion des phénomènes de condensation-évaporation (Labbé, 1996). L'état initial de l'atmosphère est défini par la température, l'humidité et le vent initiaux. Les actions extérieures, que l'on appelle les conditions de forçage, sont données pour le vent, l'humidité et la température. Les flux radiatifs solaire et nuageux sont aussi donnés. Avec toutes ces données, le programme fournit la température. En pratique, les actions extérieures sont réactualisées toutes les trois heures. Notons que COBEL possède un modèle de sol élémentaire qui est remplacé dans le couplage. Le modèle COBEL gère l'apparition et l'évolution du brouillard (Bergot, Guedalia, 1994).

3.2. Le Modèle GEL1D

Ce modèle calcule la température $\theta(x,t)$ dans un milieu stratifié. Il prend en compte le changement de phase eau-glace (Caniard, Dupas, Frémond, Lévy, 1975 ; Frémond, 2001). Chaque couche est caractérisée par :

- son épaisseur ;
- sa masse volumique sèche (ρ_a);
- sa teneur en eau (w) ;
- sa capacité calorifique ;
- ses conductivités thermiques gelée et non gelée (k_g et k_{ng}).

La température initiale de la structure routière est donnée. Les conditions aux limites en surface et en profondeur peuvent être données de quatre façons différentes :

température imposée (c'est la condition généralement choisie en profondeur) ;

flux de chaleur imposé : $\Phi = g_{imp}$;

flux de chaleur proportionnel à l'écart de température entre l'air (θ_a est la température de l'air) et la surface du sol : $\Phi = -\alpha(\theta - \theta_a)$;

flux de chaleur égal à la somme d'un flux imposé et d'un flux proportionnel à l'écart de température entre l'air et la surface du sol : $\Phi = g_{imp} - \alpha(\theta - \theta_a)$.

Avec ces données, le modèle GEL1D calcule la température en tout point et à tout instant. Dans le cas où la structure gèle, il fournit aussi la position du front de gel (le front de gel est le point où la température est nulle et où le changement de phase eau-glace se produit).

3.3. Le Couplage des Deux Modèles

Il se fait à la surface de la chaussée par une méthode itérative qui conserve globalement l'architecture des deux modèles (Lassoued, 2000). Le bilan énergétique à la surface de la chaussée est rappelé sur la figure 1.

