

Validation d'un modèle physique de prévision de la température de surface du revêtement de la chaussée : intégration de données in situ et de prévisions à moyenne échéance pour l'élaboration d'informations en météorologie routière hivernale

Jamal, Charles Yahia

▶ **To cite this version:**

Jamal, Charles Yahia. Validation d'un modèle physique de prévision de la température de surface du revêtement de la chaussée : intégration de données in situ et de prévisions à moyenne échéance pour l'élaboration d'informations en météorologie routière hivernale. Interfaces continentales, environnement. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2006. Français. NNT : 2006CLF21645 . tel-00688806

HAL Id: tel-00688806
https://theses.hal.science/tel-00688806

Submitted on 18 Apr 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Numéro d'ordre : D.U. 1645

UNIVERSITÉ BLAISE PASCAL

U.F.R. de Recherche Scientifique et Technique

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES FONDAMENTALES

N° : 482

THÈSE

Présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR D'UNIVERSITÉ

Spécialité : Physique de l'Atmosphère

par

Jamal Charles Yahia

Diplômé d'Études Approfondies LAMORA

Validation d'un modèle physique de prévision de la température de surface du revêtement de la chaussée : intégration de données in situ et de prévisions à moyenne échéance pour l'élaboration d'informations en météorologie routière hivernale

Soutenue publiquement le 16 mars 2006, devant la commission d'examen :

Présidente	Nadine Chaumerliac (LaMP, Clermont-Ferrand)
Rapporteur	Gérard Brogniez (LOA, Lille)
Rapporteur	Yves Delanne (LCPC, Nantes)
Examinateur	Guy Cautenet (LaMP, Clermont-Ferrand)
Directeur de thèse	Pascal Personne (LaMP, Montluçon)
Conseiller d'étude	Jean-Luc Paumier (LRPC/CETE de Lyon, Clermont-Ferrand)
Invité	Christian Faure (SIGNATURE, Urrugne)

Laboratoire de Météorologie Physique, UMR 6016, 24 avenue des Landais, 63177 AUBIÈRE Cedex, France

Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées, 8-10 rue Bernard Palissy, 63000 CLERMONT-FD Cedex 17, France

REMERCIEMENTS

Longtemps j'ai imaginé cet instant, celui où je rédige cette page, comme un aboutissement. La cerise sur le gâteau en quelque sorte. Le "*The End*" d'Autant en emporte le vent (les flammes et le mélo en moins). En fait, il n'en est rien. Ce n'est pas une fin. Tout juste un commencement. Mais laissons ça. L'heure n'est pas aux digressions philosophiques. Je souhaite maintenant conclure ce chapitre de ma vie de manière désespérément conventionnelle en exprimant ma gratitude à un ensemble de personnes qui de près ou de loin ont eu rapport avec ce travail.

Dans un premier temps, je voudrais remercier les directeurs du Laboratoire de Météorologie Physique Madame Nadine Chaumerliac et du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées Monsieur Claude Augé de m'avoir accueilli au sein de leurs laboratoires. Merci à Pascal Personne d'avoir diriger cette thèse, à Jean-Luc Paumier d'avoir eu 99% des réponses à mes questions, Messieurs Gérard Brogniez et Yves Delanne de m'avoir fait l'honneur de rapporter ma thèse, Guy Cautenet pour son amitié et d'avoir été examinateur de ce travail et Monsieur Christian Faure d'avoir fait partie du Jury.

Tous les autres que je vais livrer maintenant en vrac, je les remercie pour ce qu'ils m'ont apporté durant cette thèse en terme de soutien moral, amical, familial, sportif, culinaire, scientifique, informatique, artistique, orthographique, mécanique, touristique, logistique, humoristique et autre rimes en "ique", j'ai nommé en ordre alphabétique des prénoms : Bernard Griffon, Céline Cornet, Céline Pesin, Christel Bouet, Elsa Labus, Frank, Stef et Nathan Tharsis, Frederic Laserre, Gilles Foret, Gilles Legoueix, Isabelle Chiapello, Joaquim Arteta, Justine Gourdeau, Karine Desboeufs, la famille Lesueur, Lamia Bengaida, Lauréline Bourcier, Laurent Deguillaume, Les familles Delpierre, Maud et Marco Kiligian-Leriche, Muriel Citerne, Olivier Jourdan, Olivier Losson, Pascal Bleuyard, Philippe Morange, Pilar Lesage, Richard Fity, Sandra Banson, Séverine Arzalier

Enfin, merci à Mustapha et Mauricette mes parents…

LISTE DES SYMBOLES ET ACRONYMES

A	Albédo de la surface de la chaussée	–
AH	Angle horaire du soleil	–
a_{wa}	Coefficient d'absorption par la vapeur d'eau	–
c	Vitesse de la lumière (≈3.10^8m/s)	m/s
C	Capacité thermique volumique	J/m^3.K
C_d	Coefficient d'échange global ou coefficient de traînée	
C_p	Capacité thermique massique de l'air à pression constante	J/kg.K
$c_p(z)$	Capacité thermique massique de la chaussée à la profondeur z	J/kg.K
D	Écart-type lié à $\bar{E}$	°C ou K
$dE_B(\lambda,T)$	Émittance spectrale du corps noir à la température T	W/m^2
$\bar{E}$	Écart moyen entre les températures de surface observée et prévue	°C ou K
$\|E\|$	Écart absolu entre les températures de surface modélisée et observée	°C ou K
$E(T)$	Émittance totale réelle d'un corps à la température T	W/m^2
$E_B(T)$	Émittance totale du corps noir à la température T	W/m^2
E_a	Pression de vapeur d'eau	Pa
EP	Quantité d'eau précipitable	mm ou cm
H	Flux turbulent de chaleur sensible	W/m^2
h	Altitude	m
h'	Fluctuation turbulente de l'humidité spécifique	g/kg
h_p	Constante de Planck (≈$6{,}63.10^{-34}$J.s)	J.s
hr	Humidité relative	%
I_0	Constante solaire (≈1367 W/m²)	W/m²
K	Flux de chaleur par conduction dans le sol	W/m^2
$k(z)$	Diffusivité thermique de la chaussée à la profondeur z	m^2/s
k_B	Constante de Boltzmann (≈$1{,}38.10^{-23}$ J/K)	J/K
L	Chaleur latente d'évaporation de l'eau	J/kg
LE	Flux turbulent de chaleur latente	W/m^2

m	Chemin optique des rayons du soleil	
n	Nébulosité	octa
N	Rayonnement net infrarouge	W/m^2
q	Humidité spécifique	g/kg
q_a	Humidité spécifique de l'air	g/kg
q_{surf}	Humidité spécifique de la surface du sol	g/kg
$1/r^2$	Facteur de correction de la variation annuelle de la distance Terre-Soleil (≈1)	–
R_{abs}	Rayonnement solaire global et atmosphérique infrarouge absorbé par le sol	W/m^2
R_{at}	Rayonnement atmosphérique infrarouge incident à la surface du sol	W/m^2
R_d	Rayonnement solaire réfléchi par diffusion du sol	W/m^2
R_{diff}	Rayonnement solaire diffus incident à la surface du sol	W/m^2
R_{dir}	Rayonnement solaire direct incident à la surface du sol	W/m^2
R_g	Rayonnement solaire global incident à la surface du sol	W/m^2
R_n	Rayonnement net	W/m^2
$R_{réf}$	Rayonnement solaire réfléchi direct par la surface du sol	W/m^2
R_{surf}	Rayonnement IR émis par la surface ou rayonnement tellurique	W/m^2
T	Température thermodynamique d'un corps	°C ou K
T_i^n	Température du corps de la chaussée au niveau i à l'instant n	°C ou K
T_{-15}	Température du corps de la chaussée à 15 cm de profondeur	°C ou K
T_{-30}	Température du corps de la chaussée à 30 cm de profondeur	°C ou K
T_a	Température de l'air	°C ou K
T_d	Température du point de rosée	°C ou K
T_s	Température de surface du revêtement de la chaussée	°C ou K
T_{surf}	Température de la surface du sol	°C ou K
u_a	Vitesse du vent	m/s
w	Épaisseur d'eau condensable	kg/m²
z	Profondeur dans le sol	m
Z	Hauteur du soleil ou angle solaire zénithal	
α	Coefficient d'absorption du sol	–
δ	Déclinaison du soleil	
ε	Émissivité d'un corps	–
θ'	Fluctuation turbulente de la température potentielle	°C ou K

λ	Longueur d'onde	m
$d\lambda$	Intervalle de longueurs d'onde centré autour de λ	m
λ_m	Longueur d'onde où le flux d'émission est maximum pour un corps à la température thermodynamique T	m
$\lambda(z)$	Conductivité thermique de la chaussée à la profondeur z	W/m.K
λ_c	Conductivité thermique de la chaussée	W/m.K
λ_i	Conductivité thermique de la chaussée au niveau i	W/m.K
λ_{sol}	Conductivité thermique à la surface du sol	W/m.K
$\rho(z)$	Masse volumique de la chaussée à la profondeur z	kg/m^3
ρ_a	Masse volumique de l'air	kg/m^3
σ	Constante de Stefan-Boltzmann ($\approx 5{,}67.10^{-8} W/m^2.K^4$)	$W/m^2.K^4$
τ_{da}	Épaisseur optique fictive d'absorption des aérosols	–
τ_{ds}	Épaisseur optique fictive de diffusion des aérosols	–
χ	Latitude	
Ψ	Coefficient de transmission atmosphérique sur tout le spectre	–
Ψ^*	Coefficient de transmission atmosphérique monochromatique	–
Ψ_D	Coefficient de transmission après absorption et diffusion par les aérosols	–
Ψ_{da}	Coefficient de transmission après absorption par les aérosols	–
Ψ_{ds}	Coefficient de transmission après diffusion par les aérosols	–
Ψ_{rs}	Coefficient de transmission après la diffusion Rayleigh	–
Ψ_{wa}	Coefficient de transmission après absorption par la vapeur d'eau	–
Ψ_{ws}	Coefficient de transmission après diffusion par la vapeur d'eau	–
ω'	Fluctuation turbulente de la vitesse verticale	m/s
CDM	Centre Départemental de Météorologie	
CEI	Centre d'Exploitation et d'Intervention	
IMCCE	Institut de Mécanique Céleste et des Calculs Éphémérides	
LaMP	Laboratoire de Météorologie Physique	
LRPC	Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées	
RAU	Réseau d'Appel d'Urgence	

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS 3

LISTE DES SYMBOLES ET ACRONYMES 5

TABLE DES MATIÈRES 9

INTRODUCTION 13

CHAPITRE 1 TRANSFERT D'ÉNERGIE À L'INTERFACE SOL-ATMOSPHÈRE : BASES PHYSIQUES 17

1. ÉCHANGES D'ÉNERGIE AVEC L'ATMOSPHÈRE 17
1.1. Échanges radiatifs *18*
1.1.a. Rayonnement solaire incident 19
1.1.b. Rayonnement atmosphérique 21
1.1.c. Rayonnement tellurique 21
1.2. Échanges conductifs *23*
1.3. Échanges convectifs *24*
2. NOTION DE BILAN D'ÉNERGIE 25
3. CONCLUSIONS DU CHAPITRE 26

CHAPITRE 2 ÉTAT DE L'ART 29

1. LE MODÈLE DE SHAO ET LISTER 29
2. LE MODÈLE DE SASS [SASS ET AL., 1997] 32
3. LE MODÈLE DE CHAPMAN ET THORNES [CHAPMAN ET THORNES, 2002] 35
4. LE MODÈLE DE BORGEN ET GUSTAVSSON [BORGEN ET GUSTAVSSON, 2002] 37
5. LES RÉSULTATS 38
6. CONCLUSIONS DU CHAPITRE 40

CHAPITRE 3 LE MODÈLE 41

1. LES DONNÉES D'OBSERVATION 42
1.1. Les variables atmosphériques 42
1.2. Les mesures "chaussée" 43
1.3. Les paramètres locaux de la chaussée 47
2. LES DONNÉES PRÉVISIONNELLES 48
3. LES ÉTAPES DU CALCUL 49
3.1. Acquisition des données 50
3.2. Détermination des conditions initiales 51
3.3. Prévision de la température de surface locale 51
3.4. Extension à l'itinéraire et affichage 51
3.5. Conclusion 52
4. DESCRIPTION DU MODÈLE 53
4.1. Détermination des conditions initiales 53
4.2. Prévision de la température de surface 55
4.2.a. Les équations du modèle 55
4.2.b. Les modélisations des échanges énergétiques 58
4.2.c. Résolution de l'équation 67
4.2.d. Sorties du modèle 73
5. CONCLUSIONS DU CHAPITRE 75

CHAPITRE 4 SENSIBILITÉ DU MODÈLE 77

1. LA BASE DE DONNÉES 77
1.1. Le site opérationnel 77
1.2. Organisation de la base de données 79
2. OUTILS POUR L'ÉTUDE 81
2.1. Étude d'un cas ponctuel 81
2.2. Approche statistique 83
3. SENSIBILITÉ AUX PARAMÈTRES DE LA CHAUSSÉE 84
3.1. Sensibilité à la capacité thermique massique de la chaussée 84
3.2. Sensibilité à la masse volumique de la chaussée 88
3.3. Sensibilité à la diffusivité thermique de la chaussée 90
4. SENSIBILITÉ AUX PARAMÈTRES ATMOSPHÉRIQUES 92
4.1. Sensibilité au coefficient d'échange global atmosphérique 92
4.1.a. Coefficient de jour 92

4.1.b. Coefficient de nuit 94
4.2. Température de l'air 96
4.2.a. Méthode statistique 96
4.2.b. Méthode du changement de la valeur de référence 99
4.3. Humidité relative de l'air 101
4.3.a. Méthode statistique 101
4.3.b. Méthode de changement de valeur de référence 103
4.4. Nébulosité 105
5. PRÉPONDÉRANCE DES PARAMÈTRES 107
6. CONCLUSIONS DU CHAPITRE 109

CHAPITRE 5 PERFORMANCES ET AMÉLIORATIONS 111

1. PERFORMANCES 111
1.1. Confrontation du modèle à la prévision par persistance 112
1.2. Confrontation aux observations 114
1.2.a. Performances générales 114
1.2.b. Performances selon l'heure 116
1.2.c. Performances selon la date 122
1.2.d. Sensibilité à l'état de surface de la chaussée 127
1.3. Confrontation au modèle ISBA-ROUTE 131
1.3.a. Description d'ISBA-ROUTE 131
1.3.b. Étude comparative 133
1.4. Conclusions 135
2. AMÉLIORATIONS 136
2.1. Correction du biais de 19H00 136
2.2. Correction des heures de lever et coucher du soleil 139
3. CONCLUSIONS DU CHAPITRE 144

CONCLUSION 145

ANNEXE : Equation de conduction dans un mur semi-infini en régime périodique 151

LISTE DES FIGURES 155

LISTE DES TABLEAUX 159

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 163

INTRODUCTION

De la fin de l'automne au début du printemps, de vastes régions de l'hémisphère boréal dont l'Amérique du Nord, l'Europe de l'Ouest et du Nord sont soumises à de fréquents épisodes de neige, de gel ou de verglas. De telles conditions climatiques induisent des situations difficiles et dangereuses pour les usagers de la route avec tout ce que cela peut impliquer pour les transports routiers dans ces régions. Avant le milieu des années quatre-vingts, l'une des pratiques les plus courantes pour se protéger de ces conditions météorologiques était de procéder au salage (ou sablage) des routes après formation de verglas sur leurs surfaces. De telles pratiques exigent environ quatre à dix fois plus de sel pour éliminer le verglas routier qu'en prévenant la formation de la glace par un prétraitement des surfaces susceptibles d'être verglacées [Department of Transport, 1987 ; Stephenson, 1988]. De plus, il a été démontré que l'excès d'utilisation des fondants entraîne des problèmes collatéraux tels que la corrosion et le vieillissement prématuré des véhicules et des ouvrages d'art, la pollution des sols et des nappes phréatiques sans parler des effets nocifs sur la faune et la flore [Highway Research Broad, 1967 ; OECD, 1989]. Il faut donc que le salage des routes dans le cadre de la viabilité hivernale soit appliqué uniquement "où et quand" cela est nécessaire. Ce but peut être atteint par l'implication de la recherche météorologique dans un programme de viabilité hivernale des routes.

Au cours des vingt dernières années, les services de viabilité routière ont reconnu que les modèles numériques de prévision des conditions propices à la formation du verglas étaient des techniques particulièrement appropriées à la sécurité routière durant les périodes hivernales. Ce genre de modèle fournit aux gestionnaires autoroutiers les données prévisionnelles de "où et quand" le verglas est susceptible de se former et ce pour les aider à décider du lieu et de l'heure de l'intervention préventive. Cette technique aide les gestionnaires autoroutiers à maintenir, voire à

améliorer, le niveau de la sécurité routière tout en diminuant les quantités de fondants utilisées, en optimisant les ressources en hommes et matériel et en réduisant les nuisances infligées à l'environnement.

Depuis le milieu des années quatre-vingts, de nombreux modèles ont été développés dans ce but [Paumier et al., 1989 ; Rayer, 1989 ; Sass, 1992 ;Shao et al., 1995, 1994 ; Shao, 1990 ; Thornes, 1984]. Le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand en collaboration avec le Laboratoire de Météorologie Physique de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand a développé un système d'aide à la prise de décision nommé PRÉVIROUTE. Il est fondé sur un modèle physique de prévision de la température de surface du revêtement de la chaussée. Ce système fonctionne de façon quotidienne en période hivernale (soit du 1er décembre au 31 mars). Tous les jours à 15H00 PRÉVIROUTE effectue une prévision à moyen terme (24 heures) de la température du revêtement de surface de la chaussée. Les sorties de ce modèle, combinées aux données instantanées mesurées par les stations météorologiques routières, aux données prévisionnelles de Météo-France et aux observations des patrouilleurs contribuent à la prévision des conditions propices à la formation du verglas routier afin de garantir aux usagers un maximum de sécurité.

L'objet de cette thèse s'inscrit pleinement dans ce contexte, puisqu'il vise à connaître les limites, la sensibilité et les performances du modèle sur lequel est fondé PRÉVIROUTE. Ce travail a bénéficié des données expérimentales obtenues lors de la campagne expérimentale sur l'autoroute A72 [Paumier et al., 1984] ainsi que des données acquises sur l'autoroute A75 dans le Cantal durant la période 1994-2003. De manière pragmatique, ce travail doit permettre de répondre aux questions suivantes : quels sont les processus et paramètres les plus influents sur la prévision de la température de surface ? Sous quelles conditions climatiques ces processus interviennent-ils ? Peut-on parvenir à une amélioration du modèle ?

Ce document est constitué de cinq chapitres.

Les bases physiques sur lesquelles repose la modélisation de la prévision de la température de surface du revêtement de la chaussée sont présentées dans le CHAPITRE 1. Ce dernier est décomposé en trois parties présentant les différentes formes d'énergie à l'interface sol-atmosphère.

Le CHAPITRE 2 est consacré à la présentation sommaire de différents modèles de prévision de la température de surface.

Le modèle utilisé est présenté dans le CHAPITRE 3.

Les diverses analyses de sensibilité font l'objet du CHAPITRE 4. Après une brève présentation de la base de données constituée sur l'autoroute A75 dans le Cantal, une confrontation du modèle avec une prévision par persistance a été réalisée. Dans un second temps, la sensibilité du modèle à différents paramètres est présentée et interprétée.

Enfin, la phase d'étude des performances du modèle est décrite et les possibilités d'amélioration sont évaluées et discutées dans le CHAPITRE 5.

CHAPITRE 1 TRANSFERT D'ÉNERGIE À L'INTERFACE SOL-ATMOSPHÈRE : BASES PHYSIQUES

Les surfaces terrestres échangent en permanence de l'énergie entre les différents éléments qui les constituent ainsi qu'avec l'atmosphère à leur contact. La compréhension des mécanismes associés à ces transferts est indispensable à l'étude de la température de surface du sol. Ce chapitre s'attachera donc à présenter les principales bases théoriques physiques sur lesquelles repose la description des processus qui interviennent à l'interface sol-atmosphère et dans le sol. Il servira par ailleurs de base de description au modèle de prévision de la température de surface des sols présenté dans cette thèse.

1. ÉCHANGES D'ÉNERGIE AVEC L'ATMOSPHÈRE

De manière générale, la quantification des échanges d'énergie se fait à partir de la densité de flux représentant la quantité d'énergie qui entre en jeu sur une surface par unité de temps. Elle s'exprime en W/m^2 et sera par la suite appelée flux.

Les composantes énergétiques qui interviennent à l'interface sol-atmosphère ont différentes origines. En premier lieu, le sol reçoit de l'énergie radiative émanant du soleil et de l'atmosphère. Cette énergie électromagnétique constitue la source originelle de tous les échanges radiatifs à l'interface sol-atmosphère. Le sol redistribue dans son proche environnement l'énergie radiative absorbée. Ceci se fait selon différents modes de transfert de chaleur : par émission d'énergie radiative (infrarouge thermique), par conduction de la chaleur dans le sol ou par convection dans l'atmosphère. L'ensemble de ces quantités permet d'introduire la notion de bilan d'énergie traduisant le principe de conservation de l'énergie dans le milieu.

1.1. Échanges radiatifs

Au niveau de la surface du sol, il y a coexistence de trois rayonnements électromagnétiques : deux sont des apports d'énergie et un est une perte d'énergie. Les apports d'énergie sont d'origine solaire et atmosphérique. La perte d'énergie est due au rayonnement tellurique.

Les échanges radiatifs correspondent à un rayonnement énergétique d'origine purement électromagnétique. Par définition, tout corps à la température thermodynamique T émet un rayonnement caractéristique dû à son agitation moléculaire interne. Pour une température donnée, la loi de Wien donne la valeur de la longueur d'onde λ_m où le flux est maximal :

Équation 1 $$\lambda_m = \frac{C}{T}$$

où C =2897.10^{-6} m.K.

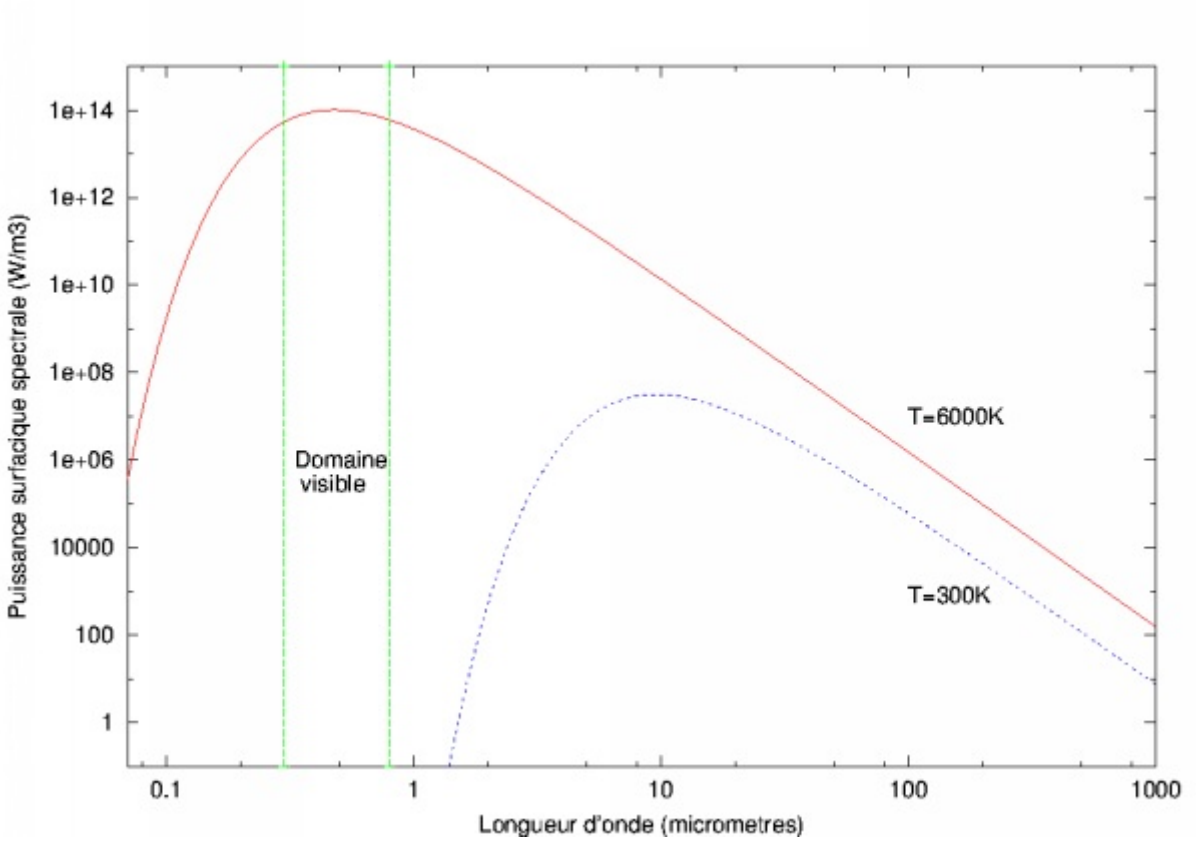


Figure 1. Les courbes d'émission spectrale pour le soleil (T≈6000K) et la Terre ou l'atmosphère (T≈300K).

À l'aide de la Figure 1 montrant les courbes d'émission spectrale pour deux températures, on peut trouver graphiquement que :

- Pour T=6000K (température du soleil), $\lambda_m \approx 0{,}48$ µm, soit le milieu du spectre visible.
- Pour T=300K (température moyenne approximative du sol ou de l'atmosphère), $\lambda_m \approx 10$ µm, situé dans l'infrarouge.

Notons que la Figure 1 montre le spectre d'émission du soleil et non pas le rayonnement incident à la surface du sol. Après la traversée de l'atmosphère, le spectre du rayonnement solaire est amputé de certaines longueurs d'onde absorbées par les constituants atmosphériques.

1.1.a. Rayonnement solaire incident

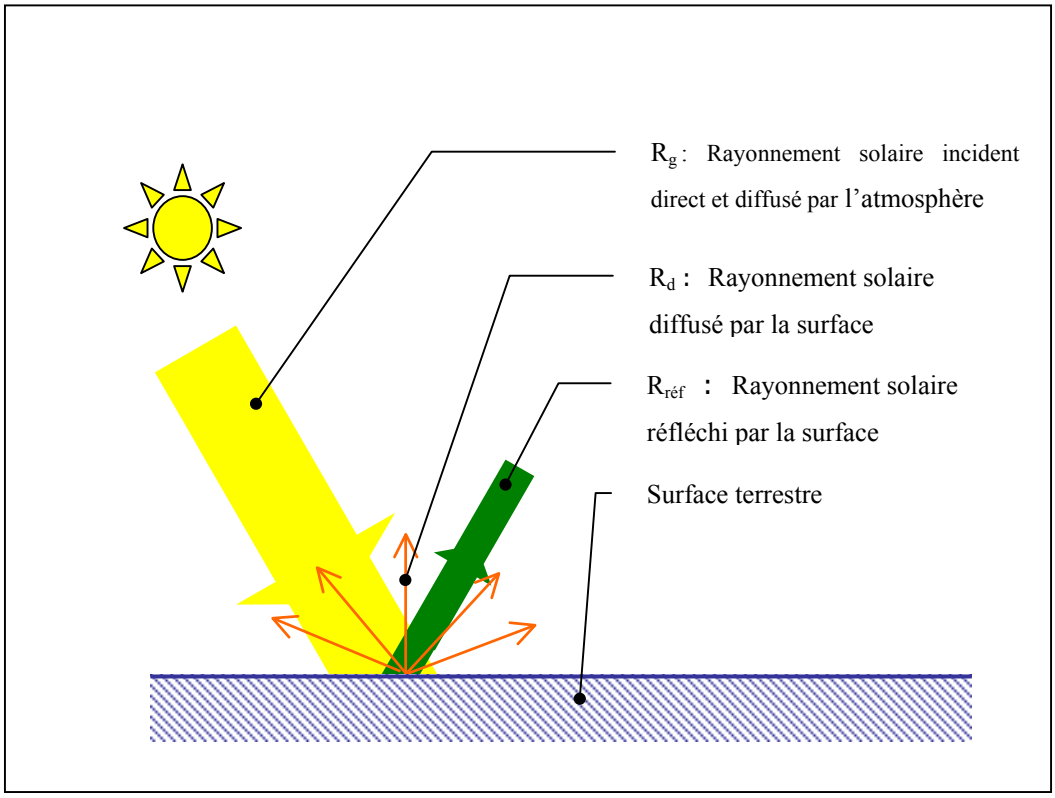


Figure 2. Bilan du flux solaire au niveau de la surface du sol.

Le rayonnement solaire est la source la plus importante. Étant donné que le soleil est un corps dont la température est de l'ordre de 6000K, son spectre d'émission est compris pour l'essentiel entre 0,25 µm et 4 µm. D'après la loi de Wien, ce spectre est centré sur 0,48 µm : le rayonnement solaire est dit rayonnement de courtes longueurs d'onde. L'atmosphère absorbe et diffuse en partie ce rayonnement solaire dans ces longueurs d'onde. Ceci implique que le rayonnement solaire reçu au niveau du sol est sensiblement différent de celui au sommet de l'atmosphère, notamment dans les courtes longueurs d'onde [Olioso,1992]. Le rayonnement solaire global R_g reçu au niveau de la surface terrestre est la somme du rayonnement solaire direct incident R_{dir} et de la partie du rayonnement solaire diffusé par l'atmosphère en direction du sol R_{dif}.

Équation 2 $$R_g = R_{dir} + R_{dif}$$

Une partie de l'énergie solaire incidente est directement renvoyée vers l'atmosphère par réflexion $R_{réf}$ et par diffusion R_d par la surface du sol (cf. Figure 2).

Le sol est un corps dit opaque car il ne transmet à travers lui aucune partie du rayonnement incident. La partie restante R_{abs} est absorbée et transformée en énergie interne.

Équation 3 $$R_g = \left(R_{réf} + R_d\right) + R_{abs}$$

En normalisant l'Équation 3 par R_g on obtient :

Équation 4 $$1 = \frac{\left(R_{réf} + R_d\right)}{R_g} + \frac{R_{abs}}{R_g}$$

On définit alors deux coefficients A et α tels que :

Équation 5
$$A = \frac{\left(R_{réf} + R_d\right)}{R_g}$$

Équation 6
$$\alpha = \frac{R_{abs}}{R_g}$$

A est le pouvoir de réflexion appelé albédo et α est le pouvoir d'absorption du sol.

1.1.b. Rayonnement atmosphérique

La seconde source de rayonnement agissant sur la surface du sol provient de l'ensemble de la couche atmosphérique. Le spectre de ce rayonnement est compris entre 3 µm et 100 µm et est appelé rayonnement atmosphérique. D'après la loi de Wien, le maximum énergétique du spectre de rayonnement atmosphérique se situe vers 10 µm dans le domaine infrarouge : il est dit rayonnement de grandes longueurs d'onde. La composition chimique de l'atmosphère et la présence d'aérosols et de nuages affectent simultanément l'interception du rayonnement solaire direct et l'émission atmosphérique. En supposant toujours la surface du sol comme homogène et opaque, pour cette fenêtre spectrale, le coefficient de réflexion est très faible. Il en résulte alors que la quantité de rayonnement absorbée par le sol est grande.

Le rayonnement incident d'origine atmosphérique noté R_{at} est appelé rayonnement atmosphérique infrarouge.

1.1.c. Rayonnement tellurique

Le rayonnement émis par la surface du sol obéit à la loi de Planck. La loi de Planck exprime l'émittance spectrale $dE_B(\lambda,T)$ d'un corps (W/m^2) en fonction de sa température T (K) pour un petit intervalle $d\lambda$ (m) de sa longueur d'onde centré autour de λ. Ce flux est émis dans un angle solide de 2π, c'est-à-dire dans l'hémisphère au-dessus de la surface du sol :

Équation 7

$$dE_B(\lambda,T) = \frac{2\pi.h_p.\lambda^{-5}.c^2}{\exp\left(\frac{h_p.c}{\lambda.k_B.T}\right)-1}.d\lambda$$

où h_p est la constante de Planck (≈6,63.10^{-34} J.s), c la vitesse de la lumière (≈3.10^8 m/s) et k_B la constante de Boltzmann (≈1,38.10^{-23} J/K).

L'émittance totale $E_B(T)$ (W/m^2) du corps noir, est alors donnée par la loi de Stefan-Boltzmann, c'est-à-dire par intégration de la loi de Planck sur l'ensemble du spectre électromagnétique :

Équation 8

$$E_B(T) = \int_0^\infty dE_B(\lambda,T) = \sigma.T^4$$

où σ est la constante de Stefan-Boltzmann (≈5,67.10^{-8} W/m^2.K^4).