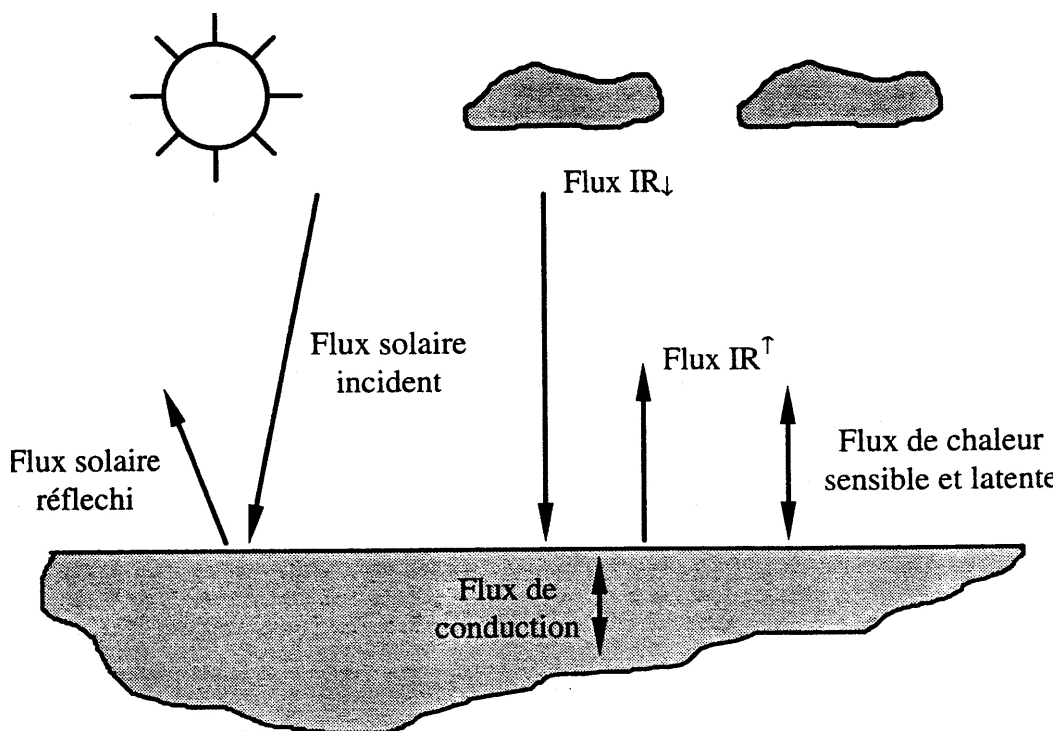


Figure 1. Schéma du Bilan Énergétique de Surface

Le couplage comporte deux étapes (figure 2) :

1^{ère} étape, la partie atmosphère du modèle fournit le flux Φ de conduction dans le sol à l'instant t . Avec cette condition à la limite (c'est la quatrième condition à la limite présentée précédemment), la partie sol du modèle est résolue et fournit la température de surface θ_{surf} à l'instant t ;

seconde étape, avec la température de surface à l'instant t , la partie atmosphère du programme est résolue et fournit le flux de conduction $\Phi = (\sum \text{flux}, \theta_a, \alpha)(t + \Delta t)$ à l'instant $t + \Delta t$ où Δt est l'incrément de temps de la méthode de calcul. On retourne alors à la première étape.

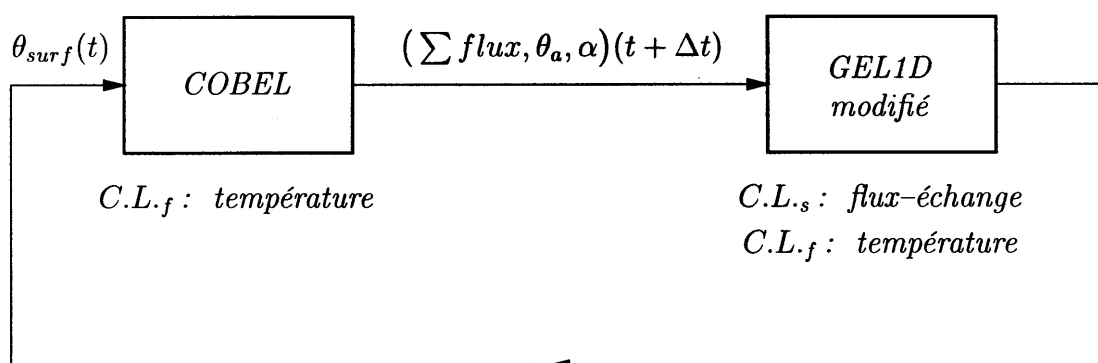


Figure 2. Principe de Fonctionnement du Modèle COGEL

4. Deux Applications

Deux sites expérimentaux du département du Nord ont été équipés : le site de la Sentinelle (RN455, qui est non circulé) et celui de Steenvoorde (RN225, qui est circulé). Plusieurs sortes de capteurs ont été installés (Livet, Morlot, 1997) :

- capteurs météorologiques : pression, température de l'air sous abri à 1,5 mètre du sol, température de rosée, précipitation, visibilité, flux infra-rouge descendant, flux solaire descendant, force et direction du vent, température dans le sol naturel ;
- capteurs routiers : température de surface de la chaussée, état de surface, température dans le corps de la chaussée.

4.1. La Route Nationale 455 à La Sentinelle

La description de la structure est donnée dans le tableau 1.