Toutefois le sol ne se comporte généralement pas comme un corps noir. Il émet moins d'énergie que celle estimée par la loi de Planck.

L'émissivité caractérise l'efficacité de l'émission électromagnétique d'un objet. Si l'on considère l'ensemble du spectre électromagnétique et qu'on suppose l'objet homogène, l'émissivité de l'objet peut alors être définie comme le rapport de son émittance totale réelle $E(T)$ sur son émittance totale $E_B(T)$ s'il était assimilé à un corps noir à la même température T :

Équation 9

$$\varepsilon = \frac{E(T)}{E_B(T)}$$

L'émittance $E(T)$ réelle d'un corps à la température T s'écrit donc :

Équation 10

$$E(T) = \varepsilon.\sigma.T^4$$

avec ε l'émissivité de l'objet intégrée sur l'ensemble du spectre.

En fait, le sol émet son propre rayonnement, le rayonnement tellurique, dans une gamme spectrale proche de celle de l'atmosphère. Ce rayonnement est en général supérieur au rayonnement atmosphérique infrarouge incident (température plus forte). Le rayonnement tellurique, qu'on appellera rayonnement de surface infrarouge et que l'on notera R_{surf}, peut être estimé sur l'ensemble du spectre électromagnétique par la relation :

Équation 11 $$R_{surf}\left(T_{surf}\right) = \varepsilon.\sigma.T_{surf}^{4}$$

où ε est l'émissivité du sol, σ la constante de Stefan-Boltzmann et T_{surf} la température de surface du sol.

Il est possible à partir des trois composantes radiatives d'établir un bilan radiatif pour la surface du sol. Celui-ci traduit la fraction d'énergie radiative gagnée ou perdue par le sol, appelée communément rayonnement net R_n (W/m^2).

Équation 12 $$R_n = R_g.(1-A) + R_{at} - R_{surf}$$

En général, R_n est positif le jour car le terme d'origine solaire est prépondérant et généralement négatif la nuit car l'émission thermique de la surface terrestre est supérieure à l'apport d'origine atmosphérique.

1.2. Échanges conductifs

La conduction est un mode de propagation de la chaleur qui s'opère sous l'effet des collisions intermoléculaires intervenant dans un milieu. Elle est efficace dans des milieux denses soumis à de forts gradients thermiques. Ces conditions sont satisfaites dans le cas des sols. Le flux associé à ce processus est le flux de chaleur par conduction dans le sol, noté K.

Dans l'hypothèse d'un sol horizontalement uniforme en température, il n'y a pas de conduction latérale de chaleur. Il ne persiste que la conduction verticale ; c'est une conduction unidirectionnelle. Par la suite nous nous placerons dans ces conditions. Le flux de chaleur par conduction est alors habituellement modélisé à partir de la loi

de Fourier, exprimant la relation de proportionnalité qui le lie avec le gradient de température dans le sol proche de la surface.

Équation 13

$$K = -\lambda_{sol}\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{z=0}$$

où λ_{sol} (W/m.K) est la conductivité thermique du sol.

On verra par ailleurs comment modéliser le profil de température dans le sol.

1.3. Échanges convectifs

La convection est un régime de transfert de chaleur entre la surface et l'atmosphère. Elle correspond au brassage quasi permanent de l'air des diverses couches atmosphériques par l'action de différents facteurs extérieurs (vent, gradient de température et gradient d'humidité).

Ces échanges convectifs entre l'air et la surface du sol sont représentés par deux termes : la chaleur sensible H et la chaleur latente LE. Ces flux de chaleur à un niveau z dans l'air sont définis habituellement par :

Équation 14

$$H = C_p.\rho_a.\overline{\theta'\omega'}$$

Équation 15

$$LE = L.\rho_a.\overline{h'\omega'}$$

où C_p, ρ_a et L sont respectivement la capacité thermique massique de l'air à pression constante, la masse volumique de l'air et la chaleur latente d'évaporation de l'eau liquide ; les symboles θ', h' et ω' désignent respectivement les fluctuations turbulentes de la température potentielle, de l'humidité spécifique et de la vitesse verticale. Si ces définitions sont utiles pour l'estimation expérimentale de ces flux par la méthode de "corrélation" fondée sur les mesures directes de θ', h' et ω', elles ne sont d'aucun secours pour l'estimation de ces flux dans un modèle. Donc, à défaut de mesures météorologiques expérimentales, les flux des chaleurs sensible et latente sont estimés par une méthode globale qui fait l'hypothèse que les processus de

transfert se font dans une couche limite atmosphérique homogène et que ces processus sont proportionnels à la différence de température entre la surface et l'atmosphère, à la vitesse du vent et au gradient local d'humidité relative. Selon cette méthode, H et LE s'écrivent :

Équation 16 $$H = C_p.\rho_a.C_d.u_a.(T_{surf} - T_a)$$

Équation 17 $$LE = L.\rho_a.C_d.u_a.(q_{surf} - q_a)$$

où C_d est le coefficient d'échange global assimilé en général à un coefficient de traînée et déterminé expérimentalement. u_a, T_a, q_a, sont respectivement la vitesse du vent, la température et l'humidité spécifique à la hauteur des capteurs. T_{surf} et q_{surf} sont respectivement la température et l'humidité spécifique à la surface du sol. L'humidité spécifique s'exprime en g/kg.

2. NOTION DE BILAN D'ÉNERGIE

Le sol et son environnement échangent en permanence de l'énergie par le biais de flux radiatifs, de flux de conduction et de convection. Ces échanges sont essentiellement gouvernés par les rayonnements solaire et atmosphérique et le mouvement de l'air au voisinage de la surface. Le bilan d'énergie d'un système traduit la loi de conservation de l'énergie.

Au niveau de l'interface sol-atmosphère le bilan d'énergie s'exprime par :

Équation 18 $$(1 - A).R_g + R_{at} - R_{surf} - K - H - LE = 0$$

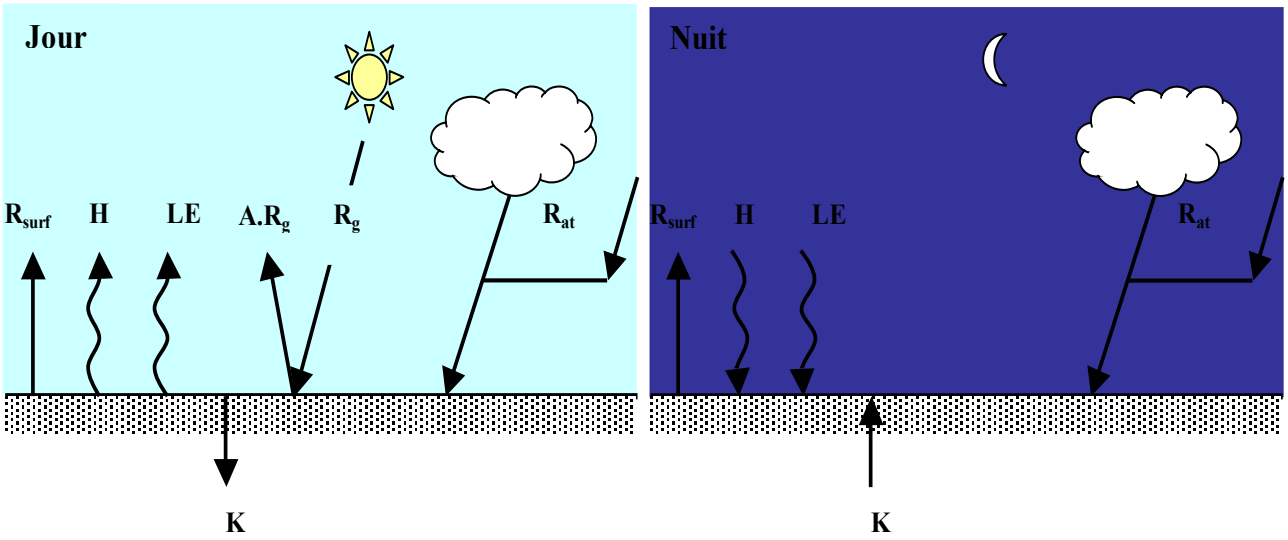


Figure 3. Représentation schématique des bilans d'énergie de jour et de nuit au niveau de la surface du sol. De jour on suppose que la température de surface est supérieure à la température de l'air et à celle du sol en profondeur. De nuit on suppose que la température de surface est inférieure à la température de l'air et à celle du sol en profondeur.

La Figure 3 représente schématiquement les bilans énergétiques de jour et de nuit. De jour, les apports énergétiques correspondent aux rayonnements solaire global R_g et atmosphérique infrarouge R_{at}. Les pertes d'énergie sont dues au flux de chaleur latente LE dans l'air (évaporation de l'eau), au flux convectif de chaleur sensible H, au flux de chaleur par conduction dans le sol K et au rayonnement de surface R_{surf}.

De nuit, les pertes de chaleur sont principalement dues au rayonnement de surface R_{surf}. Les apports d'énergie correspondent au flux convectif de chaleur sensible H dans l'air (qui est plus chaud que la surface du sol), au flux de chaleur latente LE si de l'eau se condense (rosée), au flux de chaleur par conduction K dans le sol (dont les couches profondes sont alors plus chaudes que la surface) et au rayonnement atmosphérique infrarouge R_{at}.

3. CONCLUSIONS DU CHAPITRE

Nous avons dit, en introduction de ce chapitre, que la température de surface des sols était gouvernée par les échanges énergétiques qui interviennent à l'interface sol-atmosphère. Le rayonnement solaire reçu par la Terre est à l'origine de ces échanges d'énergie, lesquels sont de trois types : radiatif (rayonnement solaire,

rayonnement atmosphérique et rayonnement tellurique), conductif (flux de conduction de chaleur dans le sol) et convectif (flux de chaleur latente et de chaleur sensible). Nous avons enfin montré que les valeurs et le sens des échanges dépendaient du cycle diurne-nocturne.

Les principes physiques exposés dans ce chapitre concernant les échanges d'énergie à l'interface sol-atmosphère sont adaptables à tout type de sol. Pour cela il suffit de prendre en considération les particularités physiques, optiques et thermiques du sol que l'on souhaite étudier. En particulier, on pourra utiliser ce raisonnement pour l'étude des surfaces des revêtements de chaussées.

CHAPITRE 2 ÉTAT DE L'ART

Les systèmes d'information météorologique routière (RWIS : Road Weather Information System), composés de nombreux éléments liés entre eux, sont utilisés pour prévoir les variations de la température de surface des chaussées. Les prévisions météorologiques routières fournies par les prévisionnistes utilisent des stations météorologiques routières automatiques placées en des sites stratégiques. Ces stations routières mesurent des variables météorologiques ainsi que les conditions de surface des chaussées. Ses données sont ensuite acheminées vers un centre de traitement où elles sont combinées à des informations météorologiques régionales pour alimenter des modèles de prévision des conditions météorologiques routières. De nombreux modèles ont été développés de part le monde dans ce but et ils utilisent soit un bilan d'énergie à la surface de la chaussée, soit une équation unidimensionnelle de conduction de chaleur dans le sol soit une approche neuronale. Tous ont pour but de produire des températures de surface de la chaussée et des conditions routières prévisionnelles à partir de prévisions météorologiques (Thornes, 1991).

Ce chapitre s'attache à présenter un état de l'art non exhaustif des modèles physiques de prévision de la température de surface de part le monde. Une présentation du principe, des données d'entrée et des performances de chaque modèle est réalisée. Tout ceci est résumé dans un tableau récapitulatif dans le dernier paragraphe de ce chapitre.

1. LE MODÈLE DE SHAO ET LISTER

Au Royaume Uni un modèle de prévision automatique à courte échéance (3 à 6 heures) du verglas routier a été développé en 1996 par Shao et Lister. Ce modèle fonctionne en mode opérationnel temps réel depuis cette date.

Le modèle est fondé sur l'équation de conduction de chaleur, à une dimension, dans le corps de la chaussée associée à un calcul de conditions initiales et de conditions aux limites. L'équation gouvernant le modèle est :

$$C \cdot \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(\lambda_c \cdot \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \right)$$

où, C est la capacité thermique volumique, λ_c la conductivité thermique et $T(z,t)$ la température à un instant t et à la profondeur z de la chaussée. Ce modèle fait l'hypothèse que la chaussée est horizontalement homogène de telle sorte que le transfert de chaleur latéral peut être négligé.

Pour faire fonctionner le modèle, une condition initiale et des conditions aux limites inférieure et supérieure sont nécessaires. Le profile de température dans le sol constitue la principale condition initiale. La condition à la limite inférieure, considérée à 1 m de profondeur, est traitée comme une constante climatologique. La condition à la limite supérieure est décrite par un bilan d'énergie :

$$(1 - A) \cdot R_g + N + H + LE + K = 0$$

où, R_g est le rayonnement solaire global, A est l'albédo de la chaussée, N est le rayonnement net infrarouge, H et LE les flux de chaleur sensible et latente et K est le flux de conduction de chaleur dans le sol. Touts ces termes sont donnés en valeurs algébriques.

Le modèle est alimenté par un historique de 24 heures de mesures météorologiques in situ et par des paramètres physiques ajustables du site étudié (latitude, longitude, émissivité, facteur de visibilité du ciel, coefficient de rugosité, conductivité thermique, capacité thermique volumique, etc.). Les variables météorologiques ainsi que les paramètres physiques nécessaires au fonctionnement du modèle sont respectivement donnés par le tableau 1 et 2

Variables météorologiques :
Température de l'air des 24 dernières heures ;
Température du point de rosée des 24 dernières heures ;
Vitesse du vent des 24 dernières heures ;
Précipitation au départ de la prévision ;
Température et état de la surface du revêtement de la chaussée au départ de la prévision ;
Profil de la température du corps de la chaussée au départ de la prévision.

Tableau 1 Variables météorologiques d'entrée du modèle.

Paramètres physiques :
Latitudes et longitude ;
Température climatique du sol à 1 m de profondeur en période hivernale ;
Pression atmosphérique hivernale moyenne ;
Facteur de visibilité du ciel (1 pour un ciel clair et 0 pour un ciel entièrement couvert) ;
Émissivité de la surface de la route (de 0 à 1) ;
Coefficient de rugosité de la surface de la route ;
Conductivité thermique de la route ;
Capacité thermique volumique de la route.

Tableau 2 Paramètres physiques d'entrée du modèle.

Les tests de sensibilité du modèle ont montré que les paramètres les plus influents sur la précision de la prévision de la température de surface par ce modèle sont le coefficient de rugosité et l'émissivité. Pour améliorer la précision de la prévision, le modèle réalise l'ajustement dynamique de ces deux paramètres. Cet ajustement est réalisé en recherchant les valeurs optimales de ces paramètres permettant de donner le minimum d'écart entre la prévision et la mesure.

Les résultats de la prévision à 3-heures pour tous les sites de mesure en Grande Bretagne sont donnés entre le 1er novembre et le 31 mars pour l'hiver 1999-2000. La température de surface prévue est à chaque fois comparée à la température mesurée sur le site. L'erreur de la prévision est donnée par l'écart moyen $\bar{E}$[1] entre la prévision et la mesure et par l'écart type D[2]. La prévision des situations de gel (Ts<0°C) ou de non-gel (T>0°C) a été comparée avec les observations des capteurs et son exactitude est exprimée en %. Ces résultats sont résumés dans le Tableau 3

Mois	Nombre de cas	Écart moyen (°C)	Écart type (°C)	Exactitude (%)
Novembre	30 310	-0,19	1,06	92,5
Décembre	157 527	0,00	0,90	88,6
Janvier	121 930	-0,02	1,02	88,2
Février	127 012	0,11	1,14	87,4
Mars	41 463	-0,22	1,35	92,2

Tableau 3 Performances de la prévision de la température de la surface de la chaussée par le modèle au Royaume Uni durant l'hiver 1999/2000.

Ces résultats montrent que l'écart moyen entre la prévision et la mesure est proche de 0°C et que l'exactitude de la prévision des situations de gel et de non-gel est d'environ 90%. Le

1 $\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^{n} E_i}{n}$

modèle montre une meilleure performance de la prévision de la température de surface en décembre et janvier qu'en mars.

2. LE MODÈLE DE SASS [SASS ET AL., 1997]

Un système manuel de prévision des chaussées glissantes a été opérationnel au Danemark depuis l'hiver 1993/1994. Ce système était fondé sur la surveillance des données de plus de 200 stations météorologiques routières dispersées sur tout le pays. Ces données (Température et humidité de l'air à 2 m, température de la chaussée, etc.) étaient soumises, toutes les 10 mn environs, aux gestionnaires routiers et au prévisionnistes de l'Institut Danois de Météorologie (DMI). Une prévision météorologique était alors obtenue toutes les heures avec une échéance de 3 heures.

En 1992 le DMI a décidé de développer un système automatique de prévision des chaussées glissantes. La première version du modèle de conditions routières (road conditions model RCM) a été décrite par Sass (1992). Ce modèle se fonde sur la résolution de l'équation du bilan de chaleur à l'interface entre la chaussée et l'atmosphère.

En mode opérationnel ce modèle nécessite des l'entrée de données issues d'un modèle atmosphérique (High Resolution Limited Area Model : HIRLAM) ainsi que d'observations synoptiques incluant les données de surface de la chaussée. Les flux radiatifs, la chaleur sensible, la chaleur latente et les précipitations sont calculés à partir des prévisions de température et humidité de l'air, de la couverture nuageuse, du vent et des précipitations pour les sites équipés de stations météorologiques. Toutes les données d'entrée nécessaire au RCM sont données dans le Tableau 4.

L'originalité de ce système est le traitement des conditions initiales dont la correction des flux de surface pour chaque station.

[2] $D = \sqrt{\frac{1}{n}\sum\left(\overline{E} - E_{\cdot}\right)^{2}}$

Données HIRLAM
T(k) (k<N) température à chaque niveau atmosphérique k (C°) ;
q(k) humidité spécifique à chaque niveau atmosphérique k (kg/kg) ;
T_{2m} température à 2 m de hauteur (°C) ;
q_{2m} humidité spécifique à 2 m de hauteur ;
V_{10m} vitesse du vent (m/s) à 10 m ;
Q intensité de précipitations ($Kg/m^2.s$) ;
p_s pression de surface (Pa) ;
N nombre de niveaux du modèle atmosphérique ;
Données synoptiques
C_{ob} fraction de couverture du ciel ;
H_{ob} altitude des nuages ;
Données des stations météorologiques routières
T_{2m} température mesurée à 2 m de hauteur (°C) ;
T_{d2m} température de rosée mesurée à 2 m de hauteur (°C) ;
$T_s(1)$ mesurée à la surface de la chaussée (°C) ;

Tableau 4 Variables météorologiques d'entrée du modèle.

À partir des données précédentes le RCM effectue le calcul prévisionnel d'un certain nombre de données résumé dans le Tableau 5. Ces données calculées par le modèle sont indispensables pour la prévision de la température de la surface de la chaussée.

Variables additionnelles (output) :
$T_s(l)$ (l<M) profil de température verticale de la chaussée ;
W_s eau à la surface (kg/m^2) ;
I_s glace à la surface de la chaussée (kg/m^2) ;
M nombres de niveaux dans le sol du modèle RCM ;
T_{10m} température de l'air à 10 m à partir de T_{2m} et T(N) ;
q_{10m} humidité spécifique de l'air à 10 m à partir de q_{2m} et q(N) ;
C(k) la couverture nuageuse au niveau atmosphérique k ;

Tableau 5 Variables météorologiques d'entrée du modèle.

Depuis 1995 le système de prévision est devenu opérationnel pour presque toutes (200) les stations météorologiques routières au Danemark. Une prévision est fournie toutes les heures avec une échéance de 5 heures.

La Figure 4 montre les performances opérationnelles des prévisions des températures de la surface par différentes méthodes pour le mois de février 1996. L'écart absolu moyen entre observation et prévision par le RCM est représenté par la courbe pleine. Le résultat correspondant pour une prévision par persistance est donné par la courbe en tirets. La courbe en tiret-point donne la performance d'une prévision par extrapolation linéaire de la température de la surface observée dans la dernière heure précédant la prévision. Ces trois résultats représentent la moyenne des résultats de toutes les stations météorologiques routières. La Figure 4 montre que pour une prévision à 5 heures d'échéance la prévision par le RCM est la plus performante et fournit un écart absolu moyen qui s'accroît avec le temps mais qui reste toujours inférieur à 1°C.

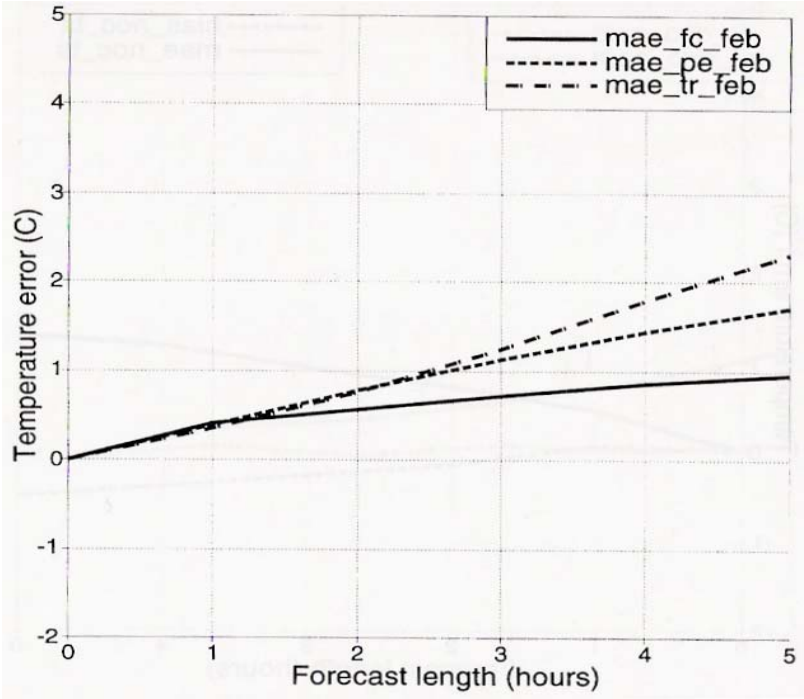


Figure 4 Operational monthly verification results for February 1996 as an average for 200 road station sites. The solid line shows the mean absolute error of the rcm forecasts. The dashed line and the dot-dashed line apply to the persistency forecasts and linear trend forecasts, respectively.

La Figure 5 montre la répartition sur six classes de 1°C de largeur de l'écart entre l'observation et la prévision à 3 heures du RCM pour le mois de février 1996 pour toutes les 200 stations. Cette figure confirme que l'écart est centré sur 0°C et que près de 80% des prévisions présente moins de 1°C de différence d'avec l'observation.

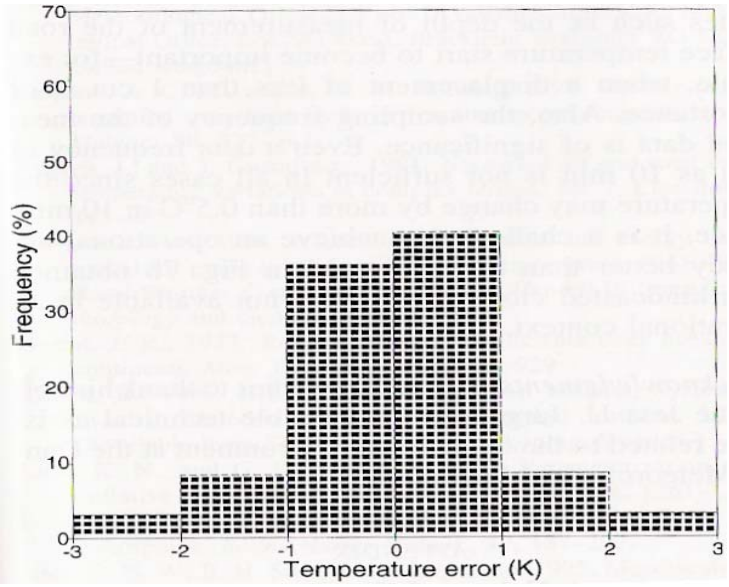


Figure 5 Error frequencies (%) of road surface temperature forecasts in February 1996 at 3 have an average for 200 station sites. The frequencies are in 1°C intervals. The two extreme intervals represent errors with absolute values larger than 2°C.

3. LE MODÈLE DE CHAPMAN ET THORNES [CHAPMAN ET THORNES, 2002]

Chapman et al. (2001b) a repoussé les limites des recherches empiriques en apportant une composante géographique au modèle numérique de prévision de météorologies routière de Thornes (1984). Ce modèle utilise le bilan d'énergie à la surface de la chaussée pour simuler les transferts d'énergie en des sites choisis et ce en cherchant la température de surface unique qui permet d'équilibrer les flux d'énergie traversant la surface :

$$(1-A)\cdot(R_{dir}+R_{diff})+\psi\cdot\sigma\cdot T_c^4-\sigma\cdot T_0^4-R_N=H+LE+K$$

où A est l'albédo de la chaussée, R_{dir} le rayonnement solaire direct, R_{diff} le rayonnement solaire diffus, σ la constante de Boltzmann, T_c la température de brillance de l'hémisphère céleste, ψ un facteur de visibilité atmosphérique, T_0 la température de la surface, RN le rayonnement net infrarouge, LE le flux de chaleur latente, H le flux de chaleur sensible et K le flux de conduction dans le sol.

Le modèle produit, pour chaque site, des prévisions forcées par des paramètres géographiques résumés dans le Tableau 6. Ces prévisions sont fournies chaque jour à midi pour les 24 heures à venir mais elles sont constamment mises à jours en les forçant avec les données météorologiques mesurées par les stations routières.

Paramètres	Mesure	Utilité dans le modèle
Latitude	GPS	Calcul géométrique de R_{dir} et R_{diff}
Altitude	GPS	Quantifier les variations de la température de l'air
Topographie	GPS	Indice du refroidissement dû aux nappes d'air froid se formant dans les creux et au bas des vallées.
Facteur de visibilité	Imagerie panoramique	La visibilité est liée à la géométrie du lieu qui joue sur la quantité de rayonnement infrarouge perdu par la surface
Projection	Imagerie panoramique	Intimement lié au facteur de visibilité, la projection exprime l'impossibilité, due à la géométrie des vallées, qu'a le rayonnement infrarouge de parvenir à la surface
Utilisation des sols	Observation locale	Les propriétés thermiques des surfaces sont fonctions de l'utilisation des sols (milieu urbain, milieu rural, milieu forestier…)
Structure routière	Observation locale	Utilisée pour paramétrer le profil de température dans la chaussée
Trafique	Observation locale	Utilisé pour paramétrer la chaleur anthropique

Tableau 6 Paramètres géographiques introduits par Chapman dans le modèle numérique de Thornes.

Une route test couvrant un tronçon de route entre le centre de Birmingham et la zone rurale du Worcestershire, a été thermiquement observée 20 fois durant l'hiver 1999-2000 pour fournir des données de validation afin de tester les performances du modèle amélioré par la prise en compte des paramètres géographiques. L'écart moyen entre l'observation et la prévision par le modèle après amélioration est de -0,19 °C, l'écart type est de 0,70 °C et l'erreur estimée par la méthode des moindres carrés est de 1 °C. Ces résultats sont résumés dans le Tableau 7 et sont comparés aux performances d'autres systèmes. Bien que cette comparaison plaide pour le modèle amélioré par Chapman, il est préférable de rester prudent quant aux conclusions car ces modèles ont été comparés en utilisant des jeux de données différents.

	Chapman et al. (2001b)	ICEBREAK	Thornes	Office Météorologique
Nombre d'heures	Non communiquer	2164	2164	2164
Écart moyen	-0,19 °C	-0,29 °C	-0,61 °C	-1,14 °C
Écart type	0,70 °C	0,96 °C	1,28 °C	1,05 °C
RMS	1,00 °C	1,00 °C	1,42 °C	1,54 °C

Tableau 7 Comparaison des performances de modèles de prévision de météorologie routière (Thornes et Shao, 1991) incluant les performances du modèle amélioré par Chapman.

4. LE MODÈLE DE BORGEN ET GUSTAVSSON [BORGEN ET GUSTAVSSON, 2002]

Aujourd'hui le système d'information météorologique routier (RWIS road weather information system) suédois représente plus de 660 stations météorologiques routières. Ces stations représentent différents types de microclimats et de conditions locales comme des ponts, des vallées sujettes aux gelées, des sections de routes ombragées, des collines etc. La recherche et développement autours des modèles de prévision du verglas routier ces dernières années ont montré l'importance de la prise en compte des spécificités locales des sites de prévision (Borgen 2000, Chapman 2000, Maisey et al. 2000).

Le modèle de prévision de la température de surface de la chaussée RST (road surface temperature forcast) actuellement en fonctionnement dans le cadre du RWIS, calcule la température de surface de la chaussée pour chaque station. Le modèle fournit toutes les 30 min une prévision de 4 heures avec un pas de 1 heure. L'algorithme du modèle combine trois principes différents. Le premier principe est le calcul numérique du bilan d'énergie. Le second est le calcul de la température de surface de chaussée par un module statistique utilisant les constantes spécifiques au site. Le dernier principe est le calcul de la température de surface de la chaussée par un modèle de tendance linéaire.

Selon le moment de la journée et des conditions météorologiques dominantes le module le plus pertinent est choisi individuellement ou en combinant les autres. Les différentes manières d'établir la façon d'effectuer les prévisions sont déterminées par une combinaison complexe de critères où la tendance précédente mise en relation avec la signature thermique est le paramètre le plus important. Il a été possible de développer ces critères empiriques spécifiques à chaque site grâces aux données des différentes stations du RWIS acquises et conservées depuis les 25 dernières années.

Les données d'entrée du modèle de prévision sont fournies par les stations météorologiques de terrain du réseau RWIS mais également par l'Institut Suédois de Météorologie et d'Hydrologie (swedish meteorogical and hydrological institute SMHI). Le SMHI fourni des données prévisionnelles telles que la température de l'air et la couverture nuageuse. Les prévisions de nébulosités sont décisives pour le calcul du bilan radiatif qui est dans le modèle actuel déterminé par une formule empirique dérivée d'une base de données de grande envergure présentée par Nielsen et al. (1981) combinée avec les observations du site expérimental de Surte en Suède.

L'étude des sorties du modèle RST confirme l'importance de la prévision de la couverture nuageuse pour le calcul de la température de surface. Ceci signifie qu'une erreur sur la prévision des nuages implique un impact considérable sur la précision des résultats du RST par le biais du calcul des rayonnements.

Aux vu des résultats de cette étude, une nouvelle étude a été menée. Dans cette étude les prévisions du RST pour deux stations (stations 1520 et 1417) située à la sortie de Göteborg dans le sud-ouest de la Suède ont été analysées dans deux modes de fonctionnement. Cette étude a été réalisée pour une période allant du 23 janvier au 1er février 2001. Les deux modes de fonctionnement se différentient par des données d'entrée différentes : le mode 1 est alimenté par des prévisions de couverture nuageuse et calcule les rayonnement, le mode 2 est alimenté par des mesures de rayonnement.

Station	Mode	Taux (%) des écarts entre observation et prévision par tranche de 0,5°C				
		-0,5°C	-1,0°C	-1,5°C	-2,0°C	-2,5°C
1417	1	36%	57%	72%	81%	87%
	2	43%	65%	78%	86%	90%
1520	1	44%	66%	78%	87%	91%
	2	45%	67%	80%	89%	92%

Tableau 8 Étude comparative des performances du RST en mode 1 et 2.

Les résultats montrent qu'avec le mode 2 il y a moins de prévision dont l'écart absolu dépasse 0,5°C. Le Tableau 8 montre, pour la station 1417 qu'il y a une augmentation (de 57% à 65%) du taux d'erreurs sur la prévision inférieur à 1°C pour une prévision à 4 heures d'échéance grâce au mode 2.

En utilisant les mesures de rayonnement l'écart absolu moyen entre observation est prévision est donc amélioré. Pour une prévision à 2 heures d'échéance l'écart absolu moyen passe de 0,74°C à 0,70°C pour la station 1417 et de 0,63°C à 0,60°C pour la station 1520. Pour une prévision à 4 heures d'échéance l'écart absolu moyen passe de 1,16°C à 1,04°C pour la station 1417 et de 1,06°C à 0,96°C pour la station 1520.

5. LES RÉSULTATS

Un comparatif des modes de fonctionnement et des performances des divers modèles cités est présenté dans le Tableau 9. La performance des modèles est donnée par la moyenne des écarts $\bar{E}$ entre la température de surface observée et la température de surface prévue combinée à

l'écart-type D qui lui est associé et qui reflète l'écart-type des écarts autour de la valeur moyenne $\bar{E}$. Plus $\bar{E}$ et D sont petits et plus le modèle est performant.

Modèle	Échéances de fonctionnement	Sorties et performances
Shao et Lister (1996)	3 à 6 heures déclenchement conditionné par un seuil de température d'air mesurée	• Température de surface • État de surface hiver 1999/2000 : • Ē ≈ 0°C • D ≈ 1,6°C
Sass (1997, 1992)	5 heures	• Température de surface • Température de l'air • Précipitations février 1996 : • Ē < 1°C] • D : non communiqué
Bogren et Gustavsson (2002)	4 heures, renouvelable toutes les ½ heures	• Température de surface hiver 1999/2000 : • Ē <1°C • D : non communiqué
Chapman et al. (2001(b), 2002)	24 heures, mis à jour constamment grâce aux mesures des stations	• Température de surface hiver 1999/2000 : • Ē ≈ -0,19°C • D ≈ 0,70°C
Thornes (1984)	24 heures, mis à jour constamment grâce aux mesures des stations	• Température de surface hiver 1999/2000 : • Ē ≈ 0,61°C • D ≈ 1,28°C
ISBA-Route[3]	Pour le moment c'est un modèle de simulation des températures de surface et non un modèle de prévision	• Température de surface • En cours de développement

Tableau 9. Récapitulatif des performances et utilisations des modèles physiques des prévisions de températures de la surface du revêtement de la chaussée.

[3] Le modèle ISBA sera plus amplement abordé au chapitre 5.

6. CONCLUSIONS DU CHAPITRE

Bien que très performants, les modèles évoqués ci-dessus ne répondent pas aux besoins exprimés par les gestionnaires autoroutiers avec qui le modèle PRÉVIROUTE a été testé. En effet tous ces modèles fournissent des prévisions de la température de surface du revêtement de la chaussée de haute qualité mais pour des échéances trop courtes (cf. Tableau 9).

Le modèle PRÉVIROUTE, développé en concertation avec les gestionnaires autoroutiers fourni des prévisions à 24 heures d'échéances. Il présente en plus l'avantage d'être facilement adaptable à toute autoroute car il ne nécessite que peu de paramètres propres au site de prévision. En effet, ce modèle n'exige pas une connaissance profonde de la topographie des lieux ou des propriétés physiques de la chaussée.

De part la simplicité de sa mise en œuvre et de ses échéances de prévisions, PRÉVIROUTE est particulièrement adapté à l'aide à la prise de décision pour le service hivernal. Nous allons par la suite expliciter ce modèle et étudier ses performances.

CHAPITRE 3 LE MODÈLE

Le modèle PRÉVIROUTE a pour vocation de prévoir la température de surface de la chaussée sur un itinéraire. La prévision de ces températures de surface de la chaussée se fait sur 24 heures à partir d'un certain nombre de données de routine. Il a été développé au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand en collaboration étroite avec le Laboratoire de Météorologie Physique de l'université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand. La conception de sa version actuelle de fonctionnement est le fruit de plusieurs évolutions. Nous retiendrons essentiellement trois étapes. Les travaux initiés par Paumier en 1986 ont fourni en premier lieu les modèles décrivant les transferts d'énergie à l'interface sol-atmosphère ainsi qu'une modélisation multicouche de la chaussée [Paumier et al., 1989]. Le fonctionnement en mode pré-opérationnel du modèle à partir de 1991 a permis une évaluation des modélisations choisies [Isaka et al., 1991] et a conduit finalement à l'installation dès 1993 en mode opérationnel du modèle PRÉVIROUTE sur l'autoroute A75 dans le département du Cantal. Le programme de recherche instauré par Paumier (de 1986 jusqu'à présent) ainsi que les personnes y étant associées, permet d'évaluer et d'améliorer continuellement les performances de PRÉVIROUTE. La description du fonctionnement de PRÉVIROUTE ainsi que les choix de modélisations sont présentés dans la suite de ce chapitre.

Quotidiennement en période hivernale (du 1er décembre au 31 mars) PRÉVIROUTE entre en fonctionnement à 15H00 et fournit des prévisions de la température de la surface de la chaussée sur un itinéraire pour une échéance de 24 heures avec un pas de une heure. Lors de son fonctionnement, PRÉVIROUTE fait intervenir deux modules. Le premier, qu'on appellera module local, se charge de la prévision de la température locale de la surface de la chaussée en un certain nombre de points choisis de l'itinéraire. Le deuxième module, appelé module d'extension, effectue l'extension de la prévision de température de surface de la chaussée à tout l'itinéraire.

1. LES DONNÉES D'OBSERVATION

Pour son fonctionnement, PRÉVIROUTE a besoin des mesures de terrain des stations météorologiques implantées sur l'itinéraire ainsi que des variables et paramètres locaux associés à la chaussée aux points d'implantation des stations de mesure.

1.1. Les variables atmosphériques

L'ensemble des variables atmosphériques utilisées pour le fonctionnement du modèle PRÉVIROUTE provient de stations météorologiques routières. Il s'agit du rayonnement solaire global (direct et diffus), du rayonnement atmosphérique infrarouge, de la vitesse du vent, de la température et de l'humidité de l'air et des précipitations. Toutes ces données sont échantillonnées avec un pas de temps de six minutes.

L'ensemble des variables atmosphériques mesurées par les stations météorologiques routières est présenté dans le Tableau 10. La première colonne contient le nom des variables. La seconde donne la plage de mesure des capteurs. La troisième contient la précision des capteurs fournie par le constructeur. La quatrième donne la plage de valeurs admises par les programmes de calcul. Enfin, la dernière colonne donne l'unité de mesure utilisée.

Paramètres	Plage mesurée par les capteurs	Précision des capteurs	Valeurs admises par le modèle	Unité
Direction du vent			[1,8]	1/8°
État des précipitations			[1,3]	codé
Force du vent	[0,50]		[0,50]	m/s
Hauteur de neige			[0,30]	cm
Hygrométrie de l'air	[0,100]	±2% entre 0 et 90% ±3% entre 90 et 100%	[0,100]	%
Pluviométrie			[1,10]	mm
Rayonnement atmosphérique IR			[150,500]	W/m²
Rayonnement solaire global			[0,1200]	W/m²
Température de l'air	[-20,+80]	±0.2°C (à 20°C)	[-20,+50]	°C

Tableau 10. Données d'observations : les variables atmosphériques.

Les capteurs de la température de l'air et de l'hygrométrie sont placés dans un module, installé sous un abri météo fixé sur un mât à une hauteur de 3m.

Le pluviomètre est constitué d'un transducteur à augets basculeurs, intégré sur un pied spécifique de 1 m de haut. Il est muni d'un dispositif de chauffage permettant d'obtenir la quantité de précipitation même en cas de neige ou de grêle.

Le pyranomètre mesure l'intensité du rayonnement solaire global dans une gamme spectrale allant de 0,3 µm à 2,8 µm. Il est équipé d'un système de ventilation pour éviter les dépôts de rosée et de givre.

Le pyrgéomètre mesure le rayonnement atmosphérique infrarouge dans une gamme spectrale allant de 5 µm à 50 µm.

1.2. Les mesures "chaussée"

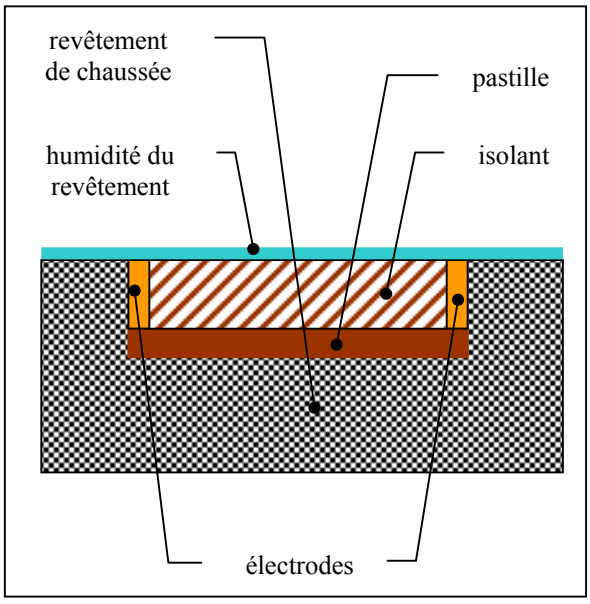
Les mesures des variables liées à la chaussée proviennent également des six stations météorologiques implantées le long de l'itinéraire. Il s'agit de la température de la surface de la chaussée, des températures du corps de la chaussée aux profondeurs de -15 cm et -30 cm, de la température de congélation et de l'état de surface de la chaussée. Toutes ces données sont échantillonnées sur les deux voies de l'autoroute avec un pas de temps de six minutes.

L'ensemble des variables, liées à la chaussée, mesurées par les stations météorologiques routières est présenté dans le Tableau 11. La première colonne contient le nom des variables. La seconde donne les plages mesurées par les capteurs. La troisième contient la précision des capteurs fournie par le constructeur. La quatrième donne la plage de valeurs admises par les programmes de calcul. Enfin, la dernière colonne donne l'unité de mesure utilisée.

Paramètres	Plage mesurée par les capteurs	Incertitude des capteurs	Valeurs admises par le modèle	Unité
État de surface	[0,4]		[0,4]	codé
Température de congélation	[-20,0]	±0,1	[-40,70]	°C
Température de corps de chaussée à –15 cm	[-40,70]	±0,1	[-40,70]	°C
Température de corps de chaussée à –30 cm	[-40,70]	±0,1	[-40,70]	°C
Température de surface	[-40,70]	±0,1	[-40,70]	°C

Tableau 11. Données d'observation : les variables de chaussée.

Les capteurs de surface sont installés sur la chaussée pour en indiquer l'état (indéterminé, sec, humide, verglacé ou salé) et la température de protection correspondant à la mesure du point de congélation de l'eau. La détermination de l'état de la surface consiste en une mesure de la conductivité électrique au niveau de la surface de la chaussée. Le capteur est constitué de deux électrodes fixées sur une pastille et séparées par un matériau isolant (cf. Figure 7). La pastille est solidaire du revêtement de la chaussée. Des seuils de conductivité sont fixés pour les différents états de la chaussée (cf. Figure 6).



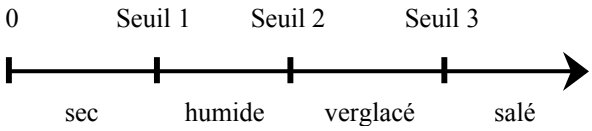


Figure 6. Seuils de détection de l'état de surface de la chaussée.

Figure 7. Schéma descriptif du capteur de l'état de la chaussée.

Les capteurs de température du corps de chaussée utilisent une sonde, implantée à une profondeur de –15 cm et de –30 cm.

L'élément sensible du capteur de température de surface de la chaussée est constitué d'une sonde platine posée sur une céramique (cf. Figure 8), le tout est collé dans un bloc de laiton qui lui-même est encastré dans le revêtement de la chaussée et fixé avec une résine. L'incertitude de la sonde platine est de 0,1°C. Compte tenu de la construction du capteur de température de surface de la chaussée, l'incertitude de l'élément sensible ne représente pas forcément l'incertitude du capteur. L'incertitude du capteur va être supérieure et sera variable en fonction du sens du flux de conduction et de l'état d'ensoleillement.

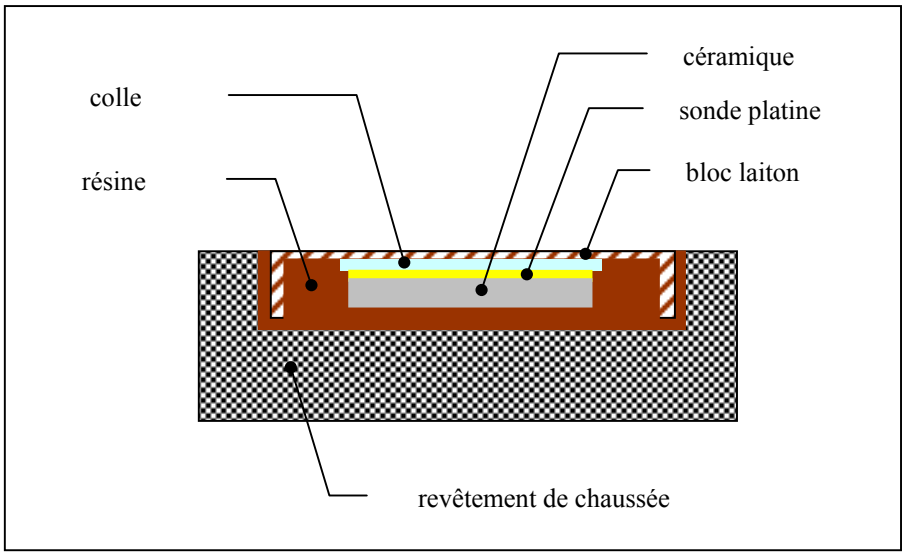


Figure 8. Schéma descriptif du capteur de la température du revêtement de la chaussée.

La Figure 9 représente l'évolution sur cinq jours des températures mesurées par une station météorologique routière. L'axe des abscisses indique l'échelle de temps du 9-02-2003 à 15H00 au 14-02-2003 à 15H00. L'axe des ordonnées donne la température mesurée en degrés Celsius. Quatre courbes sont représentées. Elles indiquent l'évolution sur la période considérée de la température de l'air T_a, de la température de surface du revêtement de la chaussée T_s et de la température du corps de la chaussée à 15 cm T_{-15} et à 30 cm T_{-30} de profondeur.

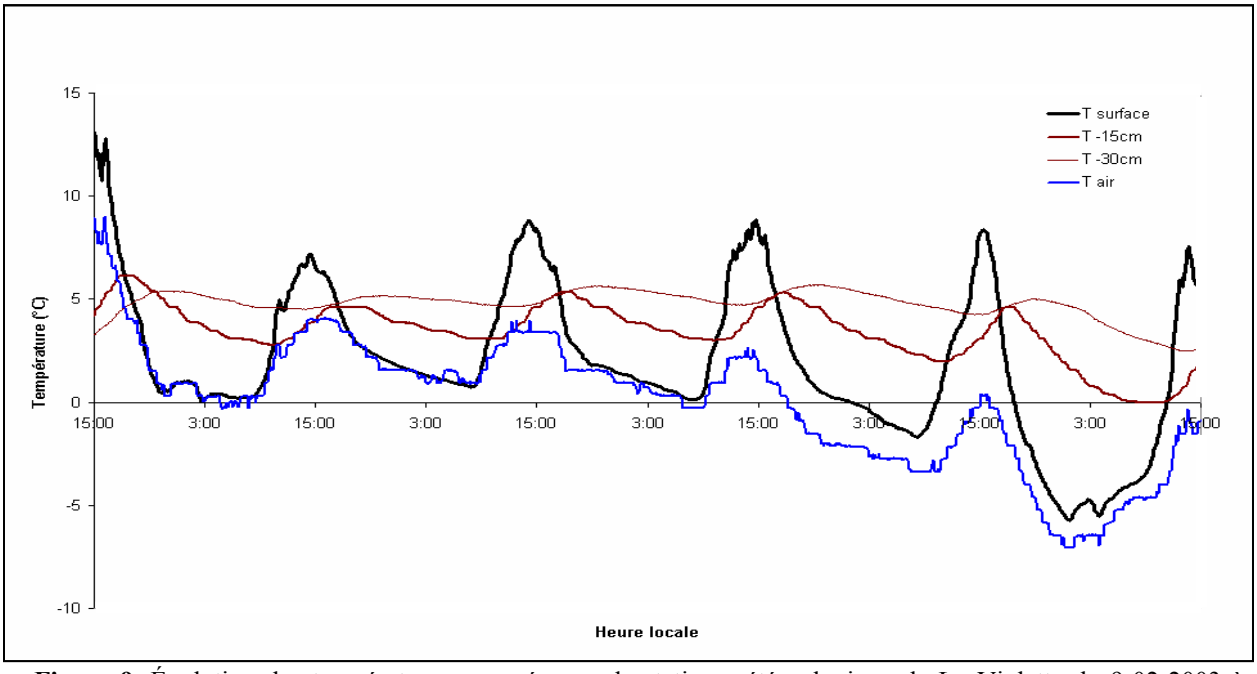


Figure 9. Évolution des températures mesurées par la station météorologique de La Violette du 9-02-2003 à 15H00 au 14-02-2003 à 15H00.

On observe sur la Figure 9 des oscillations des températures liées au cycle diurne de l'ensoleillement. Du fait de l'apport énergétique et du pouvoir d'absorption de ce rayonnement par la chaussée, la température de surface du revêtement est supérieure à la température de l'air. Les oscillations présentent pour T_s et T_a un maximum aux environs de 15H00 (heure locale) et un minimum vers 6H00 du matin. Les oscillations de T_a sur les cinq jours présentés varient entre -8°C et 6°C. La température moyenne de l'air décroît durant la période de cinq jours. Le cycle diurne se répercute également sur T_s. Les oscillations de T_s et T_a sont en phase dans le cas présent. L'amplitude de variation de T_s est plus importante que celle de T_a (entre -6°C et 13°C). On constate cependant que, bien que T_s décroît en moyenne sur la période des 5 jours, son maximum qui se situe vers les 15H00 est quasiment constant et se situe aux alentours de 8°C (à l'exception du premier jour). Les températures les plus basses sont observées en fin de nuit juste avant le lever du soleil. Les variations du cycle diurne se répercutent également sur les températures du corps de la chaussée mais avec un déphasage par rapport à T_s et T_a proportionnel à la profondeur. Les oscillations sont d'autant plus amorties que la profondeur est grande. L'amplitude

des variations à 30 cm de profondeur est inférieure à 1°C. De plus, la moyenne journalière est quasiment constante sur les cinq jours.

Compte tenu de l'évolution en phase des T_a et T_s, on peut conclure que ces deux grandeurs sont intimement liées. Néanmoins, la connaissance de T_a seule ne permet pas de prévoir l'évolution de T_s et ne permet pas d'expliquer la différence d'amplitude qui les distingue.

Il nous est permis également de déduire de ce qui a été observé sur la Figure 9 que le transfert de chaleur dans le sol est amorti et que l'amortissement est proportionnel à la profondeur. On peut donc supposer qu'il existe une profondeur à partir de laquelle on ne ressent plus les variations journalières de la température.

1.3. Les paramètres locaux de la chaussée

L'albédo, l'émissivité, la conductivité thermique, la capacité thermique massique et la masse volumique de la chaussée ont été soit mesurés lors de campagnes expérimentales, soit déterminés grâce à la littérature.

L'ensemble des paramètres locaux décrivant les caractéristiques thermiques, optiques et physiques de la chaussée est présenté dans le Tableau 12. La première colonne contient le nom des paramètres. La seconde donne la valeur retenue pour les programmes de calcul pour chacun de ces paramètres. La dernière colonne donne l'unité de mesure utilisée.

Paramètres	Valeurs admises	Unité
Albédo	15	%
Émissivité	1	-
Diffusivité thermique	$0{,}967.10^{-6}$	m^2/s
Capacité thermique massique au niveau 1	1.10^3	J/kg.K
Capacité thermique massique au niveau 2	2.10^3	J/kg.K
Masse volumique	3.10^3	kg/m^3

Tableau 12. Les paramètres de chaussée locaux.

La composition de la chaussée n'est pas verticalement uniforme. Les propriétés thermiques, dont la capacité thermique massique, sont donc différentes selon la profondeur à laquelle on se situe. Dans notre modèle, la chaussée a été représentée comme étant la succession de deux couches uniformes. La première, qui commence à la surface et a une épaisseur de 15 cm, est appelée niveau 1. La seconde a une épaisseur de 85 cm et est appelée niveau 2.

2. LES DONNÉES PRÉVISIONNELLES

Ces données contiennent la température et l'humidité de l'air, la vitesse du vent, la nébulosité, l'intensité des précipitations, la hauteur du plafond nuageux et le type de précipitations.

Ce sont des données fournies par le Centre Départemental de Météorologie (CDM) à partir de 19H00 et jusqu'à 16H00 le lendemain. Elles sont fournies avec un pas de trois heures. PRÉVIROUTE requiert, pour son fonctionnement, des données prévisionnelles débutant à 15H00 et échantillonnées avec un pas de temps de une heure. Pour ce faire, il utilise pour 15H00 non pas des données prévisionnelles du CDM, mais les données d'observation enregistrées par les stations météorologiques routières et ensuite il procède par interpolation linéaire pour compléter l'échantillonnage avec un pas de temps de une heure. Les données prévisionnelles sont fournies dans un format qui n'est pas directement exploitable par le modèle. Les programmes de calcul effectuent la conversion des données vers un format utilisable par le modèle. Toutes les grandeurs prévisionnelles fournies ne sont pas utilisées par le modèle. Les valeurs non utilisées sont données à titre indicatif au gestionnaire autoroutier.

L'ensemble des prévisions météorologiques fournies par le CDM est présenté dans le Tableau 13. La première colonne contient le nom des variables. Les deux colonnes suivantes donnent les unités et la plage des valeurs admises par le format Météo France. Les deux colonnes suivantes donnent les unités et les plages des valeurs générées par les programmes de calcul et admises par le modèle. Enfin, la dernière

colonne renseigne sur l'utilité ou non des paramètres dans le calcul de la prévision de la température de surface du revêtement de la chaussée.

	Format fourni par Météo-France		Format de fonctionnement du modèle		
Paramètres	**Unité**	**Valeurs admises**	**Unité**	**Valeurs générées**	**Utilisation par le modèle**
Température	°C	[-40,50]	°C	[-40,50]	Oui
Humidité	%	[0,100]	%	[0,100]	Oui
Vent	m/s	[0,50]	m/s	[0,50]	Oui
Nébulosité	1/8e	[0,8]	1/10e	[0,10]	Oui
Intensité des précipitations	codé	0 1 (< 3mm) 2 (3 à 8mm) 3 (> 8mm)	mm/h	0 2 5 10	Non
Plafond nuageux	codé	0 2 (<2500m) 3 (>2500m) 5 (brouillard)	m	-10 2000 3000 0	Non
Occurrence de pluie	codé	O (Oui) N (Non)	codé	1 0	Non
Occurrence de brouillard	codé	O (Oui) N (Non)	codé	1 0	Non
Occurrence de neige	codé	O (Oui) N (Non)	codé	1 0	Non

Tableau 13. Données prévisionnelles à 24 heures d'échéance fournies par Météo-France quotidiennement à 15H00.

3. LES ÉTAPES DU CALCUL

Le système est utilisé quotidiennement par le gestionnaire autoroutier durant la période hivernale, du 1er décembre au 31 mars. Le système est activé à 15H00 et effectue la prévision de la température de surface du revêtement de la chaussée sur un itinéraire pour une échéance de 24 heures avec un pas de temps de une heure.

La prévision de la température de surface sur un itinéraire est calculée en deux étapes.

Dans un premier temps, le système calcule la température de surface locale en des points particuliers de l'autoroute équipés de stations d'observation. Ce calcul se fait grâce à un modèle physique fondé sur le transfert de chaleur dans la chaussée et sur le bilan énergétique de la surface. Pour fonctionner, le modèle a besoin d'être alimenté par des données d'observation issues des stations météorologiques implantées le long de l'autoroute et de prévisions atmosphériques provenant de Météo-France.

Dans un second temps, le système effectue une extension de la prévision de la température de surface sur l'ensemble de l'itinéraire étudié. Pour ce faire, le système a besoin de données sur l'itinéraire issues du système THERMOROUTE dont on reparlera ultérieurement.

L'ensemble PRÉVIROUTE peut être décomposé en quatre grandes parties :

- Acquisition de données
- Détermination des conditions initiales
- Prévision de la température de surface locale
- Extension sur un itinéraire et affichage.

3.1. Acquisition des données

À titre d'exemple la section de l'autoroute A75 qui traverse le Cantal est équipée de six stations de mesures des paramètres météorologiques et de chaussée. Ces stations permettent de surveiller l'axe autoroutier et de fournir les observations locales pour la prévision de la température de surface. Chaque station fait une acquisition toutes les six minutes des paramètres du Tableau 10 et du Tableau 11 pages 42 et 44.

Ces données sont collectées via le Réseau d'Appel d'Urgence (RAU) de l'autoroute.

Un système informatique est installé au Centre d'Exploitation et d'Intervention (CEI) de Saint-Flour. Il assure les fonctions d'interrogation des stations, la gestion des

transmissions de données, le prétraitement des données et le calcul de prévisions de la température de surface ainsi que son affichage.

3.2. Détermination des conditions initiales

Le premier module fonctionne en plusieurs étapes. Dans un premier temps, il reçoit les données nécessaires à son fonctionnement puis il les prépare en éliminant les données aberrantes et en interpolant les données manquantes. Il calcule ainsi un profil vertical de la température du corps de chaussée pour 15H00 qui servira de donnée initiale au programme de calcul de la température de surface.

3.3. Prévision de la température de surface locale

Dans un deuxième temps, un second module calcule le bilan d'énergie à la surface de la chaussée avec un pas de temps de une heure et en utilisant les données prévisionnelles fournies par le CDM. Puis, pour finir, il effectue la prévision de la température de surface de la chaussée.

3.4. Extension à l'itinéraire et affichage

Avant l'affichage des températures de la surface de la chaussée pour le gestionnaire, PRÉVIROUTE effectue une dernière étape qui est l'extension à tout l'itinéraire. Cette extension s'effectue grâce aux données recueillies par THERMOROUTE et aux prévisions locales.

THERMOROUTE est un véhicule équipé de capteurs embarqués qui permettent de mesurer la température de surface du revêtement, ainsi que la température et l'humidité de l'air. Les enregistrements ainsi réalisés servent d'une part à déterminer l'empreinte thermique d'un itinéraire (zones froides,…) pour l'implantation optimale des stations de mesures le long de l'autoroute et d'autre part, ils sont utilisés en situation opérationnelle pour interpoler à tout l'itinéraire la prévision de la température de surface effectuée à chaque station.

3.5. Conclusion

La Figure 10 résume les principales étapes du déroulement de PRÉVIROUTE. Par la suite, ce document ne traitera que les étapes II et III, sièges du modèle physique de prévision de la température de surface du revêtement de la chaussée.

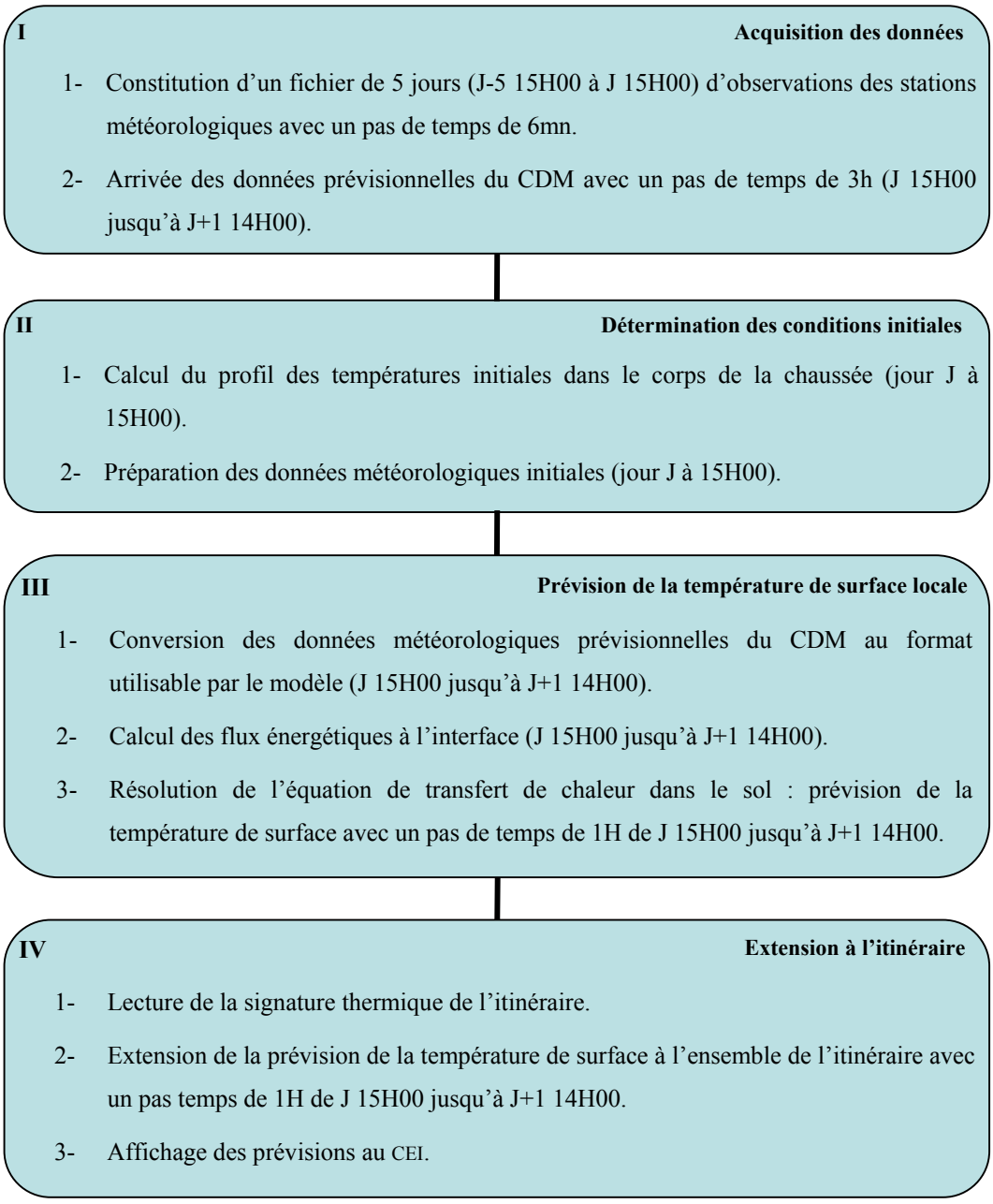


Figure 10. Représentation schématique des étapes de fonctionnement du système PRÉVIROUTE.

4. DESCRIPTION DU MODÈLE

La prévision de la température de surface du revêtement de la chaussée consiste en la résolution d'une équation pronostique qui sera introduite au paragraphe 4.2.a. Cette résolution exige des conditions aux limites qui seront également présentées au paragraphe 4.2.a. et des conditions initiales qui sont présentées dans le paragraphe 4.1.

4.1. Détermination des conditions initiales

La première tâche de ce module est le traitement des données des cinq jours précédents la prévision. Ces données sont issues des stations météorologiques à une fréquence d'une mesure toutes les 6 minutes. Le programme commence par éliminer toutes les valeurs aberrantes en comparant la valeur ponctuelle à la moyenne glissante de 5 mesures précédentes. Une fois cette vérification réalisée, le programme calcule des moyennes horaires avec les données non aberrantes. Ensuite, le programme interpole ou extrapole de façon linéaire pour les moyennes manquantes. S'il manque plus de 24 moyennes sur les 2 derniers jours, le programme ne peut effectuer la prévision de la température de surface.

Une fois les données traitées, les conditions initiales peuvent être déterminées. Les conditions initiales requises par le modèle sont les suivantes :

- Connaissance du profil de la température dans le corps de la chaussée à 15H00 (heure de démarrage du programme de calcul).

- Connaissance des données météorologiques telles que : la température de l'air, la vitesse du vent, l'humidité relative, le rayonnement solaire global et le rayonnent atmosphérique infrarouge.

Le programme commence par calculer les coefficients de Fourier au $120^{ème}$ ordre de la température de surface. Ensuite, il calcule le profil de température dans le sol, grâce à la loi de la conduction dans un mur semi-infini avec la température de

surface imposée et une diffusivité constante dans tout le sol (voir ANNEXE page 151). Une fois le profil calculé, le programme corrige ce profil en recalant les températures calculées à -15 cm et -30 cm avec celles mesurées à 15H00 puis en linéarisant cette correction entre les trois niveaux de mesure (surface, -15 cm et -30 cm).