épaisseur cm	structure	position sonde (cm) (θ - 21/03/97, 15h)	ρ_d kg m ⁻³	k_{ng} Wm ⁻¹ K ⁻¹	k_g Wm ⁻¹ K ⁻¹	w %
3	béton bitumineux drainant	0 (19,3°C)	1960	1,1	1,1	0
8	béton bitumineux de liaison	-3,5 (16,7°C)	2350	2	2,1	1
22	grave	-14 (12,1°C)	2250	1,9	2,1	5
25	cendre volantes traitées	-36 (9,6°C)	1350	0,6	0,93	14
100	schistes rouge et noir criblés	-61 (9,8°C)	1800	1,4	1,52	12
842	terrain naturel	(8°C)	1610	1,4	1,8	20

Tableau 1. Caractéristiques Géométriques et Physiques de la Structure de la RN455 à La Sentinelle.

Des mesures ont été faites au cours de l'hiver 1996-1997. A titre d'exemple, la température de surface du 21/03/97, 15h au 22/03/97, 6h, a été mesurée. Les valeurs des différents flux sont données dans le tableau 2. Par ailleurs, les calculs ont été faits en actualisant toutes les trois heures les données météorologiques.

échéance h	flux solaire incident W m ⁻²	flux infra-rouge nuageux W m ⁻²
15	588	74,6
18	57	87
21	0	24,9
0	0	0
3	0	0
6	0	20

Tableau 2. Valeurs du Flux Solaire Incident et du Flux Infra-rouge Nuageux du 21/03/97 à 15h00 au 22/03/97 à 6h00

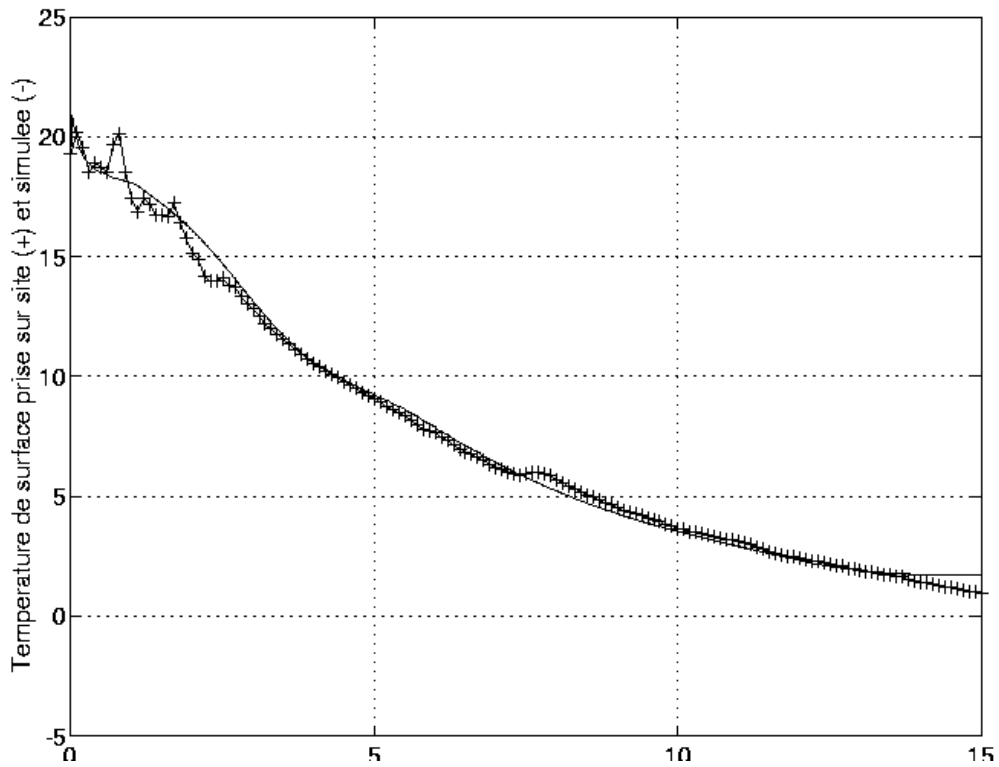


Figure 3. Les Températures Mesurée et Calculée de Surface de la Chaussée à La Sentinelle