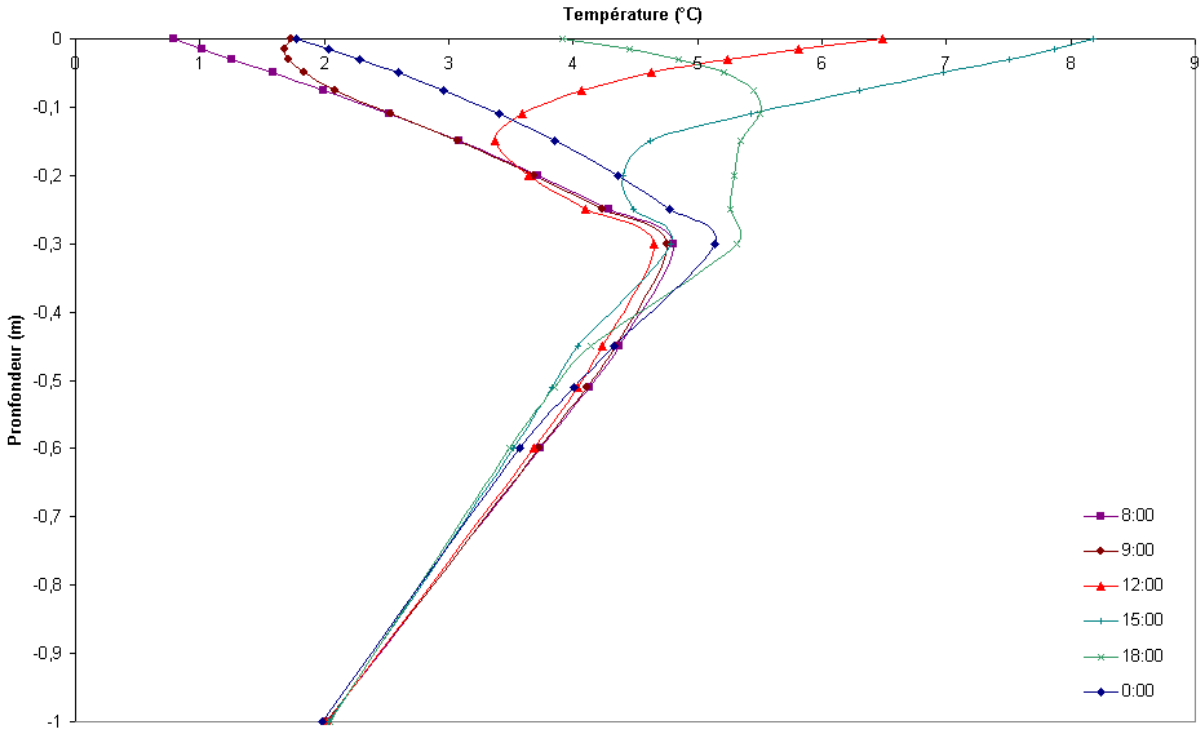


Figure 11. Profil de température dans le corps de la chaussée à différentes heures de la journée. Station de La Violette 14-02-2003.

La Figure 11 présente l'évolution du profil de température dans le corps de la chaussée à la station de La Violette durant la journée du 14-02-2003. Les profils de températures présentés sont des profils calculés à partir des coefficients de Fourier et recalés par rapport aux mesures des températures T_{-15} et T_{-30}. L'axe des abscisses indique les températures. L'axe des ordonnées indique la profondeur du niveau considéré dans la chaussée exprimée en mètre. Chacune des courbes représente une heure de la journée.

La Figure 11 montre que plus la profondeur est grande, plus l'amplitude de la variation de la température sur une journée est petite. En fait, la valeur de la condition à l'infini a peu d'importance pour une prévision à 24 heures car les plus grands changements de températures dans le sol se trouvent entre 0 et -30 cm.

Les données initiales sont les mesures des stations météorologiques routières à 15H00 pour certains des paramètres cités au paragraphe 1 de ce chapitre pages 42 et 44, c'est-à-dire : la température de surface du revêtement de la chaussée, la température de l'air, la vitesse du vent, l'humidité relative, le rayonnement solaire global et le rayonnement atmosphérique infrarouge.

4.2. Prévision de la température de surface

Ce module est le cœur du système PRÉVIROUTE. Il calcule les prévisions de la température de surface.

Cette partie du programme consiste, dans un premier temps, à préparer les prévisions en effectuant la lecture des prévisions de Météo-France, à les interpoler, et à effectuer la prévision des rayonnements solaire et atmosphérique (§4.2.b).

La deuxième étape est la résolution de l'équation de la chaleur discrétisée dans un mur semi-infini. Le modèle physique est expliqué dans le paragraphe 4.2.c.

4.2.a. Les équations du modèle

Le modèle physique est fondé sur la prévision de l'évolution du profil de la température dans le temps dans un matériau soumis à des forçages radiatifs et thermiques. Nous devrons disposer pour cela de l'équation de la conduction de chaleur dans un matériau, des paramètres physiques caractérisant le matériau ainsi que d'une paramétrisation de l'ensemble des forçages radiatifs et thermiques.

La prévision de la température de la surface revient à résoudre une équation pronostique dans la chaussée avec deux conditions aux limites et une condition initiale.

Équation pronostique :

Équation 19

$$c_p(z)\rho(z)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(z)\frac{\partial T}{\partial z}\right)$$

Conditions aux limites :

Équation 20 (a) et (b)

$$\begin{cases} (1-A)R_g + R_{at} - R_{surf} - H - LE - K = 0 \\ \left(\frac{\partial T_{sol}}{\partial t}\right)_{z=z_{fond}} = 0 \end{cases}$$

Condition initiale : le profil de la température dans la chaussée au moment t=0, soit à 15H00 tous les jours.

avec :

$c_p(z)$: capacité thermique massique de la chaussée à la profondeur z (J/kg.K).

$\rho(z)$: masse volumique de la chaussée à la profondeur z (kg/m^3).

$\lambda(z)$: conductivité thermique à la profondeur z (W/m.K).

$k(z)$: diffusivité thermique du sol à la profondeur z (m^2/s). Cette valeur est déterminée expérimentalement : $k(z) = \frac{\lambda(z)}{c_p(z) \cdot \rho(z)}$

L'Équation 19 traduit la conduction de chaleur unidirectionnelle suivant l'axe *z*.

L'Équation 20 (a) exprime le bilan énergétique à la surface de la chaussée (*cf.* CHAPITRE 1).

L'Équation 20 (b) traduit l'absence de flux de chaleur en profondeur : la température est considérée constante à partir d'une certaine profondeur. Cette profondeur est prise à –1 m en dessous de la surface de la chaussée [Pérus et al., 1987]. La Figure 12 issue des travaux de Pérus et al. (1987) montre l'évolution de la température sur 48 heures à différentes profondeurs. L'axe des abscisses représente l'échelle de temps pour 48 heures et l'axe des ordonnées représente les températures. Chacune des courbes représente l'évolution de la température à une profondeur donnée de la chaussée sur les 48 heures. Dans le cas de l'autoroute A72, les mesures ont été réalisées aux profondeurs de 6,7 cm, 15,5 cm et 60 cm.

Cette figure montre que les oscillations diurnes de la température sont répercutées par la chaussée mais avec un déphasage et un amortissement proportionnels à la profondeur, ce qui a déjà été observé pour la Figure 9 page 46. Il est notable que pour la profondeur de 60 cm les oscillations mesurées sont si fortement amorties que l'on pourrait considérer la température du corps de chaussée à cette profondeur comme constante sur les deux jours étudiés. Il semble évident que pour une profondeur plus grande cette hypothèse reste vraie.

Ceci justifie donc l'Équation 20 (b) qui indique que la température à la profondeur de 1 m est constante sur une période de l'ordre de 24 heures.

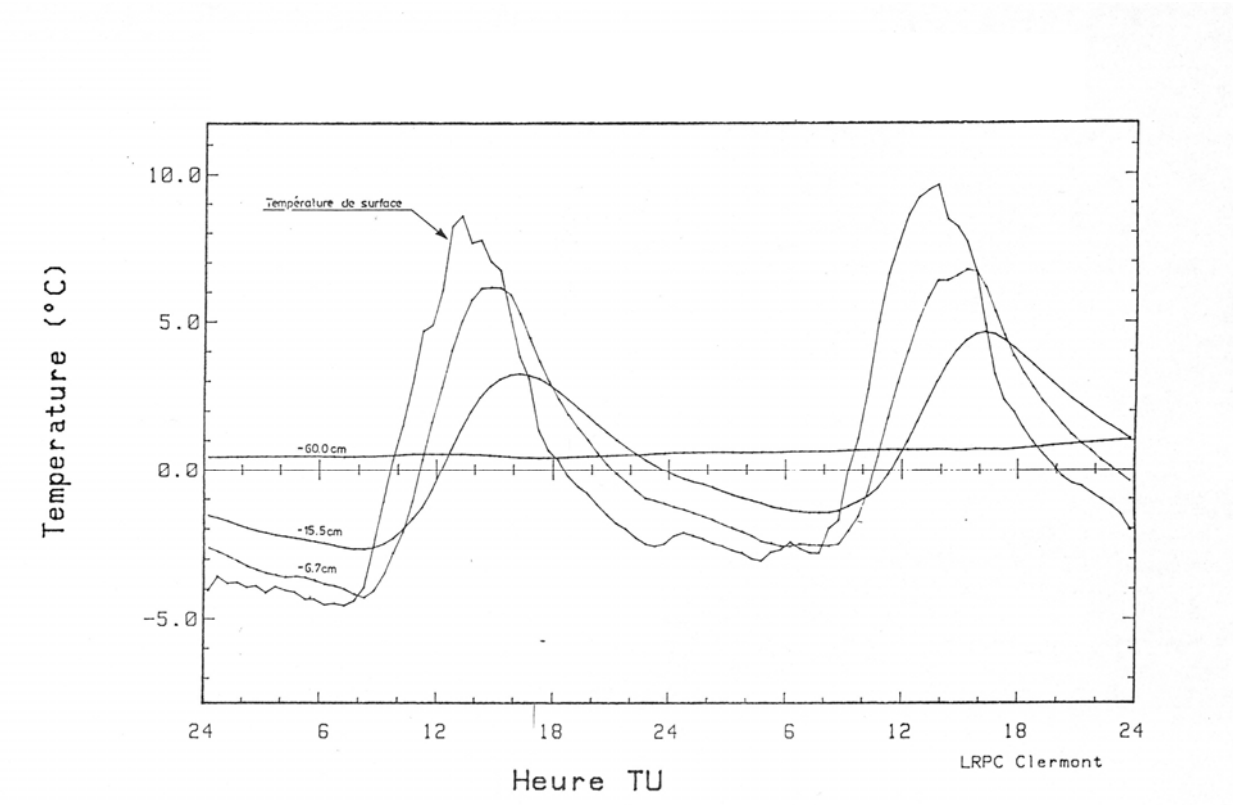


Figure 12. Profil thermique vertical en fonction de l'heure sur l'autoroute A72 du 31-01-1987 00H00 au 02-02-1987 00H00.

4.2.b. Les modélisations des échanges énergétiques

Les échanges énergétiques à l'interface chaussée-atmosphère ont été décrits au CHAPITRE 1. Ces échanges concernent le rayonnement solaire global R_g incident à la surface de la chaussée, le rayonnement atmosphérique infrarouge R_{at}, le rayonnement de surface infrarouge R_{surf} du revêtement de la chaussée, les flux turbulents de chaleur sensible H et de chaleur latente LE et la conduction thermique dans le corps de la chaussée K. Les expressions de R_{surf}, K, LE et H ont été modélisées dans le CHAPITRE 1. Ces modélisations permettent d'obtenir :

- Le rayonnement de surface infrarouge

On peut appliquer à la chaussée la loi de Stefan-Boltzmann pour exprimer le rayonnement émis par la surface de la chaussée qui se trouve à la température T_s.

Équation 21 $$R_{surf}(T) = \varepsilon.\sigma.T_s^4$$

où σ est la constante de Stefan-Boltzmann et ε l'émissivité du sol. Comme la surface est assimilée à un corps noir, l'émissivité ε est égale à 1. En fait pour la chaussée on a : 0.95< ε <1.00 pour le sol [Mermoud, 2001].

- **Le flux de conduction de chaleur dans le sol**

La chaussée est assimilée à un milieu semi-infini horizontalement homogène. Nous considérons ainsi uniquement la conduction verticale de la chaleur. Selon cette hypothèse, on peut modéliser la conduction de chaleur dans ce milieu par la loi de Fourier (cf. CHAPITRE 1). La densité de flux de conduction au niveau de la surface, *K,* s'exprime alors par :

Équation 22 $$K = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{z=0}$$

où λ est la conductivité thermique qui varie avec la profondeur et au cours du temps (lors de pénétrations d'eau dans le revêtement, …). Elle dépend de la conductivité des particules du sol et de sa porosité. Le flux *K* de conduction est obtenu à partir du profil vertical de température dans le sol.

- **Le flux de chaleur sensible**

Équation 23 $$H = C_p.\rho_a.C_d.u_a.(T_s - T_a)$$

- **Le flux de chaleur latente**

Équation 24 $$LE = L.\rho_a.C_d.u_a.(q_s - q_a)$$

- Le rayonnement solaire global

Le modèle de prévision de rayonnement solaire suit le schéma défini par Houghton (1954). En l'absence de nuage, le rayonnement R_g reçu par le sol est la somme du rayonnement solaire direct R_{dir} et diffus R_{diff}. Le rayonnement solaire direct est le résidu du rayonnement extraterrestre après atténuation par absorption et diffusion dans l'atmosphère. Le rayonnement diffus arrivant au sol est la moitié du rayonnement total diffusé.

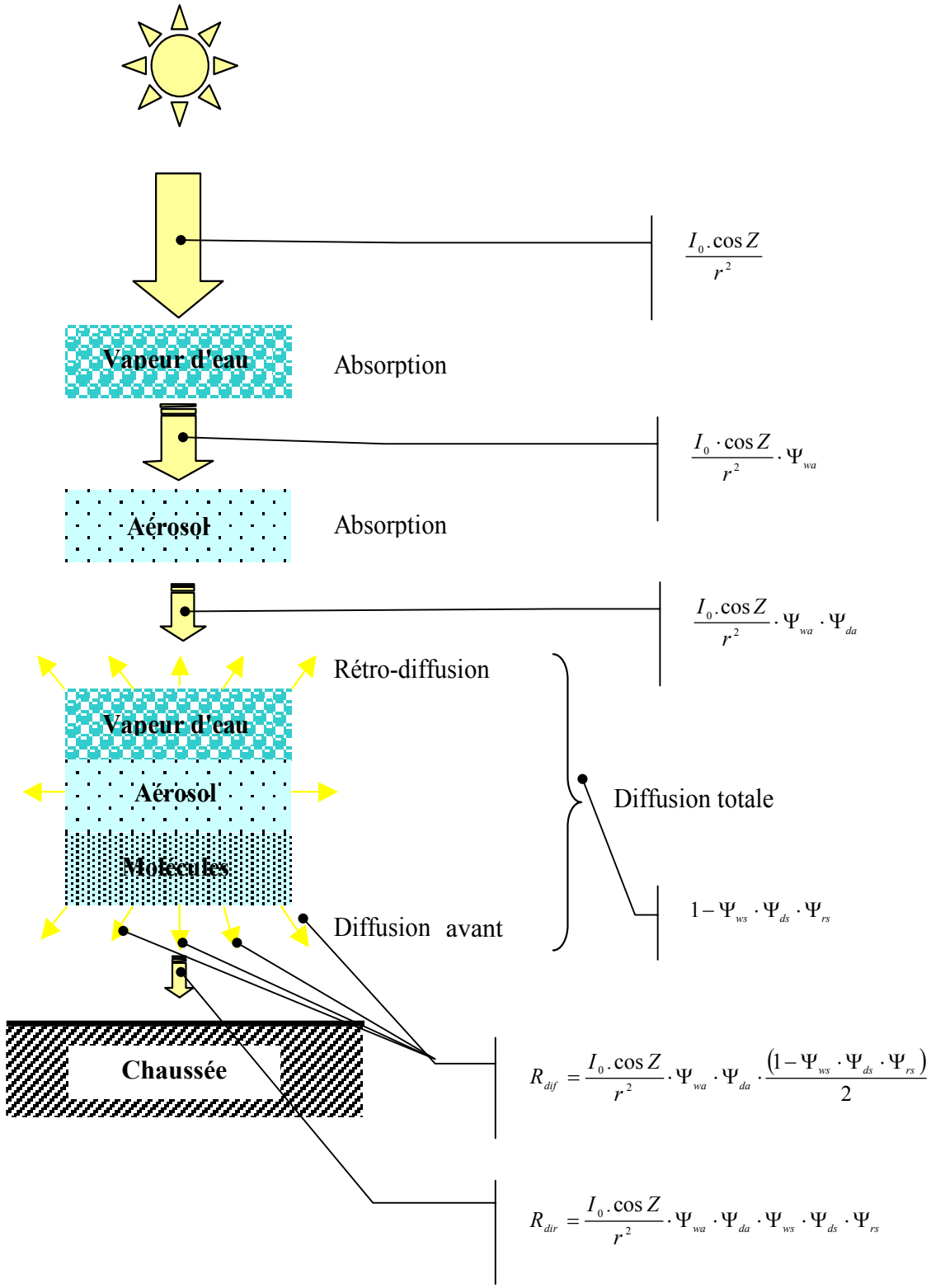


Figure 13. Représentation schématique du parcours du rayonnement solaire dans l'atmosphère.

Équation 25 $$R_g = R_{dir} + R_{diff}$$

Le rayonnement solaire global incident à la surface de la Terre est fonction de l'état de l'atmosphère dont on ne considèrera ici que la troposphère (on néglige donc l'absorption par l'ozone). On considère donc que l'atmosphère est composée de vapeur d'eau, de particules en suspension et de molécules gazeuses (78,09% d'azote, 20,95% d'oxygène, 0,93% d'azote…).

Dans le modèle de Houghton (1954), les phénomènes de transfert de rayonnement visible sont schématisés comme suit :

- L'absorption a lieu avant la diffusion, ceci pour essayer de compenser les erreurs dues au fait que l'absorption du rayonnement diffus est inconnue, bien qu'elle soit négligeable.
- Les particules atmosphériques absorbent autant qu'elles diffusent.
- Les quantités de rayonnement diffusées vers l'avant ou vers l'arrière sont égales pour tous les processus de diffusion (c'est-à-dire que seule la moitié du rayonnement diffusé arrive au sol).

Les flux des rayonnements solaires monochromatiques direct et diffus s'écrivent alors :

Équation 26 $$I_{Sdir} = I_0 \frac{\cos Z}{r^2} \cdot \Psi^*_{wa} \cdot \Psi^*_{da} \cdot \Psi^*_{ws} \cdot \Psi^*_{ds} \cdot \Psi^*_{rs}$$

Équation 27 $$I_{Sdiff} = I_0 \frac{\cos Z}{r^2} \cdot \Psi^*_{wa} \cdot \Psi^*_{da} \cdot \frac{\left(1 - \Psi^*_{ws} \cdot \Psi^*_{ds} \cdot \Psi^*_{rs}\right)}{2}$$

Les coefficients Ψ^* sont les coefficients de transmission atmosphérique monochromatique. En intégrant sur tout le spectre, nous obtenons Ψ les coefficients de transmission atmosphérique sur tout le spectre.

Le flux de rayonnement solaire monochromatique global est la somme de ces deux composantes, directe et diffuse :

Équation 28
$$I_{G\lambda} = I_{Sdir} + I_{Sdiff} = I_0 \frac{\cos Z}{r^2} \cdot \Psi^*_{wa} \cdot \Psi^*_{da} \cdot \frac{\left(1 + \Psi^*_{ws} \cdot \Psi^*_{ds} \cdot \Psi^*_{rs}\right)}{2}$$

Pour exprimer le rayonnement solaire global, on intègre le flux de rayonnement monochromatique sur tout le spectre :

Équation 29
$$R_g = \int_0^\infty I_\lambda d\lambda = I_0 \frac{\cos Z}{r^2} \cdot \Psi_{wa} \cdot \Psi_{da} \cdot \frac{\left(1 + \Psi_{ws} \cdot \Psi_{ds} \cdot \Psi_{rs}\right)}{2}$$

I_0 est la constante solaire représentant le flux de rayonnement solaire à l'entrée de l'atmosphère terrestre. Bien que cette grandeur ne soit pas strictement constante, il est communément admis que I_0=1367 W/m².

$1/r^2$ est un facteur de correction associé à la variation annuelle de la distance Terre-Soleil. Il est défini par :

Équation 30
$$\frac{1}{r^2} \approx 1 + 0{,}033 \cdot \cos\frac{2\pi \cdot n}{360}$$

où n est le numéro du jour dans le calendrier Julien.

Ce facteur est compris entre 1 et 1,033.

Les valeurs des coefficients de transmission atmosphérique Ψ sont des fonctions de la hauteur du soleil Z, du chemin optique des rayons du soleil ramené à l'épaisseur de l'atmosphère homogène standard m et de l'épaisseur d'eau condensable w.

Avant de présenter les paramétrisations des coefficients Ψ, les trois variables Z, m et w sont décrites :

- Hauteur du soleil Z ou angle solaire zénithal. On utilise pour décrire Z la formulation astronomique de Perrin de Brichambaut (1963) :

Équation 31
$$\cos Z = \sin\chi \cdot \sin\delta + \cos\chi \cdot \cos\delta \cdot \cos AH$$

avec δ la déclinaison du soleil, χ la latitude et AH l'angle horaire du soleil.

- *m* : chemin optique des rayons du soleil ramené à l'épaisseur de l'atmosphère homogène standard (T=15°C, P=1013 hPa, épaisseur réduite 8430 m). C'est la mesure de la longueur du trajet parcouru dans l'atmosphère par les rayons lumineux provenant du soleil rapportée à la longueur du trajet vertical. Formulation de Kasten (1966) :

Équation 32
$$m = \frac{\left(1 - 2{,}26 \cdot 10^{-4} h\right)}{\cos Z + 0{,}15(93{,}885 - Z)^{-1{,}253}} \quad ;$$

avec *h* l'altitude en mètres et *Z* la hauteur du soleil.

- Contenu intégré en vapeur d'eau *w* : c'est la masse totale de vapeur d'eau contenue dans une colonne atmosphérique de section unité située à la verticale d'un point. *w* s'exprime en kg/m² ou g/cm².

On peut également définir la quantité d'eau précipitable *EP* comme étant la hauteur d'eau liquide qui serait obtenue si toute la vapeur d'eau contenue dans la colonne atmosphérique de section unité était condensée et précipitée au sol. *EP* s'exprime en mm ou cm.

Compte tenu que ρ_{eau} =1000 kg/m^3 on a : *EP*(cm) ≡ *w*(g/cm²) ou *EP*(mm) ≡ *w*(kg/m²)

Humidité spécifique *q* : c'est le rapport de la masse de vapeur d'eau sur la masse de l'air humide dans un volume élémentaire. *q* s'exprime en g/kg.

L'humidité relative *hr* s'exprime en pourcentage.

La détermination de *w* fait appel à la paramétrisation de Reitan (1963) utilisant la température du point de rosée T_d :

Équation 33
$$\log w = a + bT_d$$

Avec *a*=0,08 et *b*=0,072.

Tomassi en 1981 a confirmé que la relation est vraie mais il a montré que *a* varie avec le lieu, l'échelle de temps et les conditions météorologiques. Toutefois cette variabilité est faible et ne prête pas à conséquences quant à la prévision de T_s.

T_d n'est pas mesurée, mais on peut accéder à sa valeur en connaissant l'humidité relative de l'air *hr* et la température T_a de l'air fournies par le CDM dans le cadre des données prévisionnelles :

Équation 34

$$T_d = \frac{17{,}26 \cdot T_a (T_a + 237{,}3)\ln(hr/100)}{17{,}26 - \frac{(T_a + 237{,}3)\cdot \ln(hr/100)}{237{,}6}}$$

Transmission après absorption par la vapeur d'eau Ψ_{wa} : nous faisons toujours l'hypothèse que l'absorption précède tout autre processus d'atténuation du rayonnement solaire.

Équation 35 $\Psi_{wa}+a_{wa}(w)=1$

avec *w* la quantité de vapeur d'eau précipitable.

L'expression de l'absorption $a_{wa}(w)$ est donnée par une fonction puissance empirique [Mc Donald, 1960] :

Équation 36 $a_{wa}(w)=0{,}077.(wm)^{0,3}$

d'où l'expression de la transmission après absorption par la vapeur d'eau :

Équation 37 $\Psi_{wa}=1-0{,}077.(wm)^{0,3}$

Transmission après diffusion par la vapeur d'eau Ψ_{ws} : formulation de Houghton (1954) :

Équation 38 $\Psi_{ws}=1-0{,}0025.(wm)$

Transmission après la diffusion Rayleigh Ψ_{rs} : Formulation de Houghton (1954) :

Équation 39 $\Psi_{rs}=0,972-0,0862.m+0,00933.m^2+0,00095.m^3+0,0000437.m^4$

Transmission après absorption et diffusion par les aérosols Ψ_D : on suppose que les aérosols absorbent autant qu'ils diffusent ($\Psi_D = \Psi_{ds} . \Psi_{da}$). On utilise la loi de Bouguer :

Équation 40 $$\Psi_D = e^{(-\tau_{da}+\tau_{ds})\cdot m} = \Psi_{ds} \cdot \Psi_{da}$$

avec τ_{da} l'épaisseur optique fictive d'absorption et τ_{ds} l'épaisseur optique fictive de diffusion

Équation 41 $$\tau_D = \tau_{da}+\tau_{ds}$$

On utilise la paramétrisation de Houghton :

Équation 42 $$\Psi_D = P^m$$

P : paramètre de Houghton ajustable.

En l'absence de nuages, le rayonnement solaire global peut donc être calculé en utilisant les paramétrisations précédentes qui ne dépendent que de la hauteur du soleil Z, de l'altitude h de la station, de l'humidité relative hr et de la température T_a de l'air prévues et des paramètres P de Houghton et a et b de Reitan donnés par la littérature.

Le rayonnement atmosphérique infrarouge

Le sol reçoit un flux de rayonnement infrarouge thermique de grande longueur d'onde provenant de l'atmosphère. Pour un ciel clair, la diffusion des grandes longueurs d'onde est négligeable en comparaison de l'absorption et de l'émission de

rayonnement électromagnétique [Liou, 1980]. Donc, le rayonnement arrivant à la surface du sol est essentiellement dû à l'émission par la vapeur d'eau, par le gaz carbonique, par l'ozone et par les nuages. En effet, ces entités absorbent une partie du rayonnement et le réémettent à la même longueur d'onde. En fait, ils émettent une fraction de ce qu'émettrait un corps noir à la même température T_a.

Étant donné que l'émission de la vapeur d'eau est prépondérante, on pourrait calculer le rayonnement atmosphérique à partir des profils verticaux de température et d'humidité de l'air. Mais comme la plus forte contribution est due aux basses couches atmosphériques, on donne diverses formules empiriques pour estimer le rayonnement atmosphérique infrarouge thermique à partir des mesures de la température de l'air T_a et de la pression de vapeur d'eau E_a sous abri à deux mètres du sol.

Rayonnement atmosphérique par temps clair

Dans notre modèle, le rayonnement atmosphérique est décrit par la Formulation de Brunt (1932) :

Équation 43
$$R_{at} = \left(e + f \cdot \sqrt{E_a}\right) \cdot \sigma \cdot T_a^4$$

où e=0,39 et f=0.077 sont des constantes.

Rayonnement atmosphérique par temps nuageux

R_{at} a été calculé selon la paramétrisation de Brunt (1932) et corroboré par les résultats de tests effectués par le Laboratoire de Météorologie Physique [Albignat, 1978] :

Équation 44
$$R_{at} = \left(e + f\sqrt{E_a}\right) \cdot \left(1 + cn\right) \cdot \sigma \cdot T_a^4$$

où c et n sont respectivement une constante numérique et la nébulosité (exprimée en décimale). Cette formulation tient compte de l'effet des nuages, qui contribue à l'augmentation du rayonnement atmosphérique.

4.2.c. Résolution de l'équation

L'Équation 19 page 56 de transfert de chaleur par conduction dans le sol est discrétisée suivant le schéma de Crank-Nicholson, inconditionnellement stable et précis au second ordre. On résout le système tri-diagonal qui en résulte et obtient ainsi un profil vertical prévisionnel des températures dans la chaussée.

On utilise une grille d'intégration à 14 niveaux distribués dans le sol selon une loi croissant exponentiellement avec la profondeur.

Modèle à N niveaux : [Paumier et al., 1989]

Le flux de chaleur Φ (en W) par conduction à travers un milieu d'épaisseur Δz et de surface S (Figure 14) s'écrit [Eyglunent, 1997] :

Équation 45
$$\Phi = -\frac{\lambda}{\Delta z} \cdot S \cdot (T_2 - T_1)$$

La densité de flux φ s'écrit alors :

Équation 46
$$\varphi = \frac{\Phi}{S} = -\frac{\lambda}{\Delta z} \cdot (T_2 - T_1)$$

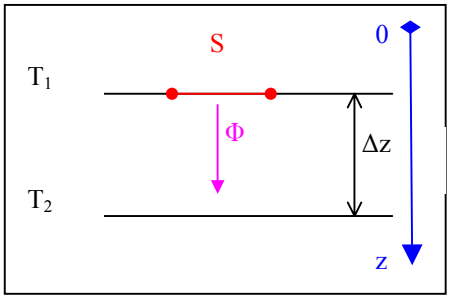


Figure 14. Flux à travers un milieu d'épaisseur Δz.

On obtient alors pour une couche élémentaire, la loi de Fourier qui exprime la proportionnalité de l'effet (transfert de chaleur) à la cause (gradient de température) :

Équation 47
$$\varphi = -\lambda_i \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_i$$

La variation du flux et de sa densité dans le temps s'écrivent :

Équation 48
$$\Delta\Phi = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = mc_p \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

Équation 49

$$\Delta\varphi = \rho c_p \Delta z \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

Le pas de temps du modèle a été fixé à 5 minutes.

La chaussée est considérée comme un milieu où se superposent N = 13 couches (Figure 15 (a)) et pour lesquelles seront appliquées les expressions de variation du flux et de sa densité dans le temps exprimées ci-dessus.

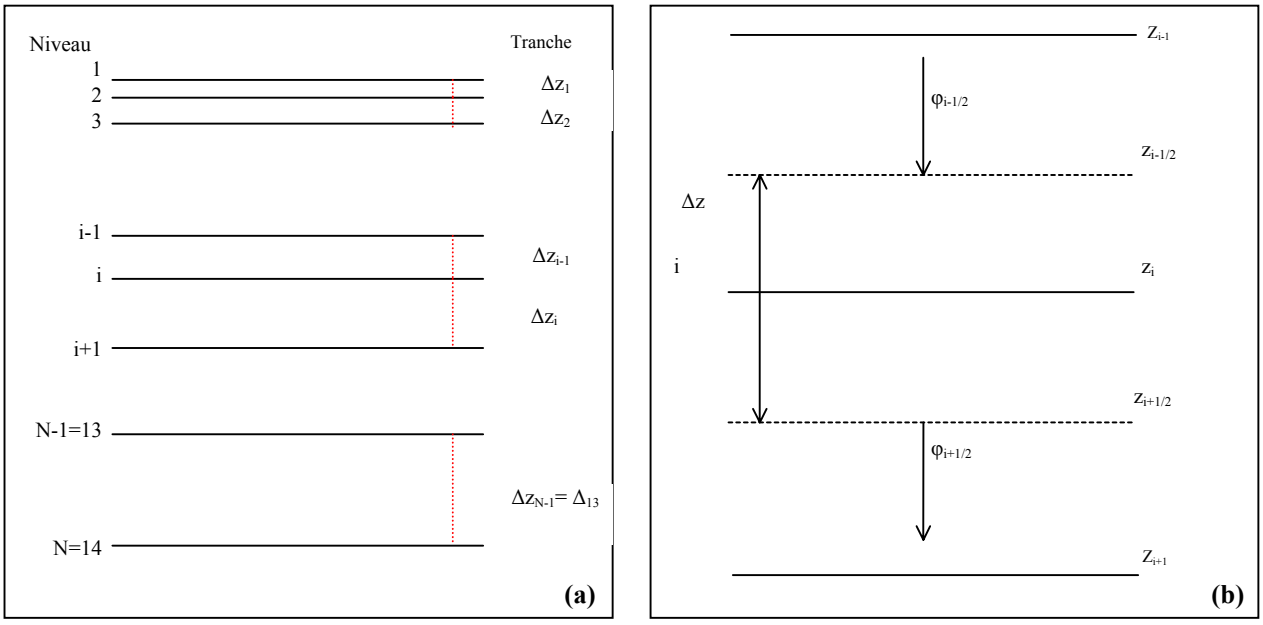


Figure 15. Décomposition de la chaussée en 14 niveaux (a), bilan des flux au niveau *i* (b).

Calculons le bilan local autour du niveau z_i pour une tranche d'épaisseur $\frac{\Delta z_{i-1}}{2} + \frac{\Delta z_i}{2}$ comprise entre deux plans d'abscisse $z_{i-1/2}$ et $z_{i+1/2}$ (Figure 15(b)).

Soit φ_i la densité superficielle de flux traversant le plan d'abscisse z_i.

Équation 50 (a) et (b)

$$\varphi_{i-\frac{1}{2}} = -\lambda_{i-\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{i-\frac{1}{2}}$$

$$\varphi_{i+\frac{1}{2}} = -\lambda_{i+\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{i+\frac{1}{2}}$$

D'après l'Équation 49 le bilan de la tranche s'écrit :

Équation 51

$$\rho \cdot \Delta z \cdot c_i \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_i = \varphi_{i-1/2} - \varphi_{i+1/2}$$

avec $\Delta z = \frac{\Delta z_{i-1} + \Delta z_i}{2}$

En combinant l'Équation 51 et les Équation 50 (a) et (b) le bilan de la tranche s'écrit alors :

Équation 52

$$\rho c_i \frac{\Delta z_{i-1} + \Delta z_i}{2}\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_i = -\lambda_{i-\frac{1}{2}}\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{i-\frac{1}{2}} + \lambda_{i+\frac{1}{2}}\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{i+\frac{1}{2}}$$

Les λ_i sont pondérés de la façon suivante :

Équation 53

$$\lambda_{i\pm\frac{1}{2}} = \frac{\lambda_i + \lambda_{i\pm1}}{2}$$

En fait cette formule n'est utilisée qu'une seule fois puisque nous n'avons que deux valeurs différentes de λ ; la valeur de λ change pour le niveau 8 situé à la profondeur de -15 cm.

Le bilan de la tranche (Équation 52) entre les instants *n* et *n+1* s'écrit sous sa forme implicite :

Équation 54

$$\rho c_i \frac{\Delta z_{i-1} + \Delta z_i}{2}\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = -\lambda_{i-\frac{1}{2}}\frac{T_i^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}}{\Delta z_{i-1}} + \lambda_{i+\frac{1}{2}}\frac{T_{i+1}^{n+1} - T_i^{n+1}}{\Delta z_i}$$

Qui donne :

Équation 55

$$T_i^n = -\frac{2\Delta t\lambda_{i-1/2}}{\rho c_i\left(\Delta z_{i-1} + \Delta z_i\right)\Delta z_{i-1}}T_{i-1}^{n+1} + \left\{1 + \frac{2\Delta t}{\rho c_i\left(\Delta z_{i-1} + \Delta z_i\right)}\left(\frac{\lambda_{i-1/2}}{\Delta z_{i-1}} + \frac{\lambda_{i+1/2}}{\Delta z_i}\right)\right\}T_i^{n+1} - \frac{2\Delta t\lambda_{i+1/2}}{\rho c_i\left(\Delta z_{i-1} + \Delta z_i\right)\Delta z_i}T_{i+1}^{n+1}$$

Pour $2 \le i \le 13$, le bilan s'écrit donc sous la forme :

Équation 56

$$\boxed{T_i^n = D_i^n = A_i T_{i-1}^{n+1} + B_i T_i^{n+1} + C_i T_{i+1}^{n+1}}$$

Il existe deux façons de résoudre le système : en utilisant des conditions aux limites de première espèce ou en utilisant des conditions aux limites de deuxième espèce.

Condition à la limite supérieure : *i = 1*

- Condition de première espèce : $T_1^{n+1} = T_s$
- Condition de deuxième espèce : bilan sur la demi-maille extrême supérieure. Pour un élément de surface unitaire normal à l'axe *z* et d'épaisseur $\frac{\Delta z_1}{2}$, la variation d'énergie interne surfacique $\rho \cdot c_1 \cdot \frac{\Delta z_1}{2} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$ est égale à la somme des flux entrant et sortant. Le bilan local est exprimé sous sa forme explicite par :

Équation 57
$$\rho \cdot c_1 \cdot \frac{\Delta z_1}{2} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \varphi_0 + \lambda_{1+1/2} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{1+1/2}$$

avec $\varphi_0 = (1 - A) R_g + R_{at} - R_{surf} - H - LE$

L'Équation 57 s'écrit sous sa forme implicite :

Équation 58
$$\rho \cdot c_1 \cdot \frac{\Delta z_1}{2} \cdot \frac{T_1^{n+1} - T_1^n}{\Delta t} = \varphi_0 + \lambda_{\frac{3}{2}} \cdot \frac{T_2^{n+1} - T_1^{n+1}}{\Delta z_1}$$

D'où la condition à la limite supérieure :

Équation 59
$$\frac{1}{2} \cdot T_1^n + \frac{\Delta t}{\rho c_1 \Delta z_1} \cdot \varphi_0 = \left(\frac{1}{2} + \frac{\lambda_{3/2} \cdot \Delta t}{\rho \cdot c_1 \cdot \Delta z_1 \cdot \Delta z_1} \right) \cdot T_1^{n+1} - \frac{\lambda_{3/2} \cdot \Delta t}{\rho \cdot c_1 \cdot \Delta z_1 \cdot \Delta z_1} \cdot T_2^{n+1}$$

La condition à la limite supérieure de deuxième espèce, qui est le bilan pour $i = 1$, est donc de la forme :

Équation 60 $$\boxed{D_1^n = B_1 T_1^{n+1} + C_1 T_2^{n+1}}$$

Condition à la limite inférieure : $i = 14$

- Condition de première espèce : la température est maintenue constante dans le temps : $T_{14}^{n+1} = T_{14}$
- Condition de deuxième espèce : bilan sur la demi-maille extrême inférieure. Pour un élément de surface unitaire normal à l'axe z et d'épaisseur $\frac{\Delta z_{13}}{2}$, la variation d'énergie interne $\rho \cdot c_{14} \cdot \frac{\Delta z_{13}}{2} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$ est égale à la somme des flux entrant et sortant. Le bilan local est exprimé sous sa forme explicite par :

Équation 61 $$\rho \cdot c_{14} \cdot \frac{\Delta z_{13}}{2} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = -\lambda_{14-1/2} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{14-1/2} + \varphi_{14}$$

avec $\varphi_{14} \leq 0$ dans le cas général.

L'Équation 61 s'écrit sous sa forme implicite :

Équation 62 $$\rho \cdot c_{14} \cdot \frac{\Delta z_{13}}{2} \cdot \frac{T_{14}^{n+1} - T_{14}^{n}}{\Delta t} = -\lambda_{14-\frac{1}{2}} \cdot \frac{T_{14}^{n+1} - T_{131}^{n+1}}{\Delta z_{13}} + \varphi_{14}$$

D'où la condition à la limite inférieure :

Équation 63

$$\frac{1}{2}\cdot T_{14}^{n}+\frac{\Delta t}{\rho\cdot c_{14}\cdot\Delta z_{13}}\cdot\varphi_{14}=-\frac{\lambda_{14-1/2}\Delta t}{\rho\cdot c_{14}\cdot\Delta z_{13}\cdot\Delta z_{13}}\cdot T_{13}^{n+1}+\left(\frac{1}{2}+\frac{\lambda_{14-1/2}\Delta t}{\rho\cdot c_{14}\cdot\Delta z_{13}\cdot\Delta z_{13}}\right)\cdot T_{14}^{n+1}$$

où φ_{14}, le flux conductif au niveau *14,* est pris nul d'après la condition formulée par l'Équation 20 (b).

La condition à la limite inférieure qui est le bilan pour $i = N = 14$, est donc de la forme :

Équation 64

$$\boxed{D_{14}^{n}=A_{14}T_{13}^{n+1}+B_{14}T_{14}^{n+1}}$$

La combinaison des équations 56, 60 et 64 donne le système suivant :

Équation 65

$$\begin{cases}0+B_1T_1^{n+1}+C_1T_2^{n+1}=D_1^n\\ \vdots\\ A_iT_{i-1}^{n+1}+B_iT_i^{n+1}+C_iT_{i+1}^{n+1}=D_i^n\\ \vdots\\ A_{14}T_{13}^{n+1}+B_{14}T_{14}^{n+1}+0=D_{14}^n\end{cases}$$

Ce système d'équation s'écrit sous forme matricielle :

$$\begin{vmatrix}B_1 & C_1 & & & & \\ A_2 & B_2 & C_2 & & 0 & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & & \\ & & A_i & B_i & C_i & \\ & 0 & & \ddots & \ddots & \ddots \\ & & & & A_{14} & B_{14}\end{vmatrix}\times\begin{vmatrix}T_1^{n+1}\\ T_2^{n+1}\\ \vdots\\ T_i^{n+1}\\ \vdots\\ T_{14}^{n+1}\end{vmatrix}=\begin{vmatrix}D_1^n\\ D_2^n\\ \vdots\\ D_i^n\\ \vdots\\ D_{14}^n\end{vmatrix}$$

La matrice des coefficients est de type tri-diagonal. On la résout par factorisation et par substitution. Les coefficients sont donnés par les conditions de deuxième espèce.

4.2.d. Sorties du modèle

À l'issue des calculs, le modèle restitue des températures de surface du revêtement de la chaussée T_s pour les six stations météorologiques routières pour les 24 heures à venir avec un pas de temps de une heure. Il restitue également, à titre indicatif, les prévisions de Météo-France de la température de l'air T_a et de l'humidité relative de l'air *hr* interpolée de sorte à avoir les prévisions horaires pour ces grandeurs aussi.

La Figure 16 présente les trois sorties disponibles à l'issue des calculs pour la station de La Violette du 14-02-2003 à15H00 au 15-02-2003 à 14H00.

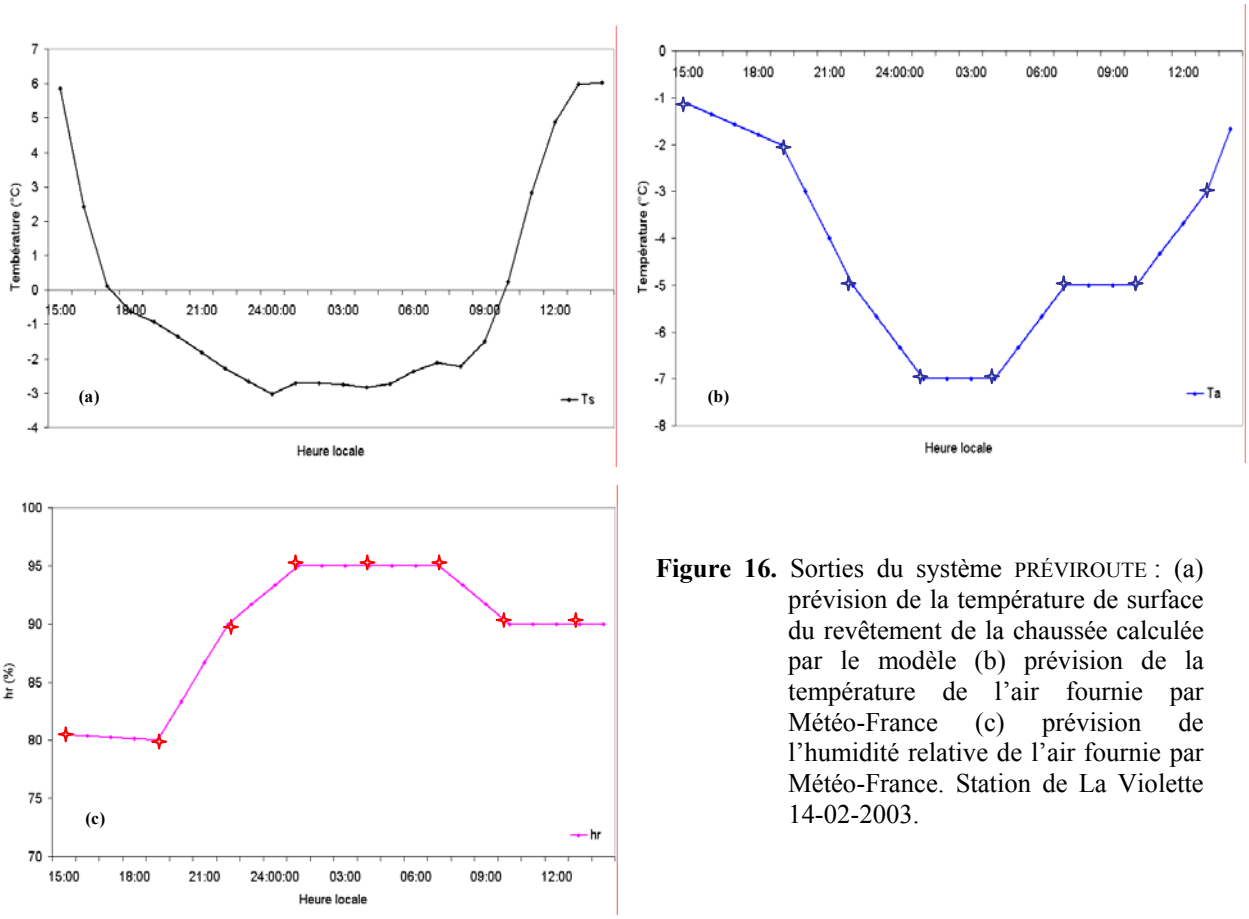


Figure 16. Sorties du système PRÉVIROUTE : (a) prévision de la température de surface du revêtement de la chaussée calculée par le modèle (b) prévision de la température de l'air fournie par Météo-France (c) prévision de l'humidité relative de l'air fournie par Météo-France. Station de La Violette 14-02-2003.

La Figure 16 (a) représente la prévision de la température de surface du revêtement de la chaussée T_s calculée par le modèle sur 24 heures. L'heure locale est représentée en abscisse et la température de surface est reportée sur l'axe des ordonnées.

La Figure 16 (b) montre l'évolution de la température de l'air T_a tri-horaire prévue par Météo-France et interpolée linéairement en données horaires par le modèle. L'axe des abscisses indique l'heure locale et l'axe des ordonnées indique la température de l'air.

La Figure 16 (c) représente la prévision tri-horaire de l'humidité relative de l'air *hr* fournie par Météo-France et interpolée linéairement en données horaire par le modèle. L'heure locale est représentée en abscisse et l'axe des ordonnées indique le taux d'humidité relative.

La Figure 16 (a) permet de distinguer trois phases de la prévision de la température de surface :

- La première débute à 15H00, heure de début de la prévision, et se poursuit jusqu'à environ 17H00, heure du coucher du soleil, (17H12 pour le 14-02-2003). Cette phase qui sera appelée par la suite première phase diurne représente la décroissance de la température due à la déclinaison du soleil qui à 15H00, en heure locale, est à peu près à son zénith. Durant cette phase, le modèle effectue le calcul prévisionnel des échanges radiatifs. Pendant cette phase, le rayonnement solaire global diminue continuellement tandis que la température de surface chute rapidement.

- La seconde débute aux environs de 17H00 et se poursuit durant toute la nuit jusqu'au lever du soleil le lendemain matin vers 7H00 (6h50 pour le 15-02-2003). Par la suite cette phase sera appelée phase nocturne. C'est la phase de refroidissement nocturne où la température de l'air et la température de surface chutent car il n'y a

plus de rayonnement solaire. Durant cette phase, le rayonnement solaire global est égal à zéro dans le modèle. L'évolution de la température de surface est lente.

- La dernière débute à 7H00 pour se terminer à 14H00, heure de fin des prévisions. Par la suite, cette phase sera appelée deuxième phase diurne. La surface subit à nouveau le réchauffement dû à l'ensoleillement. Le modèle effectue donc à nouveau le calcul de la prévision du rayonnement solaire global et la température de surface augmente au cours du temps.

Le poids des différents termes de l'équation du bilan énergétique évolue donc durant la prévision de 24 heures. Cette évolution est prise en compte, entre autre, par les différents calculs du rayonnement solaire global en fonction des trois phases citées ci-dessus.

Les sorties du modèle ont deux fonctions. La première est d'alimenter le module d'extension de la prévision de la température de surface du revêtement de la chaussée T_s sur tout l'itinéraire. La seconde est de constituer un outil de veille soumis à l'interprétation des gestionnaires autoroutiers. En effet, ces données sont affichées au CEI, au même titre que les mesures des stations météorologiques routières qui sont obtenues en temps réel. En fonction de l'évolution de la température de l'air prévue par Météo-France par rapport aux mesures des stations, le gestionnaire peut apporter des corrections à la température de surface prévue par le modèle.

5. CONCLUSIONS DU CHAPITRE

Ce chapitre nous a permis de voir que le modèle sur lequel nous travaillons fonctionne en deux étapes : une première étape de traitement des données et de calcul des conditions initiales pour le démarrage de la prévision, une seconde étape de prévision du bilan d'énergie à l'interface chaussée-atmosphère et de la température de surface du revêtement de la chaussée.

Pour la première étape, le modèle a besoin des données d'observations des stations météorologiques routières ainsi que de certaines caractéristiques de la chaussée.

Pour la seconde étape, il a besoin d'un certain nombre de données qui se classent en deux catégories : les paramètres de chaussée et les paramètres atmosphériques. Les paramètres de chaussée sont des paramètres fixes qui décrivent physiquement et thermiquement la chaussée et les paramètres atmosphériques sont soit des paramètres fixes qui décrivent l'environnement atmosphérique proche des stations, soit des données prévisionnelles fournies par le CDM de Météo-France.

On a vu également que le modèle restitue lors de sa prévision de la température de surface trois phases différentes. Au cours de la première phase diurne, la température de surface chute rapidement. Au cours de la phase nocturne, la température de surface diminue lentement. Durant la seconde phase diurne, la température de surface augmente.

Le but étant d'étudier la performance du modèle et de proposer des voies d'amélioration, il conviendra d'abord d'étudier sa sensibilité aux divers paramètres d'entrée afin de les hiérarchiser. Ce travail fait l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 4 SENSIBILITÉ DU MODÈLE

Dans le chapitre précédent le modèle et les différentes données d'entrée nécessaires à son fonctionnement ont été présentés. Ce chapitre sera consacré à l'étude de la sensibilité du modèle à ces différentes données qui seront classées en deux catégories : les paramètres de chaussée et les paramètres atmosphériques. Cette étude a été réalisée avec les données opérationnelles qui ont été regroupées durant cette thèse en une base de données exploitable sous Windows.

Dans un premier temps, les paragraphes 1 et 2 font la présentation de la base de données et des outils qui serviront à l'étude de la sensibilité.

Puis, dans les paragraphes 3 et 4, la sensibilité aux paramètres de la chaussée et aux paramètres atmosphériques est étudiée et analysée.

Pour finir, le paragraphe 5 introduit la prédominance des échanges radiatifs dans la prévision de la température de surface du revêtement de la chaussée et classe les paramètres par degré d'importance pour cette prévision.

1. LA BASE DE DONNÉES

Une partie importante du travail de thèse a consisté à mettre en place une base de données constituée lors du fonctionnement du modèle sur une portion de l'autoroute A75. Par la suite, une description du site opérationnel de l'autoroute A75 est donnée ainsi qu'une description de l'organisation de la base de données.

1.1. Le site opérationnel

Le modèle PRÉVIROUTE fonctionne en mode opérationnel depuis l'hiver 1993-1994 en Auvergne sur l'autoroute A75. Cette autoroute traverse les départements de la Haute-Loire et du Cantal sur une distance de 66 km principalement suivant un axe nord-sud.

Elle assure la continuité de l'axe Clermont-Ferrand – Béziers. Elle se singularise par un profil altimétrique variant entre 350 m et 1107 m et franchit une zone de climat semi-montagnard.

Cette portion autoroutière est équipée d'un réseau d'observation composé de 6 stations météorologiques automatiques équipées de capteurs atmosphériques et de chaussée. Elles sont installées en tenant compte de l'organisation des circuits de salage ainsi que des contraintes de raccordement aux réseaux d'énergie et de transmission de données. Les stations permettent d'assurer une bonne surveillance de l'axe autoroutier de l'A75 et le réseau d'appel d'urgence sert de support de liaison. La position géographique des six stations est donnée dans le Tableau 14.

Station	Altitude	Longitude	Latitude
La Violette	580 m	3°14	45°17
Sal Bas	800 m	3°10	45°10
La Fageole	1110 m	3°08	45°07
Saint Flour	800 m	3°08	45°02
Garabit	820 m	3°11	44°58
Baraque du Roc	980 m	3°14	44°54

Tableau 14. Position géographique des stations de météorologie routière.

Ces six stations gèrent l'acquisition des données décrites dans le Tableau 10 page 42 et dans le Tableau 11 page 44 avec un pas de temps de six minutes.

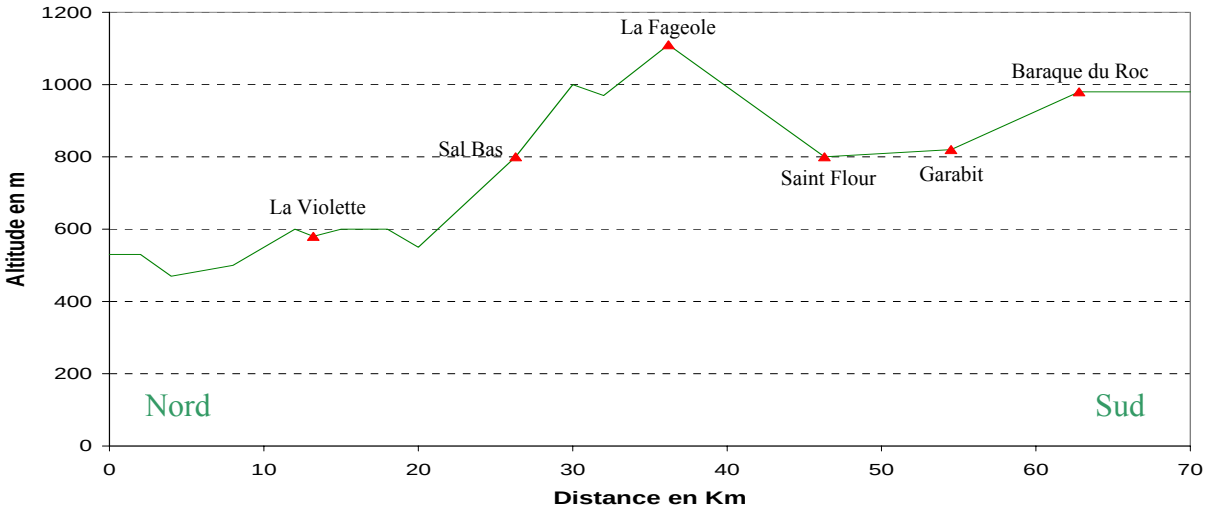


Figure 17. Profil altimétrique de l'autoroute A75 dans la traversée du Cantal.

La Figure 17 représente le profil altimétrique de la portion de l'autoroute A75 qui traverse le département du Cantal. La distance en kilomètres est reportée sur l'axe des abscisses. L'altitude du trajet est indiquée par l'axe des ordonnées. La courbe verte représente l'itinéraire et les marques rouges l'emplacement des stations météorologiques routières.

Pour chacune de ces stations, nous disposons donc de trois types d'informations :

- Les observations atmosphériques et les mesures liées à la chaussée.
- Les prévisions météorologiques locales fournies par le CDM. Ce sont des données quotidiennes tri-horaires entre 19H00 et 16H00.
- Les sorties du modèle de prévision comprenant des données météorologiques et la température de surface du revêtement de la chaussée (Tableau 15).

Ces données constituent l'élément principal pour l'étude du modèle de prévision de la température de surface du revêtement de la chaussée.

1.2. Organisation de la base de données

Depuis 1994, toutes ces données étaient stockées sous forme de fichiers journaliers impropres à l'utilisation pour les études prévues pour ce travail de thèse ou pour des tests de sensibilité ou pour une validation du modèle. Une partie importante du travail réalisé durant cette thèse a été de regrouper et organiser ces données dans une base de données unique.

Ce travail a débouché sur la création de trois tables de classement correspondant chacune à un fichier informatique : une table de données locales comprenant les données d'observation atmosphérique et de la chaussée mesurées toutes les six minutes par les stations météorologiques routières (1ère colonne du Tableau 15), une table contenant les données météorologiques tri-horaires prévisionnelles fournies par le CDM (2ère colonne du Tableau 15) et une table des prévisions horaires du modèle (3ère colonne du Tableau 15).

Base de Données		
Table : données d'observation	**Table : données prévisionnelles**	**Table : sorties du modèle**
Numéro de station	Numéro de station	Numéro de station
Date de l'observation	Date du lancement de la prévision	Date du lancement de la prévision
Heure de l'observation	Date de la prévision	Date de la prévision
Température de l'air	Heure de la prévision	Heure de lancement de la prévision
Température de surface voie 1	Indice de confiance sur la prévision	Heure de la prévision
Température de congélation voie 1	Température de l'air	Numéro de voie
Humidité relative de l'air	Humidité relative	Température de l'air
Température de surface voie 2	Vitesse du vent	Température de surface
Température de congélation voie 2	Nébulosité	Température de rosée
Température du corps de chaussée à –15 cm voie 1	Intensité des précipitations	Humidité relative
Température du corps de chaussée à –30 cm voie 1	Hauteur du plafond nuageux	
Température du corps de chaussée à –15 cm voie 2	Occurrence de pluie	
Température du corps de chaussée à –30 cm voie 2	Occurrence de brouillard	
Vitesse du vent	Occurrence de neige	
Direction du vent		
Précipitations		
Rayonnement solaire global		
Rayonnement atmosphérique infrarouge		
Hauteur de neige		
Visibilité		
État de surface voie 1		
État de surface voie 2		
État des précipitations		

Tableau 15. Organisation de la base de données.

Nous, nous sommes attachés ici à présenter succinctement l'expérience menée sur l'autoroute A75 dans le département du Cantal en Auvergne depuis 1994. Nous nous sommes plus particulièrement intéressés à la présentation des jeux de données qui seront utilisés par la suite. La mise en fonctionnement du système PRÉVIROUTE sur l'autoroute A75 a permis de constituer une banque importante de données expérimentales et de simulation. Toutefois, depuis 1994, il y a eu diverses mises à

jour de PRÉVIROUTE ainsi que des remplacements des appareillages de mesure au niveau des stations météorologiques routières. Il est donc difficile de procéder à des études statistiques, de sensibilité ou à une validation du modèle sur toute la durée de cette période. Les dernières modifications du modèle ainsi que les derniers remplacements d'appareillage de mesure étant intervenus en 1999, nous pouvons considérer qu'à partir de cette date nous avons affaire à une version stabilisée du modèle et que les prévisions et mesures issues de son fonctionnement sont compatibles et comparables entre elles. Nous, nous limiterons donc, pour la suite, pour les études statistiques, aux données des trois hivers 1999-2000, 2000-2001 et 2001-2002 représentants 367 jours de données pour les six points de mesures de l'autoroute A75.

2. OUTILS POUR L'ÉTUDE

L'étude de la sensibilité du modèle porte sur deux types de paramètres : les paramètres de chaussée et les paramètres atmosphériques. Certains de ces paramètres sont des grandeurs intrinsèques de la chaussée ou de son environnement telles que l'émissivité thermique, la diffusivité thermique, la capacité calorifique massique ou la masse volumique de la chaussée ou encore le coefficient d'échange global lié à la rugosité de l'environnement. D'autres sont des variables liées aux conditions météorologiques telles que la température et l'humidité de l'air ou la nébulosité qui agissent directement sur les quantités du rayonnement solaire global et du rayonnement atmosphérique infrarouge incidentes sur la surface de la chaussée.

Pour étudier la sensibilité du modèle à ces divers paramètres, nous disposons de deux approches permettant d'évaluer l'impact des variations de ces paramètres sur la prévision de la température du revêtement de la chaussée : l'étude d'un cas ponctuel et une approche statistique.

2.1. Étude d'un cas ponctuel

Cette méthode consiste à faire apparaître sur une même figure l'observation de la température de surface délivrée par une station météorologique routière et la prévision de la température de surface du revêtement de la chaussée donnée par le

modèle. La comparaison visuelle de l'évolution des deux températures ainsi que de leurs allures générales et l'écart qui les sépare renseigne de manière qualitative sur la qualité de la prévision.

Par la suite, cette étude sera effectuée sur une journée hivernale type : la journée du 14-02-2003. Pour cette journée, les conditions météorologiques ont été stables, la nébulosité faible et le calcul prévisionnel de la température de surface du revêtement de la chaussée correct.

La Figure 18 représente la comparaison entre les températures de surface observée et prévue pour les 24 heures comprises entre le 14-02-2003 à 15H00 et le 15-02-2003 à 14H00 pour la station du col de La Fageole. On rappelle qu'à cette date les heures de coucher et de lever du soleil sont respectivement de 06H50 et de 17H12. L'axe des abscisses indique l'heure locale et l'axe des ordonnées indique la température. Les courbes noire et rouge représentent l'évolution de la température de surface observée et prévue par le modèle.

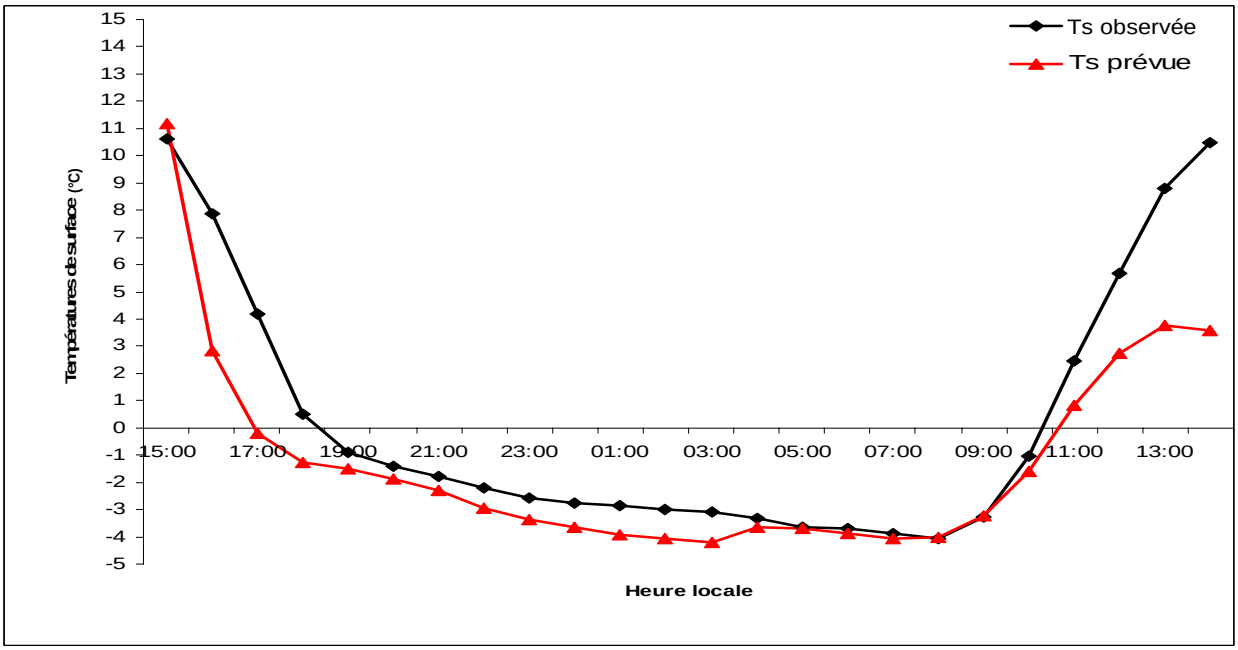


Figure 18. Comparaison entre T_s observée et T_s prévue pour la journée du 14-02-2003 pour la station du col de La Fageole.

Cette figure permet de distinguer les trois phases de fonctionnement du modèle : la première phase diurne, la phase nocturne et la seconde phase diurne. Dans l'ensemble, la température prévue est inférieure à la mesure mais l'allure générale des deux courbes est similaire. Lors de la première phase diurne, le modèle refroidit la surface plus rapidement que ce qui est observé induisant un biais entre la prévision et l'observation en début de phase nocturne. Ce biais se propage durant toute la nuit. Lors de la seconde phase diurne, la prévision diverge de l'observation. La prévision du 14-02-2003 pour la station du col de La Fageole met en évidence que lorsque les températures de surface sont les plus basses, l'écart entre l'observation et la prévision est de l'ordre de 1°C.

2.2. Approche statistique

Le principal indicateur de la qualité du modèle est l'écart qui existe entre la température de surface observée aux stations météorologiques routières de mesure T_{Sobs} et la température de surface prévue par le modèle T_{Sprev}. On définit alors une variable E qui exprime cet écart par :

Équation 66
$$E = T_{Sobs} - T_{Spre}$$

Plus E est petit et plus la prévision est bonne.

Il sera commode et pertinent d'étudier l'évolution de cette variable dans différents cas de figure et pour des volumes de données plus ou moins importants. On définit alors deux grandeurs statistiques $\bar{E}$ et D telles que :

Équation 67
$$\overline{E} = \frac{\sum_{i=1}^{n} E_i}{n}$$

Équation 68
$$D = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\overline{E} - E_i\right)^2}$$

$\bar{E}$ représente la valeur moyenne de E pour un échantillon de données. D est l'écart-type lié à $\bar{E}$ calculé et il exprime la dispersion de la variable E autour de sa valeur moyenne.

Idéalement, une bonne prévision pour un échantillon de données est exprimée par un $\bar{E}$ proche de 0°C et un écart-type D faible.