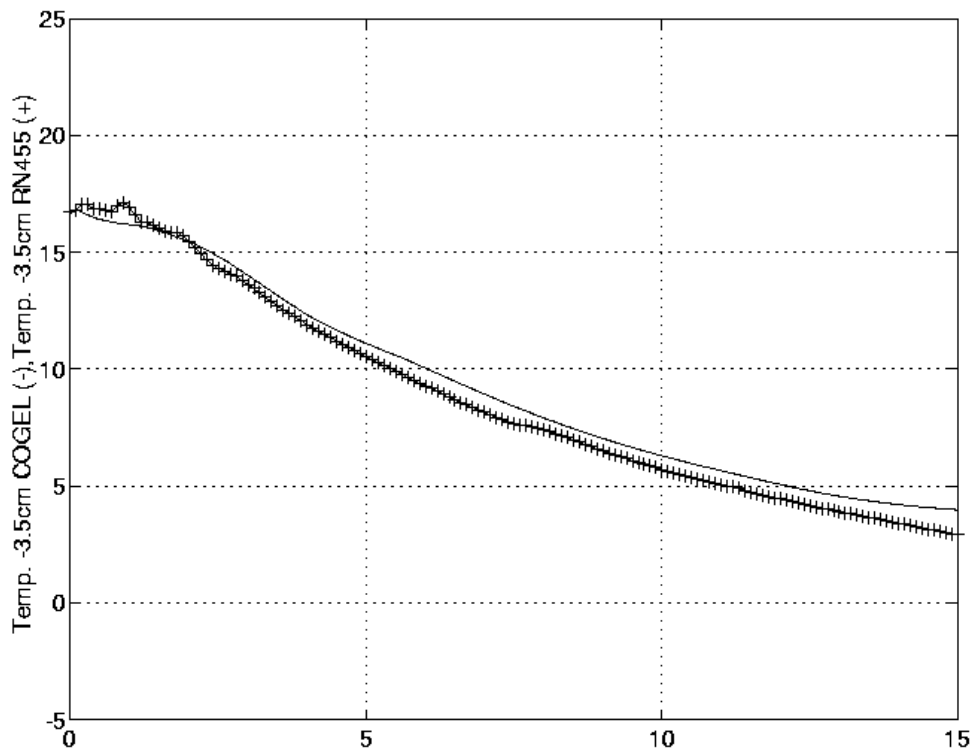


Figure 4. Les Températures Mesurée et Calculée à 3,5 cm de Profondeur à La Sentinelle