3. SENSIBILITÉ AUX PARAMÈTRES DE LA CHAUSSÉE

Le modèle physique de prévision de la température de la surface du revêtement de la chaussée utilise un certain nombre de paramètres fixes décrivant la chaussée. Ces paramètres ont été définis de manière empirique ou par la littérature. Ainsi, la chaussée est définie par sa capacité thermique massique c_p, sa masse volumique ρ, sa conductivité thermique λ et sa diffusivité thermique k (k est une combinaison des trois autres propriétés de la chaussée). Tels qu'ils sont définis dans le modèle, certains de ces paramètres ont plus d'influence que d'autres sur la prévision de T_s. Nous nous proposons ici de classer ces paramètres selon leur influence sur la prévision de T_s. Les valeurs de référence pour ces paramètres sont celles décrites par le Tableau 12 page 47.

Pour effectuer cette étude de sensibilité, nous avons choisi la même journée hivernale que précédemment (journée du 14-02-2003) pour la station du col de La Fageole. Nous avons apporté par la suite des variations sur chacun de ces paramètres et nous avons observé l'influence de ces variations sur la prévision de T_s.

3.1. Sensibilité à la capacité thermique massique de la chaussée

La capacité thermique massique représente la quantité d'énergie qui doit être apportée pour augmenter 1 kg de chaussée de 1 K. La chaussée est représentée par un modèle à 14 niveaux échelonnés entre 0 et 1 m de profondeur. L'épaisseur des niveaux croît de manière exponentielle avec la profondeur. Les huit premiers niveaux sont modélisés par une capacité thermique massique unique $c_{p1} = 1.10^3$ *J/kg.K* et les six derniers niveaux par une seconde capacité thermique massique $c_{p2} = 2.10^3$ *J/kg.K*. Plus la profondeur est grande et plus l'apport d'énergie doit être grand pour augmenter la température de la chaussée.

Des variations ont été apportées aux deux valeurs de la capacité thermique et les résultats sont observés pour c_{p1} sur la Figure 19 et pour c_{p2} sur la Figure 20.

La Figure 19 représente l'évolution des températures de surface observée et prévue pour la journée du 14-02-2003 pour la station du col de La Fageole. En abscisse est représentée l'échelle de temps en heure locale allant du 14-02-2003 à 15H00 jusqu'au 15-02-2003 à 14H00. En ordonnée, sont représentées les températures de surface observées et prévues. La courbe noire représente l'évolution de la température de surface observée. La courbe rouge représente l'évolution de la température de surface prévue calculée avec la valeur de référence de c_{p1}. Les autres courbes représentent l'évolution de la température de surface prévue avec des variations sur c_{p1}.

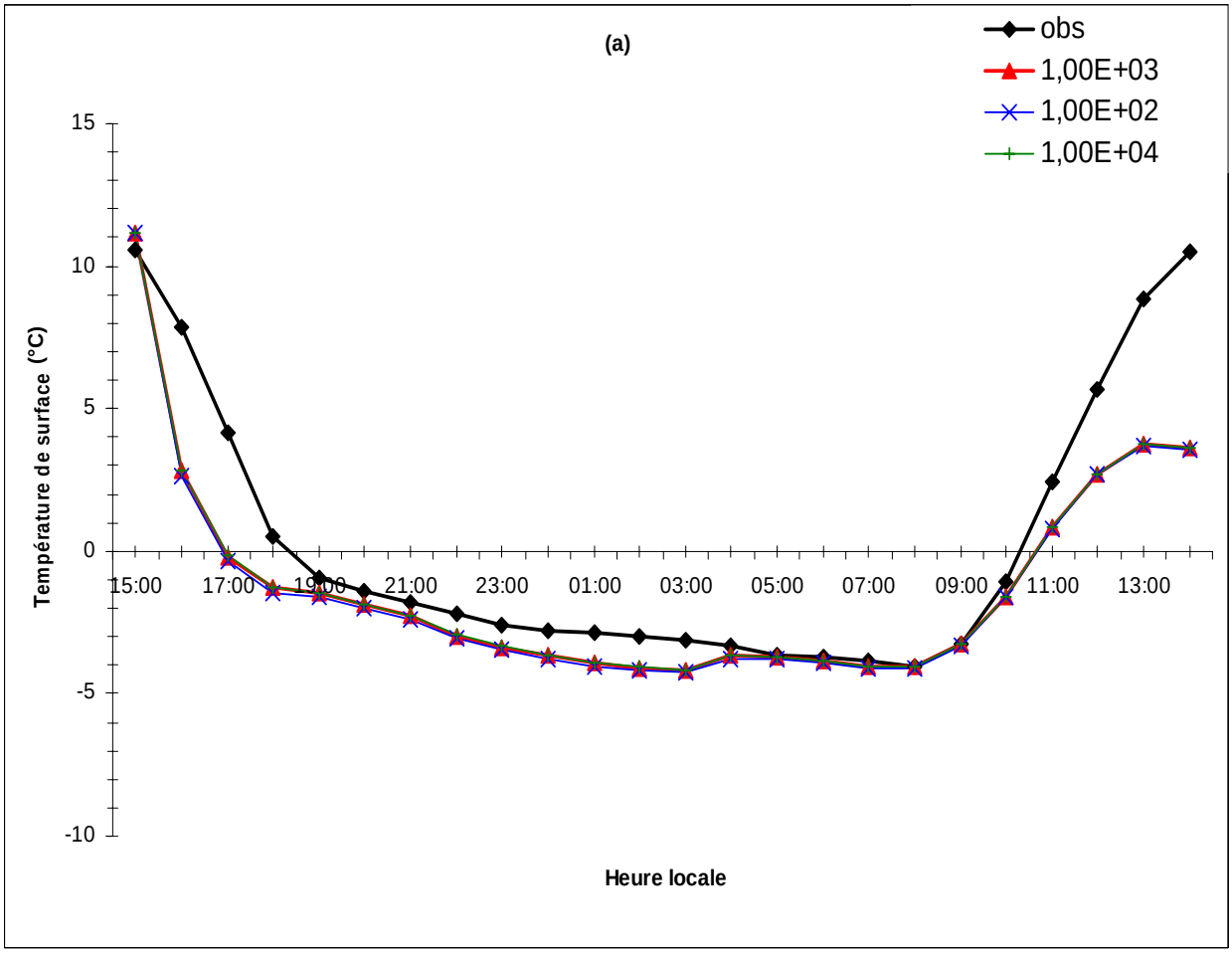


Figure 19. Évolution des températures de surface observée et prévue selon la valeur de c_{p1} pour la journée du 14-02-2003 au col de La Fageole.

On observe que les variations apportées à c_{p1} n'apportent visiblement pas de modifications majeures sur la prévision de la température de surface du revêtement de la chaussée. Cette observation graphique réalisée pour la station du col de La Fageole est confirmée par les résultats du Tableau 16. La première colonne de ce tableau contient les valeurs de c_{p1} testées. La seconde colonne présente la valeur absolue de l'écart entre l'observation et la prévision $|\bar{E}|$ moyenné sur la journée du 14-02-2003 et pour les six stations (144 données). La dernière colonne présente les écarts-types D pour les mêmes échantillons de données. On observe bien que les écarts absolus moyens $|\bar{E}|$ ainsi que leurs écarts-types D ne varient que très modestement en fonction de la variation de c_{p1}.

c_{p1} (J/kg.K)	$\|\bar{E}\|$ (en °C)	D (en °C)
1.10^2	1,93	1,90
1.10^3	1,88	1,86
1.10^4	1,87	1,86

Tableau 16. Écart entre observation et prévision en fonction de c_{p1} pour la journée du 14-02-2003 sur les six stations de l'autoroute A75.

Cette étude permet de conclure que le paramètre capacité thermique massique des couches supérieures n'a pas une influence prépondérante, dans notre modèle, sur la prévision de la température de surface du revêtement de la chaussée.

La même étude est réalisée pour la capacité thermique massique des couches les plus profondes. De cette étude, résultent la Figure 20 et le Tableau 17 qui peuvent être décrits de la même manière que la figure et le tableau précédents.

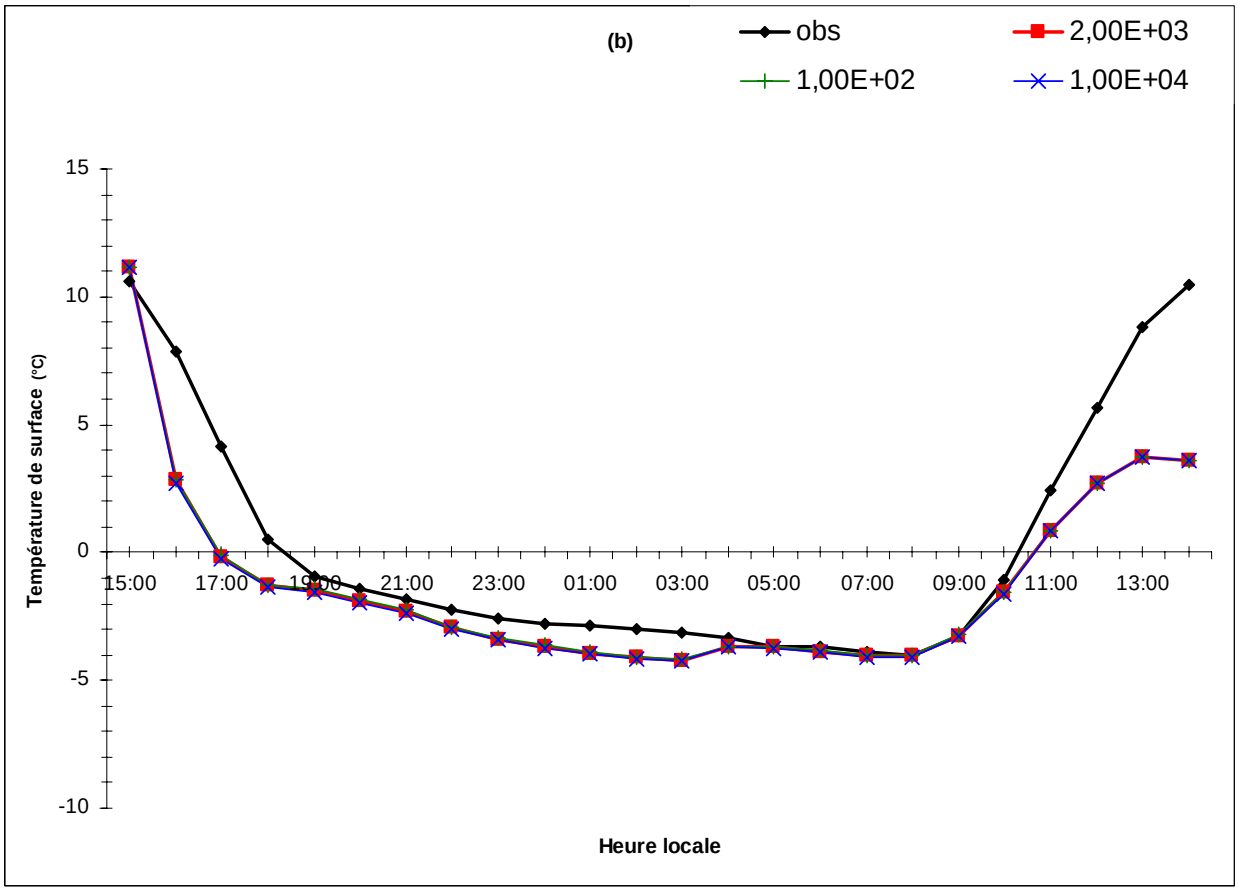


Figure 20. Évolution des températures de surface observée et prévue selon la valeur de c_{p2} pour la journée du 14-02-2003 au col de La Fageole.

c_{p2} (J/kg.K)	$\lvert\bar{E}\rvert$ (en °C)	D (en °C)
1.10^2	1,87	1,85
2.10^3	1,88	1,86
1.10^4	1,90	1,88

Tableau 17. Écart entre observation et prévision en fonction de c_{p2} pour la journée du 14-02-2003 sur les six stations de l'autoroute A75.

De la même façon, on observe que les variations de c_{p2} n'impliquent pas de variations notables sur la prévision de la température de surface du revêtement de la chaussée. Comme pour la capacité thermique massique des premières couches, on est amené à conclure que le paramètre capacité thermique massique des couches inférieures n'a pas une influence prépondérante sur la prévision de la température de surface du revêtement de la chaussée.

3.2. Sensibilité à la masse volumique de la chaussée

Pour compléter la paramétrisation de la chaussée, le modèle a besoin d'une valeur de masse volumique de la chaussée. Cette grandeur a été fixée à 3.10^3 kg/m^3. Cette valeur constitue une limite supérieure. En effet les matériaux constituant la chaussée représentent, dans le cas d'une compression maximale, une masse volumique de l'ordre de $2{,}5.10^3$ kg/m^3. Or, la chaussée a une structure interstitielle importante.

Des variations ont été apportées à la valeur de la masse volumique de la chaussée et les résultats sont observés sur la Figure 21.

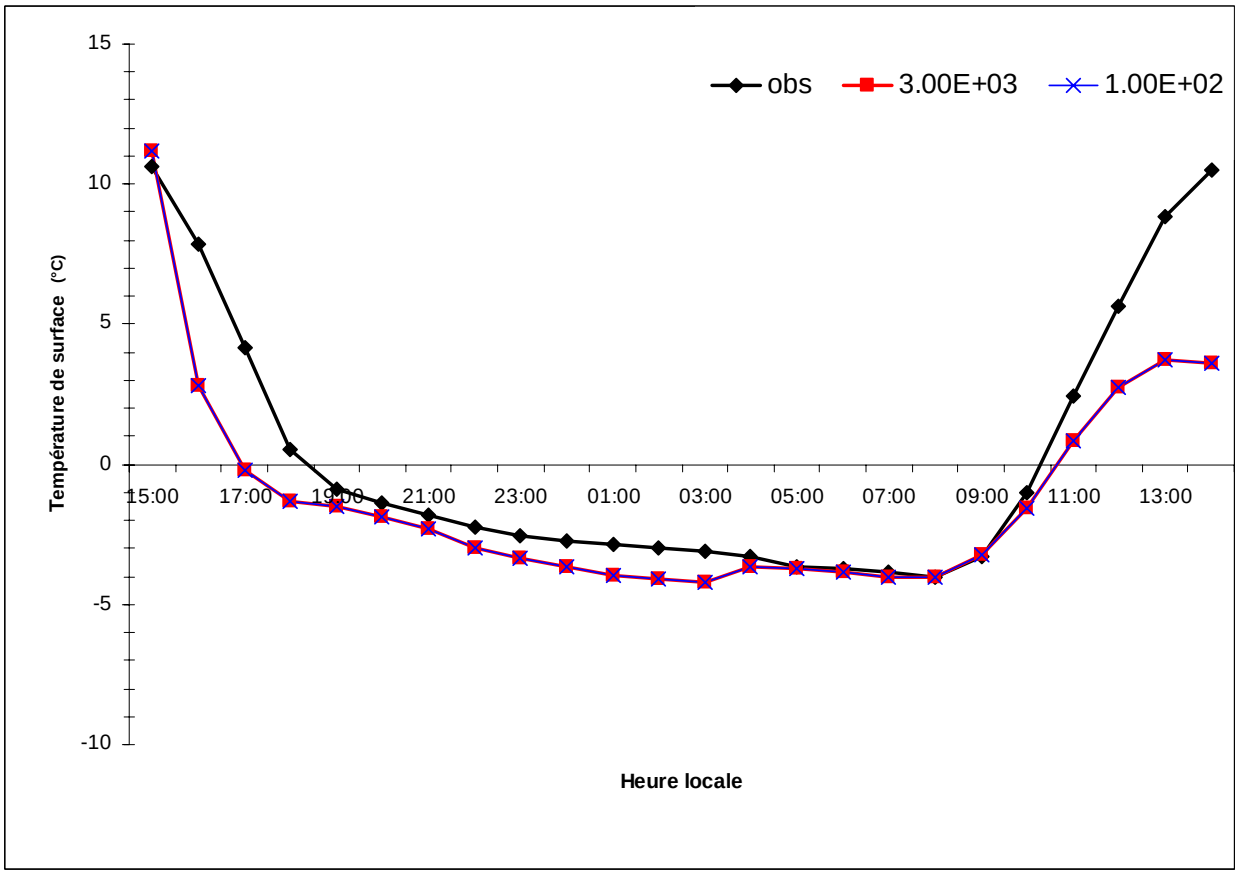


Figure 21. Évolution des températures de surface observée et prévue selon la valeur de ρ pour la journée du 14-02-2003 au col de La Fageole.

La Figure 21 représente l'évolution des températures de surface observée et prévue pour la journée du 14-02-2003 pour la station du col de La Fageole. En abscisse est représentée l'échelle de temps en heure locale allant du 14-02-2003 à 15H00 jusqu'au 15-02-2003 à 14H00. En ordonnée, sont représentées les températures de surface observée et prévue. La courbe noire représente l'évolution de la température de surface observée. La courbe rouge représente l'évolution de la température de surface prévue calculée avec la valeur de référence de ρ. Les autres courbes représentent l'évolution de la température de surface prévue avec des variations sur ρ.

On observe que les variations apportées à ρ n'entraînent pas de perturbations majeures sur la prévision de la température de surface du revêtement de la chaussée. Cette observation graphique réalisée pour la station du col de La Fageole est confirmée par les résultats du Tableau 18. La première colonne de ce tableau contient les valeurs de ρ testées. La seconde colonne présente l'écart absolu entre l'observation et la prévision $|\bar{E}|$ moyenné sur la journée du 14-02-2003 et pour les six stations. La dernière colonne présente les écarts-types D pour les mêmes échantillons de données. On observe bien que les écarts absolus moyens $|\bar{E}|$ ainsi que leurs écarts-types D ne varient que très modestement en fonction de la variation de ρ.

ρ (en kg/m^3)	$\lvert\bar{E}\rvert$ (en °C)	D (en °C)
1.10^2	1,88	1,87
3.10^3	1,88	1,86

Tableau 18. Écart entre observation et prévision en fonction de ρ pour la journée du 14-02-2003 sur les six stations de l'autoroute A75.

Cette étude permet de conclure que le paramètre masse volumique de la chaussée n'a pas une grande influence sur la prévision de la température de surface du revêtement de la surface de la chaussée.

3.3. Sensibilité à la diffusivité thermique de la chaussée

La diffusivité thermique de la chaussée *k* représente l'inertie thermique de la chaussée. C'est donc un paramètre important de la prévision de la température de surface de chaussée car il détermine la rapidité des échanges thermiques au sein de la chaussée. Pour la chaussée, cette valeur a été fixée à $0{,}967.10^{-6} m^2/s$.

Pour étudier la sensibilité du modèle à la diffusivité thermique, il a été donné à *k* diverses valeurs comprises entre 1.10^{-7} m^2/s et 1.10^{-5} m^2/s. La réponse du modèle pour la journée du 14-02-2003 pour la station du col de La Fageole est reportée sur la Figure 22 accompagnée des observations enregistrées par le capteur de surface.

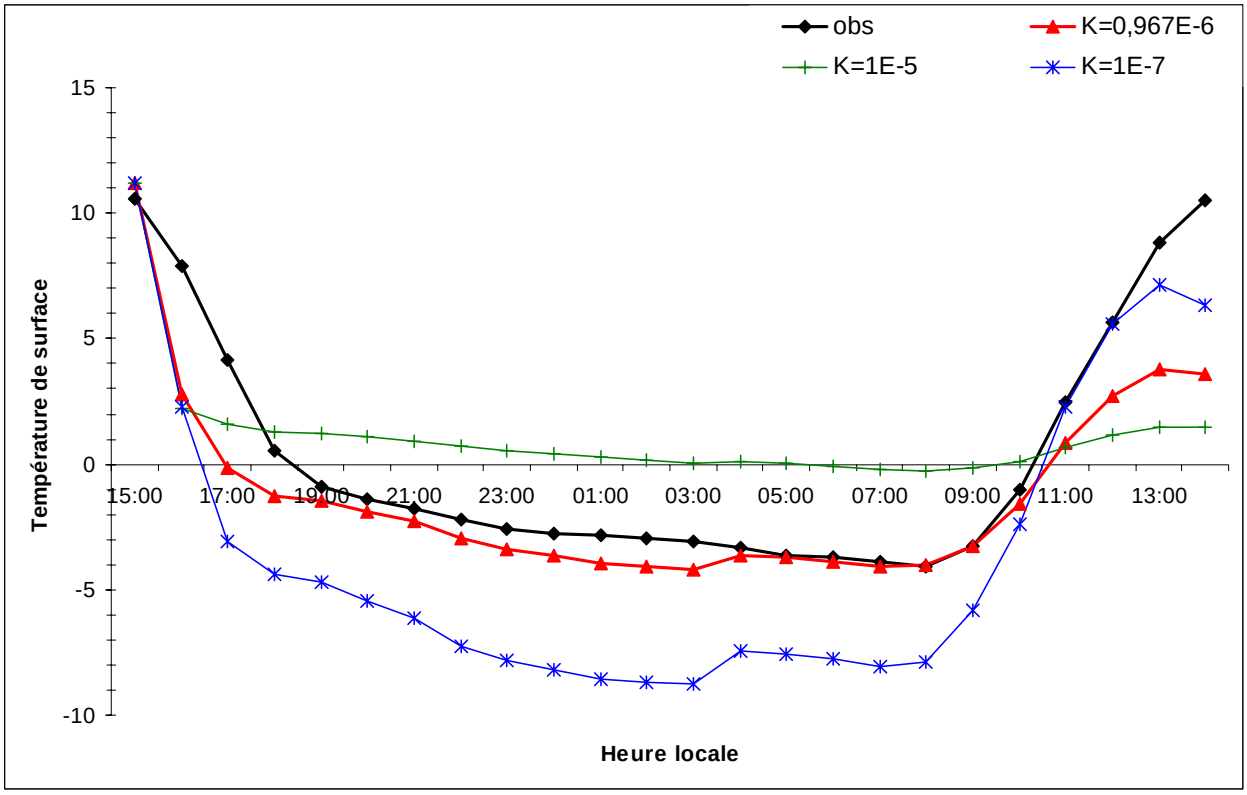


Figure 22. Évolution des températures de surface observée et prévue selon la valeur de *k* pour la journée du 14-02-2003 au col de La Fageole.

Sur la Figure 22, on a utilisé la même représentation que pour les figures précédentes. La courbe rouge représente l'évolution de la température de surface prévue calculée avec la valeur de référence de *k*. Les autres courbes représentent l'évolution de la température de surface prévue avec différentes valeurs de *k*.

Plusieurs observations peuvent être faites d'après la Figure 22. Quelle que soit la valeur de *k,* le modèle refroidit trop rapidement durant la première phase diurne avant le coucher du soleil (17H12). Durant la phase nocturne, plus la diffusivité est grande et plus la température de surface prévue est élevée. Durant le jour, cette tendance s'inverse. Cet état des choses s'explique par le fait que plus *k* est grand et plus la chaussée diffuse la chaleur rapidement. Or, de jour, la surface est plus chaude que le corps de la chaussée, donc la chaleur a tendance à migrer plus rapidement vers les couches internes, ce qui refroidit le revêtement de la chaussée. De nuit, le corps de chaussée est plus chaud que la surface et donc la chaleur a tendance à migrer vers la surface, ce qui a pour but de réchauffer le revêtement. Il est aussi notable d'après cette figure que la prévision réalisée avec la valeur de référence de *k* est la plus performante puisque c'est celle qui s'éloigne le moins de l'observation. Les autres valeurs induisent un écart entre l'observation et la prévision qui peut être de l'ordre de 5°C pour la phase nocturne et légèrement inférieur pour les phases diurnes.

Ces observations réalisées pour la station du col de La Fageole sont confirmées par les résultats moyennés sur toutes les stations et pour toute la journée du 14-02-2003 et présentés dans le Tableau 19. La première colonne de ce tableau contient les valeurs de *k* testées.

k (en m²/s)	$\|\bar{E}\|$ (en °C)	D (en °C)
1.10^{-5}	3,50	2,26
$0{,}967.10^{-6}$	1,88	1,86
1.10^{-7}	4,40	2,25

Tableau 19. Écart entre observation et prévision en fonction de *k* pour la journée du 14-02-2003 sur les six stations de l'autoroute A75.

La diffusivité thermique *k* a une importance prépondérante dans le calcul prévisionnel de la température de surface du revêtement de la chaussée. La valeur utilisée par le modèle est satisfaisante et fournit des prévisions correctes avec un écart absolu moyen inférieur à 2°C ainsi qu'un écart-type inférieur à 2°C.

4. SENSIBILITÉ AUX PARAMÈTRES ATMOSPHÉRIQUES

Pour fonctionner, le modèle physique de prévision de la température de surface du revêtement de la chaussée a besoin d'un certain nombre de paramètres atmosphériques. Certains sont des paramètres fixes servant à décrire l'atmosphère environnant des stations météorologiques routières tels que le coefficient d'échange global. Les autres sont des variables météorologiques prévisionnelles telles que la nébulosité, la température et l'humidité relative de l'air.

4.1. Sensibilité au coefficient d'échange global atmosphérique

Le coefficient d'échange global atmosphérique C_d est un coefficient local qui définit l'effet de la rugosité de l'environnement sur les échanges turbulents d'énergie. On définit pour ce paramètre deux valeurs : une valeur de jour et une valeur de nuit.

Pour effectuer l'étude de sensibilité sur ce paramètre, nous avons choisi la même journée hivernale type que précédemment et présentant des conditions météorologiques stables (journée du 14-02-2003). Nous avons apporté par la suite des variations sur chacune des valeurs de jour et de nuit de ce paramètre et nous avons observé l'influence de ces variations sur la prévision de T_s.

4.1.a. Coefficient de jour

La valeur de jour introduite dans le modèle est $C_d = 1{,}47.10^{-3}$. Nous avons fait varier cette valeur de référence entre 10^{-4} et 10^{-2} pour la journée du 14-02-2003. Les résultats sont présentés sur la Figure 23.

En ordonnée, sont représentées les températures de surface observée et prévue en fonction de l'heure locale. La courbe noire représente l'évolution de la température de surface observée. La courbe rouge représente l'évolution de la température de surface prévue calculée avec la valeur de référence de C_d. Les autres courbes représentent l'évolution de la température de surface prévue avec des variations sur C_d.

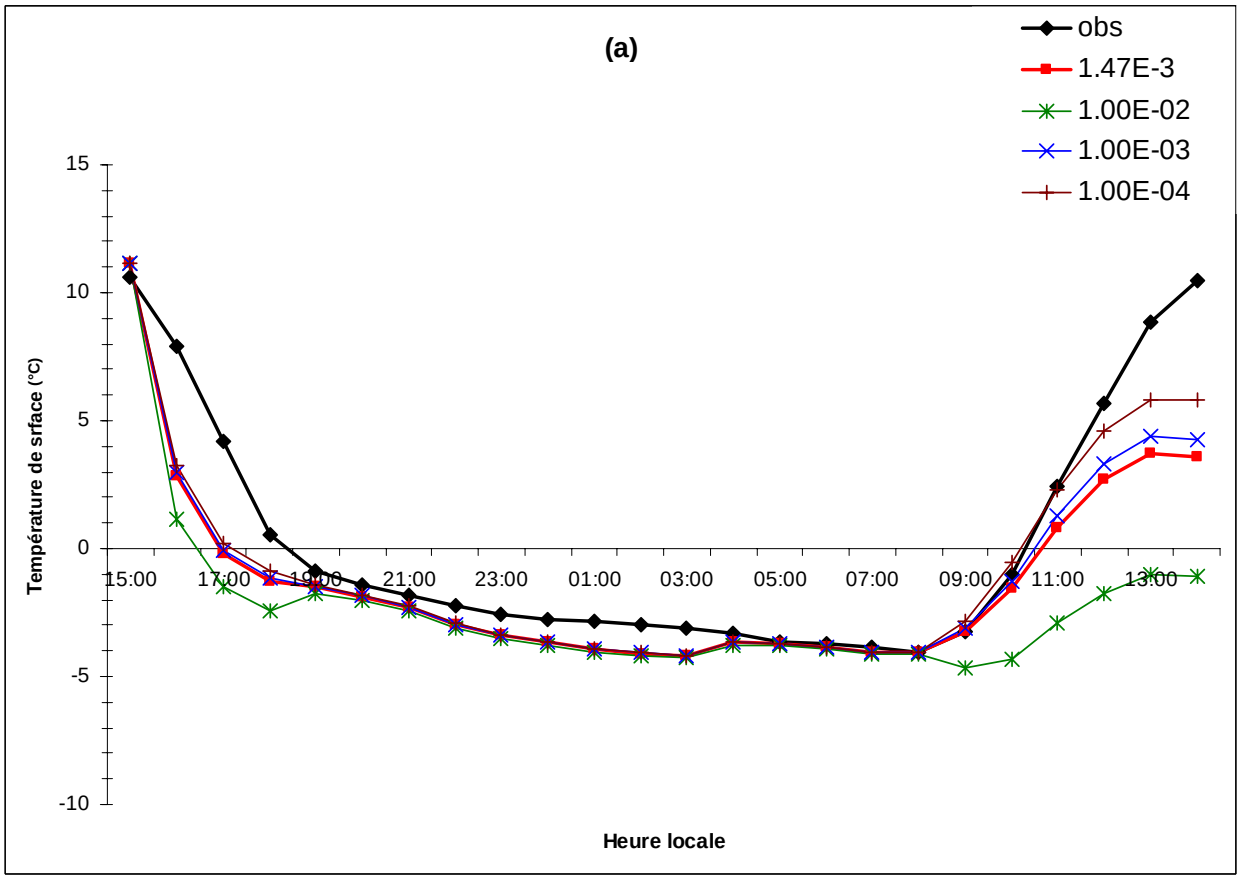


Figure 23. Évolution des températures de surface observée et prévue selon la valeur de C_d jour pour la journée du 14-02-2003 au col de La Fageole.

On observe naturellement sur cette figure que les variations de C_d jour n'affectent en rien la prévision de la température de surface lors de la phase nocturne. Lors des deux phases diurnes, on observe un écart entre les différentes prévisions entraîné par les variations apportées à C_d. Ces écarts constatés entre les prévisions perturbées et la prévision de référence peuvent atteindre 2°C lors de la première phase diurne et 4°C lors de la seconde phase diurne. Les prévisions réalisées avec $C_d = 1.10^{-4}$ sont les plus proches des observations réalisées. Ces observations sont confirmées par les résultats du Tableau 20. On observe bien que les écarts absolus moyens $|\bar{E}|$ ainsi que leurs écarts-types D varient en fonction de la variation de C_d et présentent leurs plus petites valeurs pour $C_d=1.10^{-4}$.

$C_{d\ jour}$	$\lvert\bar{E}\rvert$ (en °C)	D (en °C)
1.10^{-4}	2,72	2,10
1.10^{-3}	2,89	2,27
$1{,}47.10^{-3}$	2,98	2,37
1.10^{-2}	4,30	3,38

Tableau 20. Écart entre observation et prévision en fonction de C_d jour pour la journée du 14-02-2003 sur les six stations de l'autoroute A75.

La prévision de la température de surface du revêtement de la chaussée durant ces périodes diurnes est légèrement sensible à la valeur du coefficient d'échange global de jour.

4.1.b. Coefficient de nuit

La valeur de nuit introduite dans le modèle est $C_d = 1.10^{-3}$. Nous avons fait varier cette valeur de référence entre 10^{-4} et 10^{-2} pour la journée du 14-02-2003. Les résultats sont présentés par la Figure 24.

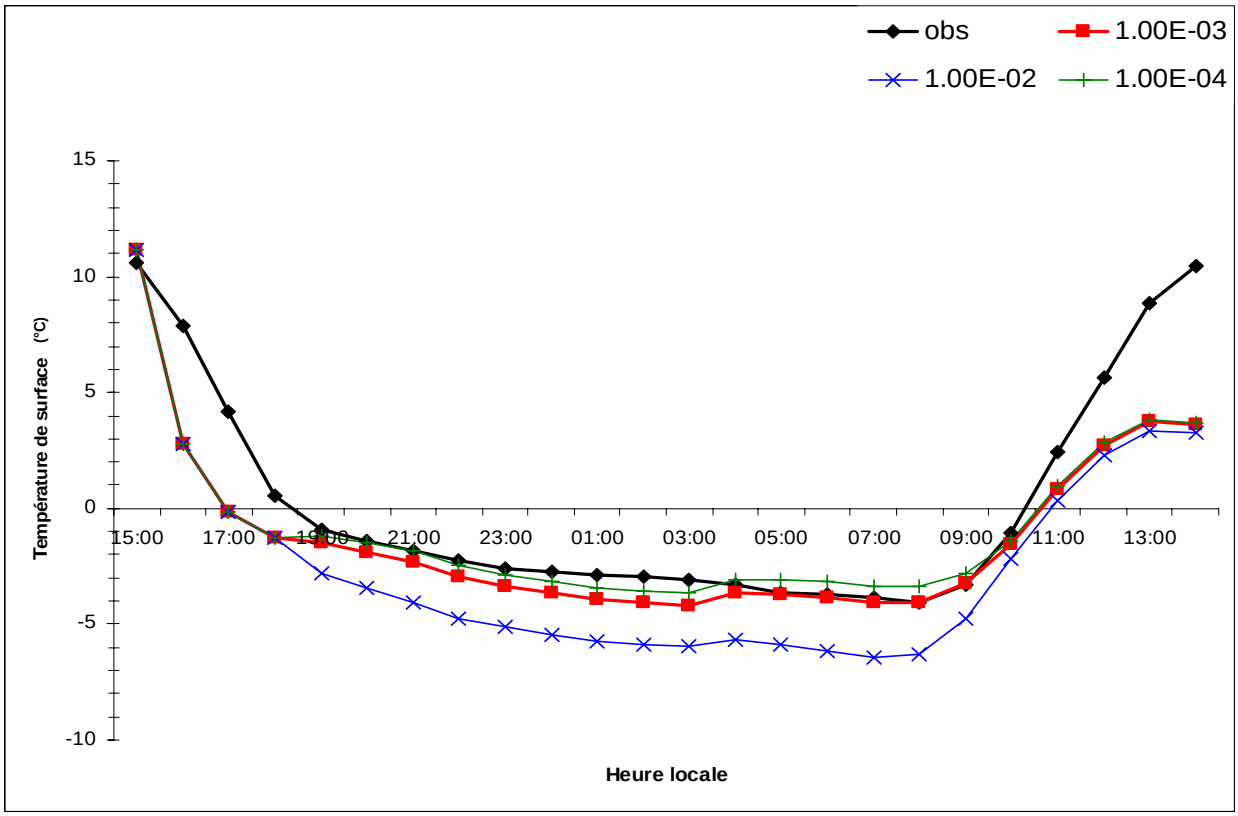


Figure 24. Évolution des températures de surface observée et prévue selon la valeur de C_d nuit pour la journée du 14-02-2003 au col de La Fageole.

La Figure 24 représente l'évolution des températures de surface observée et prévue en fonction de l'heure locale.

De la même manière que précédemment, on observe naturellement sur la Figure 24 que les variations de C_d nuit n'affectent en rien la prévision de la température de surface lors de la première phase diurne.

On observe que les variations apportées sur C_d nuit entraînent des écarts de la prévision de la température de surface pouvant atteindre près de 3°C par rapport à la prévision de référence (en rouge sur la figure) durant la période nocturne. Cet écart se réduit au commencement de la seconde phase diurne mais se propage néanmoins jusqu'à la fin de la période de prévision.

$C_{d\ nuit}$	$\lvert\bar{E}\rvert$ (en °C)	D (en °C)
1.10^{-4}	1,36	1,41
1.10^{-3}	1,44	1,36
1.10^{-2}	2,18	1,25

Tableau 21. Écart entre observation et prévision en fonction de C_d nuit pour la journée du 14-02-2003 sur les six stations de l'autoroute A75.

Comme précédemment, ces observations sont confirmées par les résultats du Tableau 21 qui est constitué de la même manière que le tableau précédent. On observe bien que les écarts absolus moyens $|\bar{E}|$ ainsi que leurs écarts-types D varient d'environ 1°C en fonction de la variation de C_d.

La prévision de la température de surface du revêtement de la chaussée durant ces périodes diurnes est légèrement sensible à la détermination de la valeur du coefficient d'échange global de nuit.

4.2. Température de l'air

La température de l'air T_a joue un rôle important dans le modèle compte tenu de son implication dans le calcul du rayonnement atmosphérique infrarouge et du flux de chaleur sensible. Ce paramètre fait partie des variables d'entrée du modèle. En fait, T_a est une donnée prévisionnelle fournie par le CDM et sur la qualité de laquelle nous n'avons pas de prise. Il est donc important d'étudier la sensibilité du modèle à cette variable. Pour ce faire, nous procèderons de deux manières différentes.

Dans un premier temps, il est fait appel aux informations de la base de données pour analyser le comportement des prévisions de T_s en fonction de la qualité des données prévisionnelles T_a. Cette première méthode est appelée méthode statistique.

Dans un second temps, on choisit une journée hivernale type pour laquelle des calculs de prévision de T_s sont réalisés en apportant des variations sur T_a. Cette seconde méthode est appelée méthode du changement de la valeur de référence.

4.2.a. Méthode statistique

L'étude statistique de l'influence de la qualité de la variable prévisionnelle T_a sur la prévision de T_s consiste à faire la relation entre la qualité de T_a et la qualité de T_s. La qualité de l'une et l'autre des deux variables est définie par les écarts E_a et E_s entre l'observation et la prévision tels que :

Équation 69 $$E_a = T_{aobs} - T_{apre}$$

Équation 70 $$E_S = T_{Sobs} - T_{Spre}$$

Ces écarts sont moyennés sur l'ensemble des données de la base de données pour la période 1999-2002.

Il a été défini cinq classes pour $|E_a|$: [0 ;2[, [2 ;4[, [4 ;6[, [6 ;8[et [8 ;∞[. Pour chacune de ces classes, le calcul de $\bar{E}_a$ et D_a a été réalisé. Ainsi, une bonne prévision de T_a est définie par un $\bar{E}_a$ proche de zéro et un D_a le plus petit possible.

Pour ces classes, le calcul des E_s, $\bar{E}_s$ et D_s correspondant a été réalisé et, de la même manière, une bonne prévision de T_s est définie par un $\bar{E}_s$ proche de zéro et un D_s le plus petit possible.

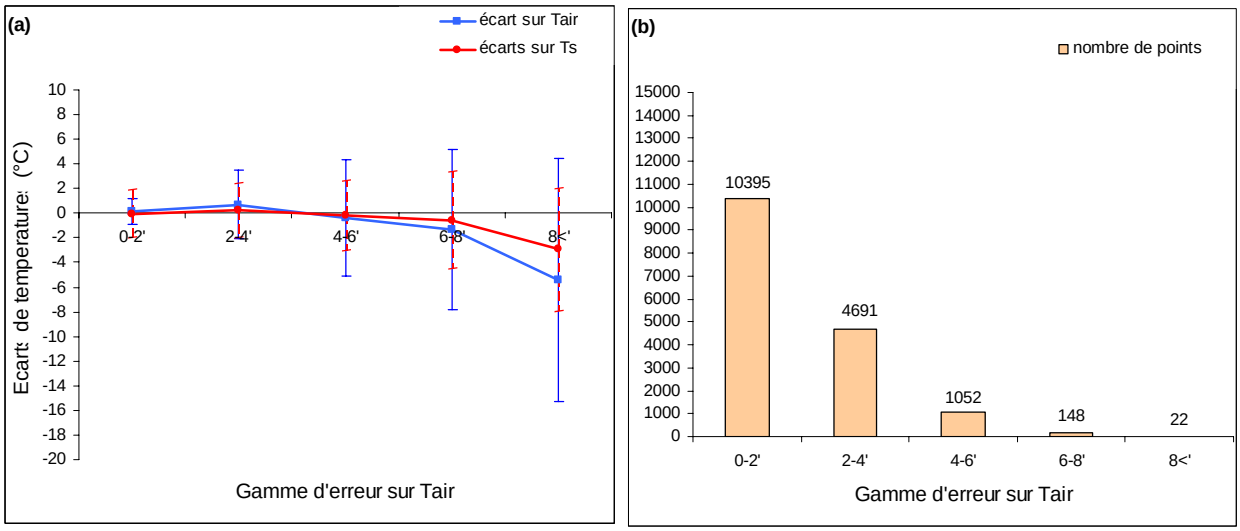


Figure 25. Évolution selon les classes d'erreur des écarts entre observation et prévision pour la température de l'air et la température de surface (a). Nombre d'événements par classe d'erreur (b).

Les résultats de cette méthode sont présentés par la Figure 25. La Figure 25 (a) présente les couples ($\bar{E}_a$; D_a) et ($\bar{E}_s$; D_s) pour chaque classe d'écart sur T_a. L'axe des abscisses indique les cinq classes sur T_a définies précédemment. Sur l'axe des ordonnées, on peut lire la moyenne des écarts sur T_a et T_s pour chaque classe ainsi que les écarts-types associés. La courbe bleue représente l'évolution de $\bar{E}_a$ en fonction des classes. La courbe rouge représente l'évolution de $\bar{E}_s$ en fonction des classes. La Figure 25 (b) présente le nombre d'événements pour chaque classe.

La Figure 25 (b) montre que, dans 98% des cas, l'erreur commise sur la prévision de la température de l'air fournie par le CDM appartient aux deux premières classes, c'est-à-dire que l'erreur sur T_a est inférieure à 4°C.

Pour ces deux classes, [0 ;2[et [2 ;4[, la Figure 25 (a) montre que la moyenne des écarts entre observation et prévision pour T_a et T_s est proche de zéro et que leurs écarts-types associés sont petits.

Pour toutes les autres classes, la moyenne des écarts absolus pour T_a, $|\bar{E}_a|$, est supérieure à celle de T_s, $|\bar{E}_s|$, et plus $|\bar{E}_a|$ est grande et plus $|\bar{E}_s|$ l'est aussi.

Dans le Tableau 22, les valeurs tracées sur la Figure (a) et qui représentent $\bar{E}_a$, D_a, $\bar{E}_s$ et D_s sont reportées en fonction des classes d'erreur sur la prévision de T_a. La première colonne contient les classes, la seconde la moyenne des écarts entre observation et prévision pour la température de l'air, la troisième l'écart-type associé, la quatrième la moyenne des écarts entre observation et prévision pour la température de surface et la cinquième l'écart-type associé.

Classes	$\bar{E}_a$ (°C)	D_a (°C)	$\bar{E}_s$ (°C)	D_s (°C)
[0 ;2[	0,16	1,07	-0,04	1,96
[2 ;4[	0,70	2,77	0,21	2,19
[4 ;6[	-0,38	4,72	-0,16	2,83
[6 ;8[	-1,32	6,54	-0,55	3,95
[8 ;∞[	-5,43	9,90	-2,95	4,95

Tableau 22. Récapitulatif de la distribution des écarts entre observation et prévision pour la température de l'air et la température de surface ainsi que leurs écarts-types associés selon les classes.

Des résultats présentés ci-dessus, on peut conclure que l'écart sur la prévision de la température de surface est étroitement lié à l'erreur commise sur la donnée prévisionnelle de la température de l'air fournie par le CDM. Par conséquent, la qualité de la donnée prévisionnelle de la température de l'air est fondamentale pour l'obtention d'une prévision de T_s satisfaisante. Compte tenu du fait que $|\bar{E}_s|$ est toujours inférieure à $|\bar{E}_a|$, on peut conclure que le modèle amortit les erreurs sur la température de l'air. En effet, pour la classe [8 ;∞[par exemple, la moyenne des écarts de 6°C sur la température d'air ne se traduit que par un écart moyen de 3°C pour la prévision de la température de surface et l'écart-type est aussi plus petit.

4.2.b. Méthode du changement de la valeur de référence

Comme précédemment, la journée hivernale choisie pour sa stabilité météorologique et sa représentativité des conditions hivernales est la journée du 14-02-2003. Les résultats présentés sont ceux de la station du col de la Fageole.

Pour réaliser cette étude, il a été apporté des variations sur la prévision de la température de l'air fournie par le CDM : une première perturbation de 1°C, puis une seconde de 2°C et une dernière de 10°C. Pour chacune de ces variations, le modèle a réalisé un calcul de prévision de la température de surface du revêtement de la chaussée. Les résultats de ces variations ainsi que la prévision de référence réalisée avec les données du CDM non modifiées sont présentés sur la Figure 26. La température de surface calculée à partir des données prévisionnelles du CDM est représentée par la courbe rouge. Les courbes bleue, verte et rose représentent l'évolution de la température de surface calculée avec des variations sur la donnée T_a. Cette figure ne présente pas les températures de surface mesurées.

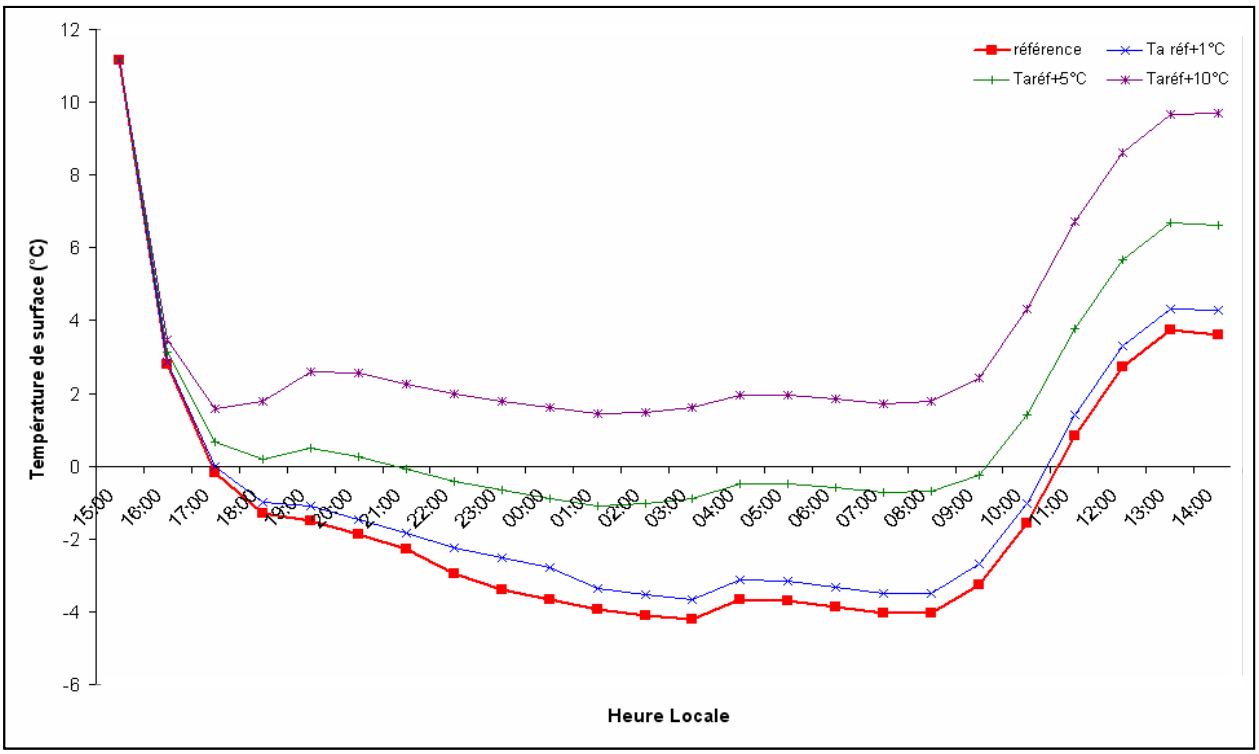


Figure 26. Évolution dans le temps des températures de surface avec et sans variation de T_a.

On observe sur la Figure 26 que plus la perturbation apportée à T_a est grande et plus les courbes d'évolution de T_s sont écartées de la courbe de référence rouge. Cet écart

entre la référence et les T_s perturbées est moins important au démarrage de la prévision puis il augmente en début de la phase nocturne pour se stabiliser durant cette phase.

Les résultats des variations présentés ci-dessus moyennés sur 24 heures et sur les six stations de l'autoroute A75 sont présentés dans le Tableau 23.

$T_{a\,réf} - T_{a\,pert}$ (°C)	$\overline{(T_{s\,réf} - T_{s\,pert})}$ (°C)	Écart-type (°C)
1	-0,53	0,18
5	-2,63	0,80
10	-4,99	1,40

Tableau 23. Écart sur la prévision en fonction de la variation de T_a pour la journée du 14-02-2003 sur les six stations de l'autoroute A75.

Les résultats de ce tableau confirment les observations précédentes, c'est-à-dire que plus la perturbation sur T_a est importante, plus l'écart sur T_s l'est aussi.

Il apparaît même une loi de proportionnalité entre la perturbation apportée à T_a et l'écart sur T_s telle que :

Équation 71 $$\left|T_{s\,réf} - T_{s\,pert}\right| \approx 0{,}5 \times \left|T_{a\,réf} - T_{a\,pert}\right|$$

Cette loi de proportionnalité est illustrée par la Figure 27 représentant l'écart sur T_s en fonction de la perturbation sur T_a.

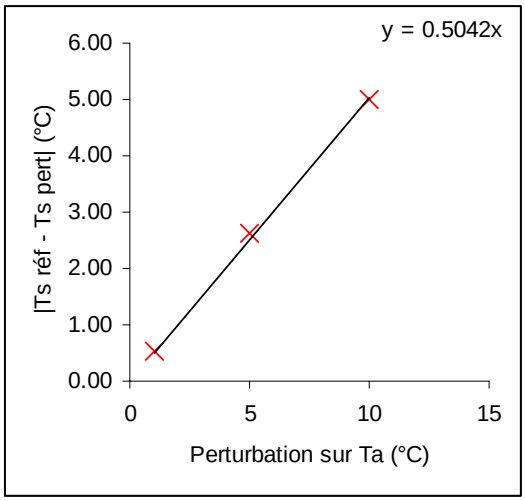


Figure 27. Loi de proportionnalité entre l'écart sur la prévision de la température de l'air et l'écart sur la prévision de la température de surface.

En conclusion, cette étude par la méthode de changement de valeur de référence confirme deux résultats partiellement révélés par l'étude statistique. D'abord, la température de l'air est une donnée de première importance pour la prévision de la température de surface. Ensuite, le modèle réduit les erreurs produites sur la prévision de la température de l'air. Cette réduction se traduit par le fait qu'une erreur de X°C sur la prévision de la température de l'air se répercute par un écart de X/2 °C sur la prévision de la température de surface de la chaussée en sortie du modèle.

4.3. Humidité relative de l'air

L'humidité relative de l'air *hr* est impliquée dans le calcul du rayonnement solaire, du rayonnement atmosphérique infrarouge et du flux de chaleur latente. Nous ignorons cependant son influence sur les prévisions de T_s.

Ce paramètre fait partie des variables d'entrée du modèle. Comme pour T_a, *hr* est une donnée prévisionnelle fournie par le CDM et sur la qualité de laquelle nous n'avons pas de prise. C'est pourquoi il est important d'étudier la sensibilité du modèle à cette variable. Pour cela, la méthode statistique et la méthode de changement de valeur de référence seront utilisées comme il a été fait pour le cas précédent avec la température de l'air.

4.3.a. Méthode statistique

L'étude statistique de l'influence de la variable prévisionnelle *hr* sur la prévision de T_s consiste, comme pour la variable T_a, à étudier la relation entre la qualité de *hr* et la qualité de T_s. Cette relation est définie par les écarts entre l'observation et la prévision E_{hr} et E_s tels que :

Équation 72 $$E_{hr} = hr_{obs} - hr_{pre}$$

Équation 73 $$E_S = T_{Sobs} - T_{Spre}$$

Ces écarts sont moyennés sur l'ensemble des données de la base pour la période 1999-2002.

Il a été défini huit classes pour $|E_{hr}|$: [0 ;5[, [5 ;10[, [10 ;15[, [15 ;20[,[20 ;25[,[25 ;30[,[30 ;35[, [35 ;∞[. Pour chacune de ces classes le calcul de $\bar{E}_{hr}$ et D_{hr} a été réalisé. Ainsi, une bonne prévision de hr est définie par un écart moyen $\bar{E}_{hr}$ proche de zéro et un écart-type D_{hr} le plus petit possible.

Pour ces classes, le calcul des E_s, $\bar{E}_s$ et D_s correspondant a été réalisé et, de la même manière, une bonne prévision de T_s est définie par un écart moyen $\bar{E}_s$ proche de zéro et un écart-type D_s le plus petit possible.

Les résultats de cette méthode sont présentés par la Figure 28. La Figure 28 (a) présente les couples ($\bar{E}_{hr}$; D_{hr}) et ($\bar{E}_s$; D_s) pour chaque classe d'écart sur hr. L'axe des abscisses indique les huit classes sur hr définies précédemment. Sur l'axe des ordonnées de droite, on peut lire la moyenne des écarts sur hr pour chaque classe. Sur l'axe des ordonnées de gauche, on peut lire la moyenne des écarts sur T_s pour chaque classe. La courbe bleue représente l'évolution de $\bar{E}_{hr}$ en fonction des classes. La courbe rouge représente l'évolution de $\bar{E}_s$ en fonction des classes. La Figure 28 (b) présente le nombre d'événements pour chaque classe.

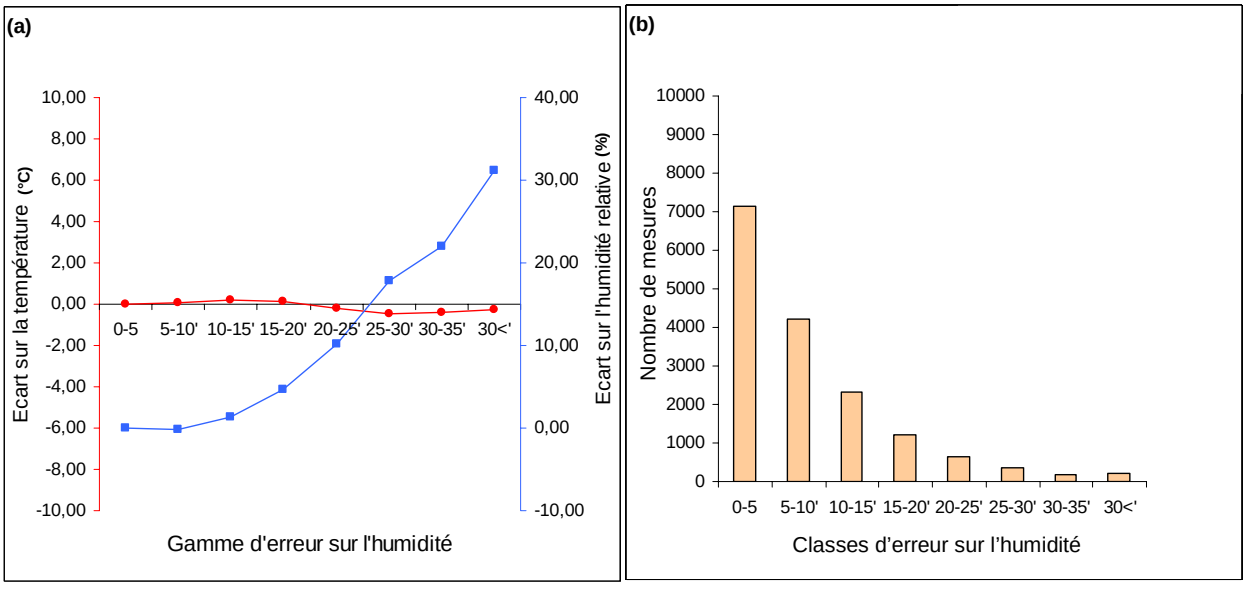


Figure 28. Évolution selon les classes d'erreur des écarts entre observation et prévision pour l'humidité relative de l'air et la température de surface (a). Nombre d'événements par classe d'erreur (b).

La Figure 28 (b) montre que dans 80% des cas, l'erreur commise sur la prévision de l'humidité relative de l'air fournie par le CDM appartient aux trois premières classes, c'est-à-dire que l'erreur sur *hr* est inférieure à 15%.

La Figure 28 (a) montre que, quelle que soit la classe d'erreur sur l'humidité relative de l'air, l'écart moyen entre observation et prévision de la température de surface de la chaussée est inférieur à 1°C en valeur absolue.

Les valeurs reportées dans le Tableau 24 représentent aussi l'écart-type en fonction des classes d'erreur sur la prévision de *hr*.

Classes	$\bar{E}_{hr}$ (°C)	D_{hr} (°C)	$\bar{E}_{s}$ (°C)	D_{s} (°C)
[0 ;5[	0,02	2,59	-0,02	2,08
[5 ;10[	-0,24	7,13	0,06	2,07
[10 ;15[	1,41	11,97	0,17	2,16
[15 ;20[	4,59	16,46	0,15	2,32
[20 ;25[	10,22	19,67	-0,20	2,38
[25 ;30[	17,80	20,54	-0,45	2,39
[30 ;35[	22,04	23,19	-0,39	2,50
[35 ;∞[	31,15	30,64	-0,28	2,09

Tableau 24. Récapitulatif de la distribution des écarts entre observation et prévision pour l'humidité relative de l'air et la température de surface ainsi que leurs écarts-types associés selon les classes.

Les résultats de l'étude statistique nous autorisent à conclure que la variable humidité relative de l'air, malgré son implication dans le calcul de grandeurs aussi importantes que le rayonnement solaire global et le rayonnement atmosphérique ne constitue pas un paramètre dont l'influence est significative.

4.3.b. Méthode de changement de valeur de référence

De la même manière que pour la température de l'air, nous avons travaillé sur la journée hivernale du 14-02-2003. Les données présentées sont toujours celle de la station du col de la Fageole.

Pour réaliser cette étude, il a été apporté des variations sur la prévision de l'humidité relative de l'air fournie par le CDM : une première perturbation de 5%, puis une seconde de 10% et une dernière de 20%. Nous avons fait fonctionner le modèle pour chacune de ces variations. Les résultats de ces variations ainsi que la prévision de référence réalisée avec les données du CDM non modifiées sont présentés sur la Figure 29 en fonction de l'heure locale.

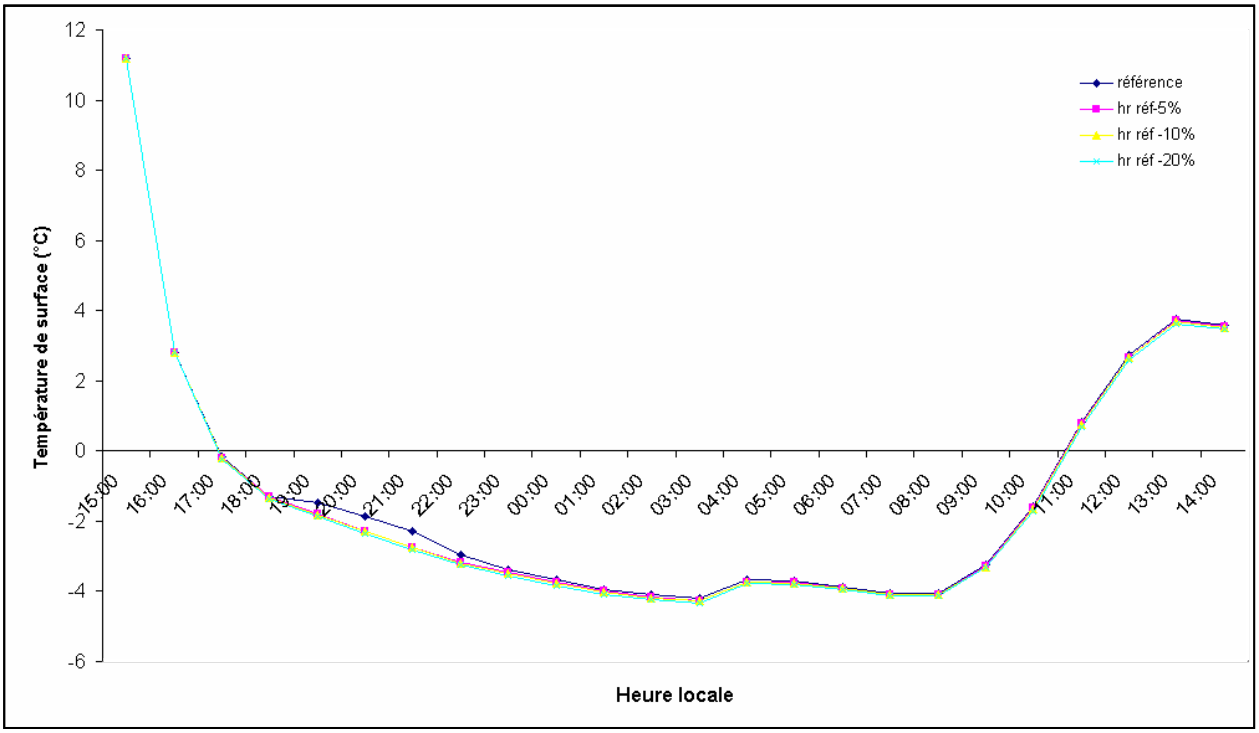


Figure 29. Évolution dans le temps des températures de surface avec et sans variation de *hr*.

Pas plus que par la méthode statistique, nous n'observons ici une influence de la donnée humidité relative sur la prévision de la température de surface. Cette observation est confirmée par les résultats du Tableau 25 qui représente la moyenne sur 24 heures et sur les six stations de l'autoroute A75 des résultats de perturbation de l'humidité relative.

$\mathbf{hr_{réf} - hr_{pert}}$	$\overline{(T_{s\,réf} - T_{s\,pert})}$ (°C)	Écart-type (°C)
5%	0,09	0,12
10%	0,12	0,12
20%	0,17	0,13

Tableau 25. Écart sur la prévision en fonction de la variation de *hr* pour la journée du 14-02-2003 sur les six stations de l'autoroute A75.

En conclusion, on peut déduire que la variable humidité relative n'a pas d'influence notable sur la qualité de la prévision de la température de surface.

4.4. Nébulosité

La nébulosité *n* représente la portion de couverture nuageuse. Elle est impliquée dans le calcul du rayonnement solaire et du rayonnement atmosphérique infrarouge. Nous ignorons cependant son influence exacte sur les prévisions de T_s.

Ce paramètre fait partie des variables d'entrée du modèle au même titre que T_a et *hr*. C'est une donnée prévisionnelle fournie par le CDM en octa puis transformée en décimale. Il est donc important d'étudier la sensibilité du modèle à cette variable.

Contrairement à T_a et *hr,* nous ne procèderons pas à une étude statistique de ce paramètre car nous ne disposons pas de données d'observation pour la nébulosité. Nous nous contenterons de la méthode de changement de valeur de référence.

De la même manière que pour T_a et *hr,* nous avons travaillé sur la journée hivernale du 14-02-2003. Les résultats présentés sont ceux de la station du col de la Fageole.

Pour réaliser cette étude, il a été apporté des variations sur la prévision de la nébulosité fournie par le CDM : une première perturbation de -4 octas, puis une seconde de -2 octas, une troisième de 2 octas et une dernière de 4 octas. Nous avons fait fonctionner le modèle pour chacune de ces variations. Les résultats de ces variations ainsi que la prévision de référence (4 octas) réalisée avec les données du

CDM non modifiées sont présentés sur la Figure 30. La température de surface calculée à partir des données prévisionnelles du CDM est représentée par la courbe rouge. Les courbes bleue, verte, rose et orangée représentent l'évolution de la température de surface calculée avec des variations sur la donnée *n*.

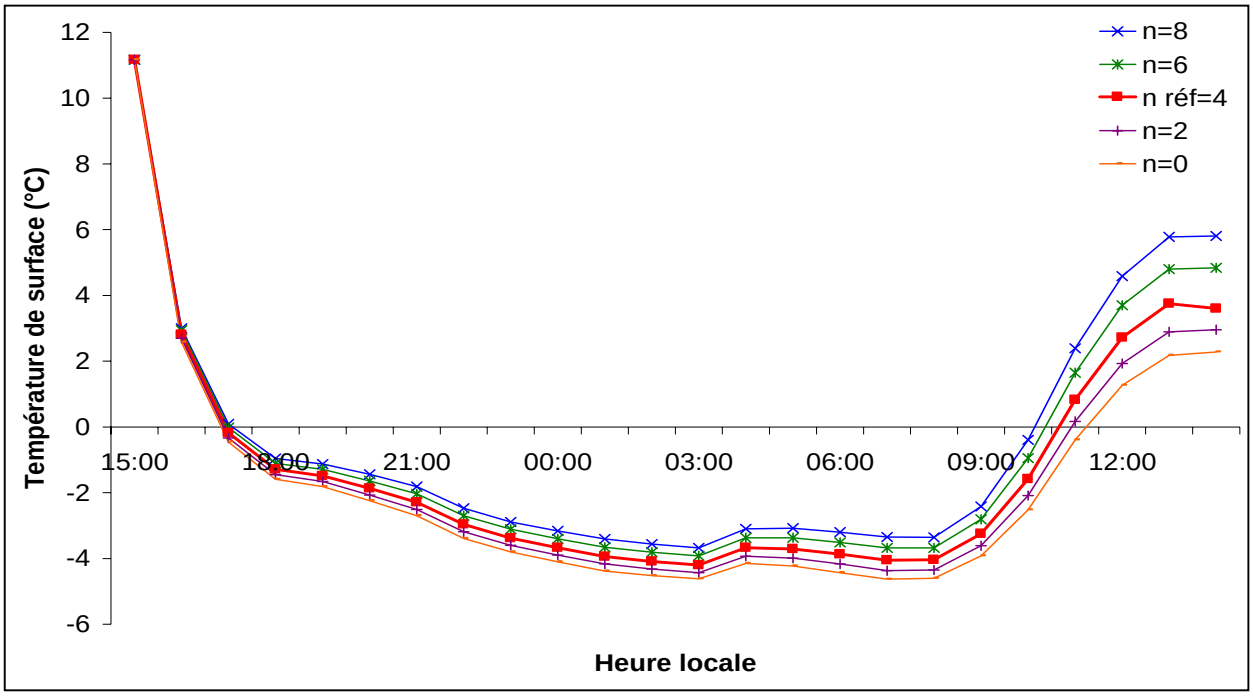


Figure 30. Évolution dans le temps des températures de surface avec et sans variation de *n*.