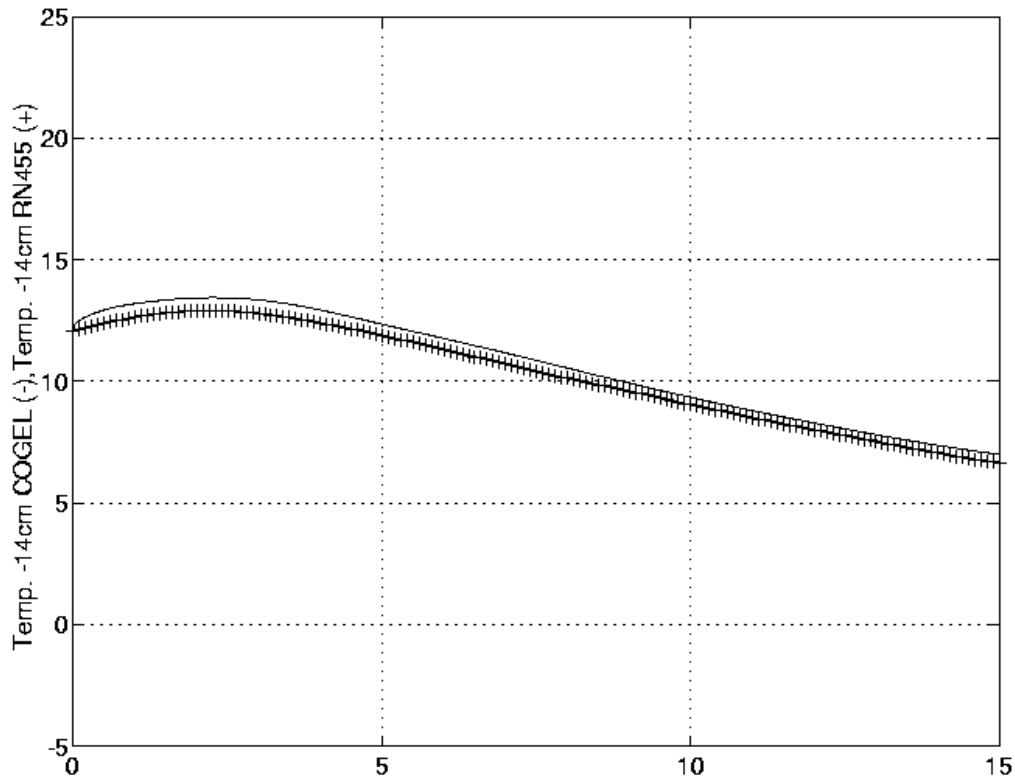


Figure 5. Les Températures Mesurée et Calculée à 14 cm de Profondeur à La Sentinelle

Les résultats sont présentés sur les figures 3, 4 et 5. On constate un bon accord avec quelques différences localisées, surtout pour la température de surface. Ces différences s'expliquent par des variations météorologiques locales : passages nuageux, variation du vent, ... et peut-être par la sensibilité des capteurs.

4.2. La Route Nationale 225 à Steenvoorde

La description de la structure de la chaussée est donnée dans le tableau 3.

épaisseur cm	structure	position sonde (cm) (θ - 02/02/98, 15h)	ρ_d kg m^{-3}	k_{ng} $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	k_g $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	w %
18	béton bitumineux	0 ($3,7^\circ\text{C}$) -10 (2°C)	2350	2	2,1	1
45	grave laitière	-20 (1°C) -30 ($0,9^\circ\text{C}$)	2050	1,1	1,3	4
18	sable traité		1900	1,1	1,3	7
919	terrain naturel	(8°C)	1610	1,4	1,8	20

Tableau 3. Caractéristiques Géométriques et Physiques de la Structure de la RN225 à Steenvoorde.

échéance h	flux solaire incident $W m^{-2}$	flux infra-rouge nuageux $W m^{-2}$
15	268,9	79,3
18	43,2	56,6
21	0	11,3
0	0	0
3	0	34
6	32,1	56,6

Tableau 4. Valeurs du Flux Solaire Incident et du Flux Infra-rouge Nuageux du 02/02/98 à 15h00 au 03/02/98 à 6h00

Sur ce site, la température de surface de la chaussée a été mesurée du 02/02/98, 15h, jusqu'au lendemain, 6h. Les flux solaires et infra-rouge sont donnés dans le tableau 4. Le froid a été suffisant pour que la température de surface de la chaussée devienne nettement négative (à partir de 20h30). Les températures de surface mesurée et calculée sont représentées sur la figure 6.

Un écart notable apparaît vers 23h30. Il semble dû à un passage nuageux qui n'a pas été pris en compte par COGEL puisque les informations sur la couverture nuageuse sont fournies toutes les trois heures à partir d'observations extrapolées. De plus, ces observations sont faites sur un site voisin de Steenvoorde, en l'occurrence sur le site de Dunkerque éloigné de 32 kilomètres. Il apparaît que les effets des flux nuageux ont une importance notable. De plus, ces effets sont localisés dans le temps et dans l'espace. La prévision de la température de surface demande donc une bonne information spatiale sur la couverture nuageuse.

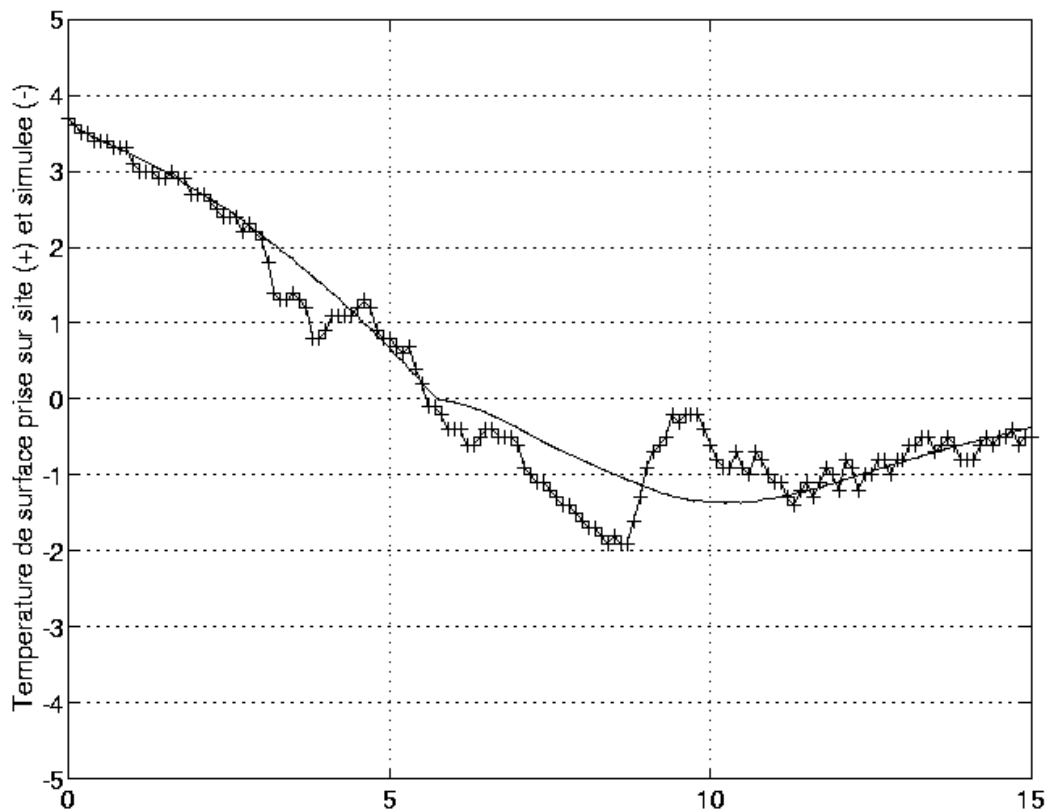


Figure 6. Les Températures de Surface Mesurée et Calculée à Steenvoorde

5. Conclusion

Le modèle COGEL mis au point par le Laboratoire central des Ponts et Chaussées et Météo-France donne une prévision satisfaisante de la température de surface d'une chaussée. Les applications présentées montrent tout l'intérêt de l'actualisation fréquente des conditions météorologiques locales, en particulier celles qui décrivent la couverture nuageuse.

6. Références

- T. Bergot, D. Guedalia, 1994, Numerical forecasting of radiation fog, Part I : Numerical model and sensitivity tests, *Int. Monthly Weather Review*, vol 122, 1218-1230.
- A.M. Cames-Pintaux, P. Lerat, A. Dupas, 2000, Evolution of the pavement surface temperature in winter conditions: geotechnical and thermal properties effects, in *Ground Freezing, Frost Actions in Soils*, J. F. Thimus ed. Balkema, Amsterdam.
- L. Caniard, A. Dupas, M. Frémond, M. Lévy, 1975, Comportement thermique d'une structure routière soumise à un cycle de gel-dégel. Simulations expérimentales et numériques, VI^e Congrès international de la Fondation Française d'Etudes nordiques. Les problèmes posés par la gélifraction : recherches fondamentales et appliquées, Le Havre.
- M. Frémond, 2001, *Non-smooth thermomechanics*, Springer-Verlag, Heidelberg.
- L. Labbé, 1996, COBEL : Description scientifique, *Int. Note du BED*, n° 5, 1-33.
- R. Lassoued, 2000, Comportement hivernal des chaussées : modélisation thermique, thèse de l'École nationale des Ponts et Chaussées.
- J. Livet, O. Morlot, 1997, Exploitation hivernale des chaussées : Modélisation locale de l'état de surface de la chaussée : I : RN 225 - DDE du Nord, Caractérisation du site expérimental CEI de Steenword ; II : RN 455 - DDE du Nord, Caractérisation du site expérimental CEI de la Sentinelle.