La Figure 30 montre que les variations apportées à la nébulosité influence la prévision de la température de surface. L'écart entre la prévision de référence (correspondant à n=4/8) et les prévisions avec perturbation est négligeable en début de prévision et croît légèrement et régulièrement jusqu'à la fin de la période de prévision. Ainsi, une perturbation de 2 octas sur la nébulosité produit, en début de prévision, un écart sur T_s de quelques dixièmes de degré et en fin de prévision de 1°C environ.

Ces résultats moyennés sur 24 heures et sur les six stations de l'autoroute A75 sont présentés dans le Tableau 26 et confirment l'influence non négligeable de la nébulosité sur la prévision de T_s.

n	$\overline{(T_{s\,réf} - T_{s\,pert})}$ (°C)	Écart-type (°C)
0	-0,79	0,58
2	-0,36	0,27
6	0,75	0,51
8	0,29	0,18

Tableau 26. Écart sur la prévision en fonction de la variation de *n* pour la journée du 14-02-2003 sur les six stations de l'autoroute A75.

5. PRÉPONDÉRANCE DES PARAMÈTRES

Suite à l'étude de sensibilité du modèle aux différentes variables d'entrée, il convient de déterminer la prépondérance des paramètres permettant le calcul de la température de surface prévisionnelle. Selon le bilan d'énergie, il entre en jeu diverses grandeurs énergétiques qui elles-mêmes dépendent des variables météorologiques d'entrée du modèle. Ces grandeurs énergétiques sont : le rayonnement solaire global R_g, le rayonnement atmosphérique infrarouge R_{at}, le rayonnement solaire réfléchi $A.R_g$, le rayonnement infrarouge de la surface de la chaussée R_{surf}, la conduction thermique dans le sol K, le flux de chaleur sensible H et le flux de chaleur latente LE. Ces grandeurs énergétiques ont une influence plus ou moins importante sur le bilan d'énergie et donc sur la prévision de la température de surface du revêtement de la chaussée.

La Figure 31 présente deux cas de figure concrets de bilan d'énergie de surface du revêtement de la chaussée. L'un de jour (Figure a) et le second de nuit (Figure b). Ces cas de figure sont présentés pour la station de Sal Bas pour la journée du 14-02-2003 à 16H00 et à 23H00 dans les conditions météorologiques décrites par le Tableau 27.

Les différentes grandeurs énergétiques échangées à la surface sont indiquées sur l'axe des abscisses et sont représentées par les barres bleues. La hauteur des barres indique la valeur de ces termes et se lit sur l'axe des ordonnées en W/m^2. Une valeur

positive indique un apport d'énergie alors qu'une valeur négative indique une perte d'énergie.

	Jour (16H00)	Nuit (23H00)
T_a	5°C	-3°C
T_s	10°C	-5°C
hr	70%	70%
u_a	5 m/s	5 m/s
$T_{z=15cm}$	8°C	0°C
R_g	370 W/m²	0 W/m²
R_{at}	160W/m²	150 W/m²

Tableau 27. Conditions météorologiques à la date du 14-02-2003 - Station de Sal Bas.

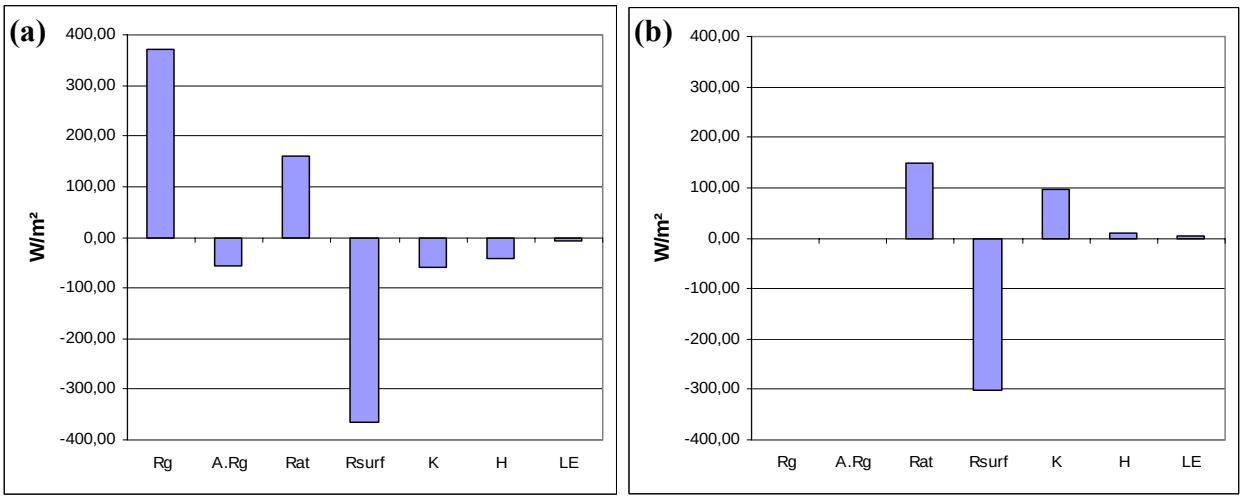


Figure 31. Bilan énergétique à l'interface chaussée-atmosphère de jour (a) et de nuit (b). Station de Sal Bas journée du 14-02-2003.

La Figure 31 (a) montre que pour le bilan d'énergie de jour les apports se font par le biais des rayonnements global solaire et atmosphérique infrarouge. Les autres termes constituent des pertes d'énergie. La contribution du rayonnement solaire global est largement prépondérante. Viennent ensuite les rayonnements infrarouge de surface et atmosphérique. La portion de rayonnement solaire réfléchie par la surface est de l'ordre de 50W/m^2 et est à peu près équivalente aux pertes dues à la conduction dans le sol et au flux de chaleur sensible. Le flux de chaleur latente est quant à lui négligeable.

La Figure 31 (b) montre que, de nuit, le rayonnement solaire global étant nul le terme prépondérant dans les échanges est la perte d'énergie par la voie du rayonnement de surface infrarouge qui constitue à lui seul le terme de déperdition. En effet, de nuit, les rôles de la conduction thermique dans le sol et des flux de chaleur sensible et latente s'inversent et ces grandeurs constituent un apport d'énergie. Il est à noter cependant, que l'apport de la chaleur sensible et de la chaleur latente est insignifiant devant celui du rayonnement atmosphérique infrarouge et de la conduction. Le faible écart entre T_a et T_s explique la faible influence de la chaleur sensible.

Ces observations permettent de déduire que de jour comme de nuit les termes les plus importants pour le bilan d'énergie, et donc pour la prévision de la température de surface, sont les termes de rayonnement : les rayonnements solaire global, atmosphérique infrarouge et de surface infrarouge pour la période diurne et uniquement le rayonnement infrarouge atmosphérique et le rayonnement de surface pour la période nocturne.

Compte tenu du fait que le rayonnement de surface infrarouge est bien défini dans le modèle, son influence sur la performance de la prévision de la température de surface ne sera pas mise en cause. Par contre, les rayonnements solaire global et atmosphérique infrarouge étant définis avec des hypothèses réductrices, leurs rôles sur la performance seront plus importants. Notons que le rayonnement atmosphérique dépend fortement de la température de l'air et de la couverture nuageuse et que le rayonnement solaire quant à lui dépend aussi de la quantité de nuages présents. L'importance de ces deux paramètres sur la sensibilité du modèle a été montrée précédemment.

6. CONCLUSIONS DU CHAPITRE

Les données recueillies sur l'autoroute A75 durant les périodes hivernales de 1993 à 2002 ont été organisées en une base de données. Seules les périodes hivernales de 1999 à 2002 on été utilisées pour l'étude de la sensibilité du modèle aux paramètres atmosphériques et de chaussée.

Pour les paramètres atmosphériques, nous avons montré que les éléments les plus sensibles sont la température de l'air T_a et la nébulosité n (intervenant dans le calcul de R_g, R_{at} et LE) fournies par le CDM.

Pour les paramètres de chaussée seule la diffusivité thermique k (intervenant dans le calcul de R_{surf}) influe sensiblement sur la prévision de T_s.

CHAPITRE 5 PERFORMANCES ET AMÉLIORATIONS

Le chapitre précédent a présenté l'étude de sensibilité du modèle et il ressort de cette étude que la température de l'air et la nébulosité sont les deux principaux paramètres qui influencent la prévision.

Ce chapitre s'attache à l'étude de la performance du modèle dans différents cas de figures tels que l'heure, l'état de la chaussée ou le moment de l'année où se fait la prévision et ce, afin de définir les limites du modèle.

Compte tenu des problèmes qui auront été soulevés par cette étude, des pistes exploratoires pour des solutions possibles seront indiquées.

1. PERFORMANCES

La performance du modèle sera étudiée sur la base des grandeurs E, $\bar{E}$, et D définies précédemment, E étant l'écart entre l'observation et la prévision, $\bar{E}$ la moyenne de E pour un échantillon de prévisions et D l'écart-type associé. Une prévision performante implique un écart E petit (E<2°C). Un échantillon de bonnes prévisions implique un écart moyen $\bar{E}$ proche de zéro et un écart-type D autour de la valeur moyenne le plus petit possible (de l'ordre de 1,5°C). Actuellement, et en tenant compte de toutes les données recueillies sur l'autoroute A75 pendant la période 1999-2002, le modèle présente à écart moyen $\bar{E}$=0,05°C et un écart type D=3,23°C. Cette performance est toutefois variable selon l'heure, la date ou le lieu de prévision.

Dans un premier temps, le modèle sera confronté à une prévision par persistance. Par la suite les prévisions seront comparées aux observations, d'abord dans un cadre général puis dans des conditions particulières d'heure, de date ou d'état de la surface de la chaussée afin de définir les limites du modèle.

Pour finir, les résultats du modèle seront comparés aux résultats du modèle ISBA-ROUTE développé par Météo-France et qui est actuellement en phase de mise au point.

1.1. Confrontation du modèle à la prévision par persistance

Dans un premier temps, le modèle a été confronté à un modèle de prévision par persistance. La prévision par persistance consiste à affecter à la prévision de température de surface du jour *J* à l'heure *H* la mesure de cette température du jour *J-1* à l'heure *H*. En d'autres termes cela revient à donner chaque jour comme prévision, la température de surface mesurée la veille à la même heure et au même lieu.

Cette confrontation entre les deux modes de prévision est réalisée grâce aux écarts entre prévision et observation $|E_{modèle}|$ et $|E_{persistance}|$, ainsi que leurs moyennes $|\bar{E}_{modèle}|$ et $|\bar{E}_{persistance}|$ et leurs écarts-types $D_{modèle}$ et $D_{persistance}$, sachant que $E_{persistance} = T_{Sobs}\ (J) - T_{Sobs}\ (J\text{-}1)$.

Les moyennes horaires des écarts et les écarts-types pour la période 1999-2002 pour les six stations ont été reportés respectivement sur la Figure 32 et sur la Figure 33.

La Figure 32 représente l'évolution de $|\bar{E}_{modèle}|$ et $|\bar{E}_{persistance}|$ sur 24 heures. L'axe des abscisses indique l'échelle de temps en heure locale et l'axe des ordonnées indique les moyennes horaires des écarts absolus entre observation et prévision pour les deux modes. La courbe rose indique l'évolution de $|\bar{E}_{modèle}|$ alors que la bleue indique celle de $|\bar{E}_{persistance}|$.

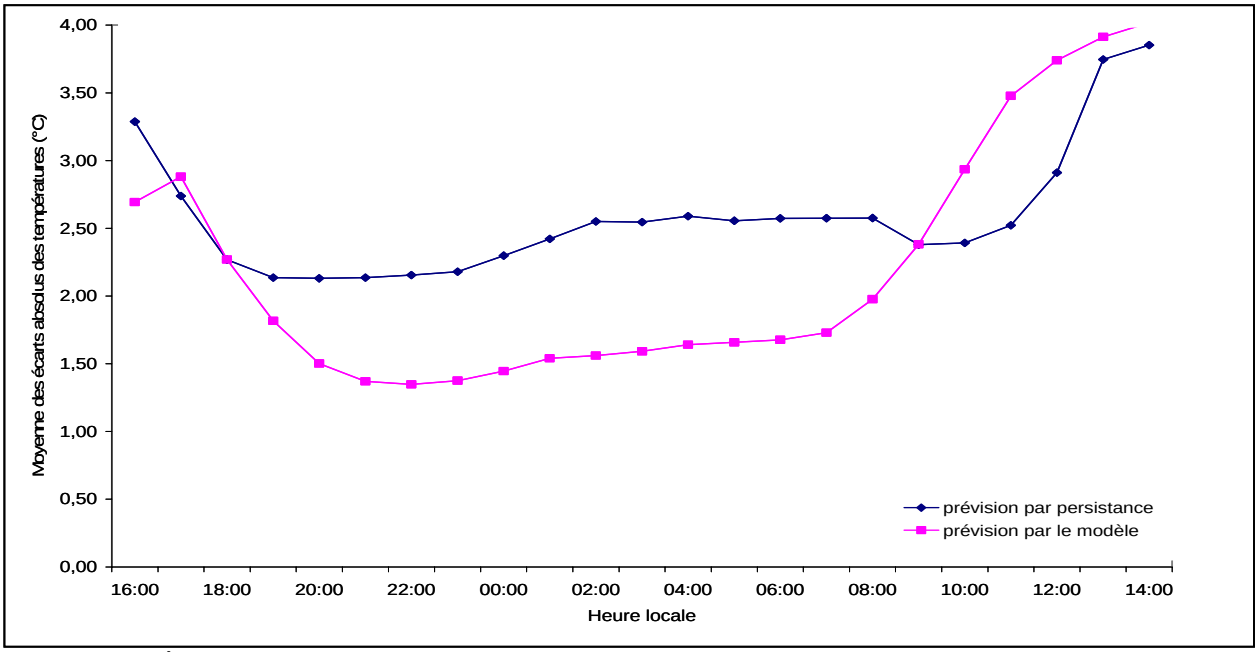


Figure 32. Évolution de $|\bar{E}_{modèle}|$ du modèle et de $|\bar{E}_{persistance}|$ de la prévision par persistance sur 24 heures. Autoroute A75 périodes hivernales 1999-2002.

L'observation de la Figure 32 montre que l'évolution de $|\bar{E}_{persistance}|$ se décompose en trois phases : la première est une phase où $|\bar{E}_{persistance}|$ est décroissant, durant la seconde qui s'étale entre 18H00 et 11H00 $|\bar{E}_{persistance}|$ oscille autour de 2,5°C et durant la dernière phase $|\bar{E}_{persistance}|$ croît rapidement. Quelle que soit la phase $|\bar{E}_{persistance}|$ est toujours supérieur à 2°C. L'évolution de $|\bar{E}_{modèle}|$ se décompose également en trois étapes qui correspondent aux trois phases décrites au chapitre 4 (diurne 1, nocturne et diurne2). Durant la première phase la prévision n'est pas fiable car l'écart est relativement grand (>2°C). Pendant toute la période nocturne (de 19H00 à 7H00) $|\bar{E}_{modèle}|$ est inférieur à 2°C ce qui compte tenu de l'incertitude sur la mesure de la température de surface est parfaitement admissible. À partir de 7H00 $|\bar{E}_{modèle}|$ augmente rapidement ; la prévision par le modèle se détériore.

La Figure 33 représente l'évolution de $D_{modèle}$ et $D_{persistance}$ sur 24 heures. L'axe des abscisses indique l'échelle de temps et l'axe des ordonnées indique les écarts-types de la moyenne des écarts absolus pour les deux modes de prévision. La courbe rose indique l'évolution de $D_{modèle}$ alors que la bleue indique celle de $D_{persistance}$.

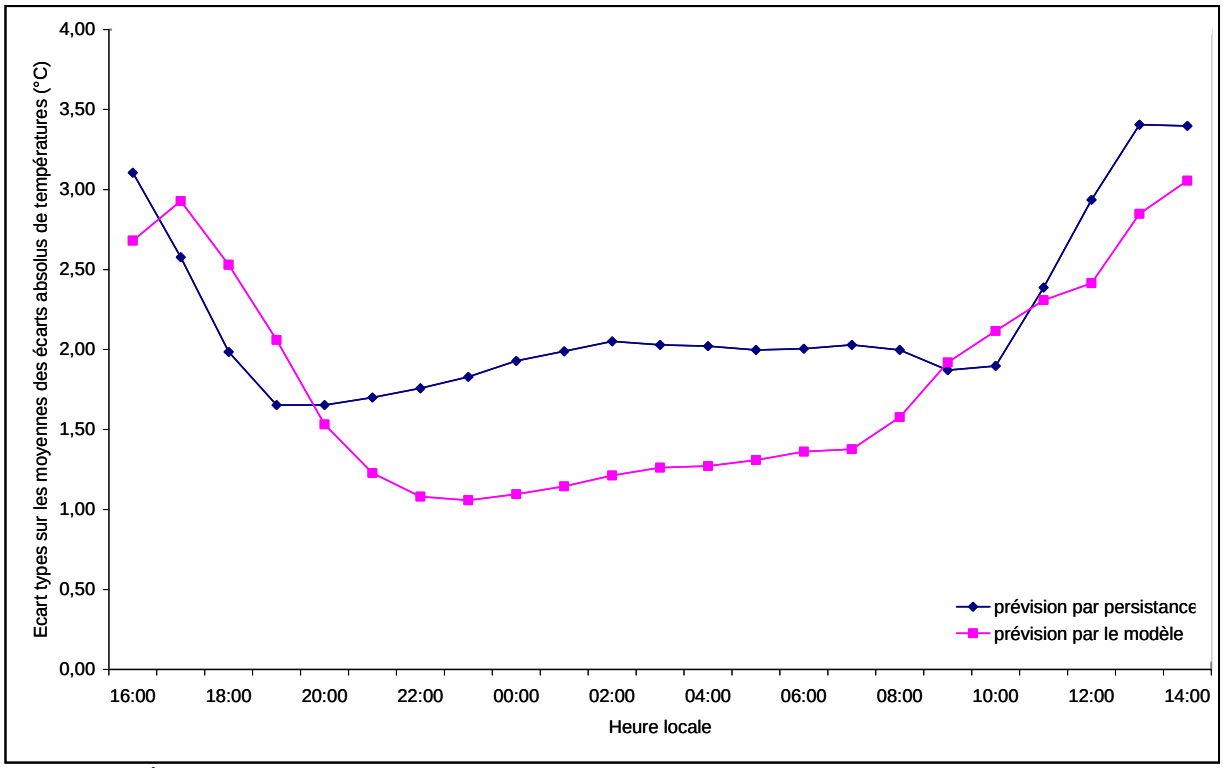


Figure 33. Évolution de $D_{modèle}$ du modèle et de $D_{persistance}$ de la prévision par persistance sur 24 heures. Autoroute A75 périodes hivernales 1999-2002.

L'observation de la Figure 33 montre que la dispersion des moyennes des écarts du modèle, représentée par $D_{modèle}$, est supérieure à celle de la prévision par persistance en début de prévision. En phase nocturne $D_{modèle}$ oscille entre 1°C et 1,5°C, tandis que $D_{persistance}$ est toujours supérieur à 1,5°C. Lors de la dernière phase les deux modes de prévision se comportent de manière quasi identique et la dispersion croît.

Les résultats présentés sur la Figure 32 et la Figure 33 sont résumés dans le Tableau 28.

Heures	$\bar{E}_{modèle}$ (°C)	$D_{modèle}$ (°C)	$\bar{E}_{persistance}$ (°C)	$D_{persistance}$ (°C)
16H00	2,69	2,68	3,29	3,11
19H00	1,82	2,06	2,14	1,65
22H00	1,35	1,08	2,15	1,76
01H00	1,54	1,14	2,42	1,99
04H00	1,64	1,27	2,59	2,02
07H00	1,73	1,38	2,57	2,03
10H00	2,94	2,12	2,39	1,90
13H00	3,91	2,85	3,75	3,41

Tableau 28. Comparaison des écarts moyens et écarts types entre observation et prévision pour le modèle et la prévision par persistance pour les six stations de l'autoroute A75 période 1999-2002.

La performance comparée du modèle et de la prévision par persistance se fait grâce à la conjugaison des moyennes des écarts absolus et des écarts-types de cette moyenne. Compte tenu qu'en phase nocturne la prévision par le modèle offre une moyenne des écarts et un écart-type inférieurs à ceux de la prévision par persistance, la prévision par le modèle est plus performante et plus fiable que la prévision par persistance.

1.2. Confrontation aux observations

1.2.a. Performances générales

La comparaison des températures est réalisée pour chaque heure et chaque station en utilisant la moyenne des écarts et l'écart-type entre les valeurs mesurées par les capteurs de température de surface et les prévisions du modèle. Un taux τ de prévisions correctes de situations où $T_s \leq 0°C$ est défini. Une prévision de ce critère est dite correcte chaque fois que, lorsque la température de surface mesurée était

inférieure ou égale à 0°C, le modèle avait effectivement prévu une température de surface négative. Ce taux est calculé de façon horaire. Ce chiffre est donc sous-estimé pour l'exploitant qui, lui, raisonne sur 24 heures de prévisions. Les résultats de cette confrontation sont indiqués pour chacun des six sites dans le Tableau 29 pour les hivers couvrant la période 1999 à 2002. La première colonne de ce tableau indique le nom des stations. La seconde colonne indique la moyenne des écarts entre observation et prévision. La troisième colonne indique l'écart-type associé. La dernière colonne indique le taux de situations où $T_s \leq 0°C$ détectées seulement durant la phase nocturne contrairement aux autres colonnes.

Station	$\bar{E}$ (°C)	D (°C)	τ nocturne
La Violette	-1.19	2.82	67,31%
Sal Bas	-0.51	2.99	72,17%
La Fageole	0.17	2.83	77,44%
Saint Flour	-0.16	3.36	70,16%
Garabit	1.79	3.28	91,11%
Baraque du roc	0.28	3.30	79,63%
Total	**0.06**	**3.10**	**75,82%**

Tableau 29. Performance générale du modèle par station. Autoroute A75 période 1999-2002.

Le modèle donne une moyenne des écarts entre la mesure de la température de surface et la prévision calculée sur toute la période 1999-2002 compris entre –1,2°C et 1,8°C pour toutes les stations.

La performance de la prévision varie légèrement d'une station à l'autre, ceci étant dû aux différents environnements atmosphériques, géographiques et topologiques des sites d'implantation des stations. Cependant les résultats sont, de manière générale, encourageants. Le résultat moyenné sur les 6 stations montre que la moyenne des écarts des six stations est de 0,06°C et que l'écart-type est de 3,10°C.

Le taux de prévision des situations nocturnes de température de surface négative ou nulle est compris entre 67% et 92% selon les sites d'observation.

En terme de moyenne des écarts et d'écart-type, les prévisions au site du col de la Fageole sont les plus performantes alors qu'au niveau du viaduc de Garabit elles sont les moins bonnes.

En moyenne sur les six stations, le modèle prévoit correctement 75% des situations horaires nocturnes où $T_s \leq 0°C$.

1.2.b. Performances selon l'heure

Comme il a été vu au CHAPITRE 3, il faut distinguer trois périodes selon qu'on se trouve dans la première phase diurne, la phase nocturne ou la seconde phase diurne. Ce paragraphe s'intéresse à l'influence de cette partition temporelle sur la performance du modèle. Pour ce faire, les observations de la température de surface et les prévisions sont directement confrontées heure par heure.

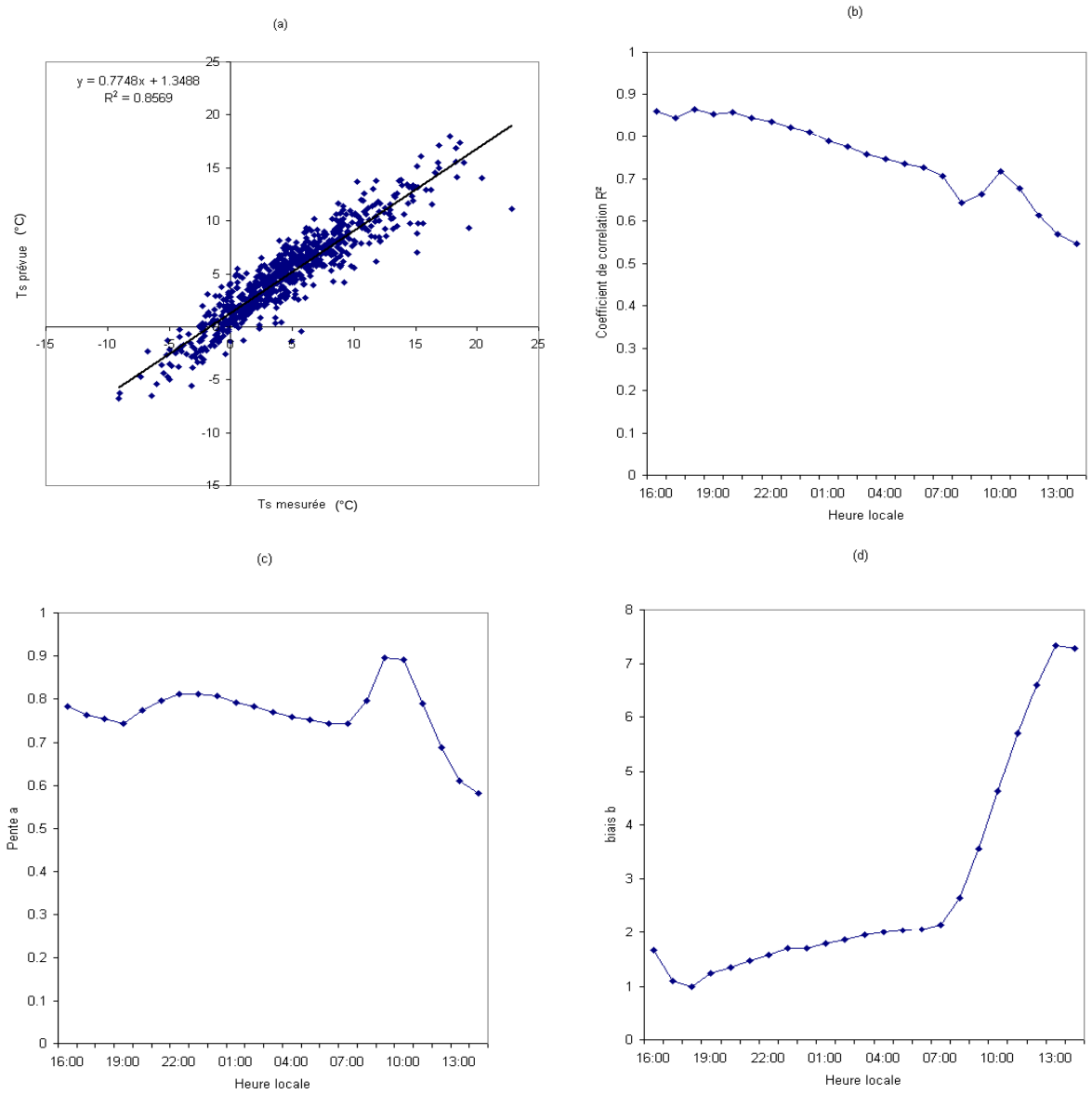


Figure 34. (a) Température de surface prévue en fonction de la température mesurée + la droite de meilleur ajustement. (b) Évolution du coefficient de corrélation sur 24 heures. (c) Évolution de la pente 'a' de la droite la plus probable sur 24 heures. (d) Évolution du biais systématique 'b' sur 24 heures. Autoroute A75 période 1999-2002.

La Figure 34 (a) représente cette confrontation pour 22H00 toutes stations et tous hivers confondus pour la période 1999-2002. En abscisse de cette figure est reportée la température de surface mesurée et en ordonnée la température de surface prévue. Idéalement on devrait obtenir un nuage de points resserrés autour de la droite de pente 1 signifiant que $T_{Sobs} = T_{Sprev}$. Sur la figure a été reportée l'équation $y = a.x + b$ de la droite de régression linéaire ainsi que le coefficient de corrélation R^2. Le coefficient *a* représente la pente de la droite et le coefficient *b* est l'ordonnée à l'origine. Lorsque la pente *a* est de l'ordre de 1 cette ordonnée constitue un biais systématique. Plus la prévision est performante et plus le coefficient *a* est proche de 1, le coefficient *b* de 0 et le R^2 de 1.

Cette étude a été réalisée pour toutes les heures et les résultats sont présentés sur les Figure 34 (b), (c) et (d).

La Figure 34 (b) représente l'évolution en fonction du temps du coefficient de corrélation R^2. La Figure 34 (c) représente l'évolution en fonction du temps de la pente *a* de la droite de la régression. Enfin la Figure 34 (d) représente l'évolution en fonction du temps de l'ordonnée à l'origine *b*. Pour ces trois dernières figures, l'heure locale est représentée en abscisse et les valeurs prises par les trois grandeurs R^2, *a* et *b* sont représentées en ordonnée.

La Figure 34 (a) montre pour 22H00 un biais entre l'observation et la prévision de l'ordre de 1,4°C et une pente *a* de l'ordre de 0,80. Le coefficient de corrélation est supérieur à 0,85. L'essentiel des températures de surface est compris entre –5°C et 10°C sur la période hivernale. Pour les plus fortes températures il y a plus de prévisions de mauvaise qualité.

Sur la Figure 34 (b), apparaissent les trois phases décrites ci-dessus. Une première phase diurne qui dure entre 16H00 et 19H00 où le coefficient de corrélation est stable et de l'ordre de 0,85. La phase nocturne qui dure jusqu'à 07H00 du matin et durant laquelle le coefficient de corrélation se dégrade lentement pour ne plus atteindre que 0,7. Durant la seconde phase diurne qui se prolonge jusqu'à la fin de prévision, le coefficient de corrélation est irrégulier.

La Figure 34 (c) montre également les trois phases. La première phase diurne montre un coefficient *a* en léger déclin. La phase nocturne montre que ce coefficient est relativement stable durant la nuit autour d'une valeur de 0,8. Et la seconde phase diurne montre un coefficient *a* irrégulier.

Sur la Figure 34 (d) apparaissent très clairement les trois phases. La première phase diurne montre que le biais *b* est en diminution au commencement de la prévision. La phase nocturne montre que le biais augmente de manière régulière mais peu importante durant la nuit. En début de nuit le biais est de 1°C et en fin de nuit il est de 2°C. La dernière phase qui est la seconde phase diurne montre un accroissement important du biais systématique *b*.

La Figure 34 permet de conclure que la prévision durant la seconde phase diurne est de médiocre qualité, mais que cette prévision est relativement stable durant la phase nocturne malgré une légère et régulière décroissance de la performance. Cette décroissance est due au cumul d'erreurs du modèle au cours du temps.

Nous obtenons pour la période considérée (1999-2002) et pour chaque heure de la journée une série d'écart entre la température de surface observée et la température de surface prévue par le modèle. Nous souhaitons montrer que ces écarts sont répartis selon une loi normale. Pour ce faire nous avons fait correspondre à chaque valeur E_i de la variable (borne supérieur des classes) la valeur $F_0(E_i)$ représentant la fréquence cumulée normalisée des E_i. On a ainsi obtenu les points M_i de coordonnées E_i, $F_0(E_i)$, reportés sur le papier Gausso-Arithmétiquede la Figure 35. Les points M_i étant approximativement alignés, on peut légitimement admettre l'ajustement de la loi normale à la série observée.

La Figure 35 représente la fréquence cumulée normalisée des écarts entre température prévue et observée en fonction des classes d'écarts et ce pour 22h00 toutes les années et toutes les stations confondues. Cette figure permet de déduire que les écarts entre prévision et observation sont répartis d'égale manière autour de la valeur moyenne qui, pour 22H00, est proche de 0°C. Cette répartition se fait suivant une gaussienne. 68,3% des écarts seront contenus dans un intervalle de deux écart-types de largeur autour de la valeur moyenne. Comme cet écart-type est assez resserré, ceci laisse présager une faible dispersion des écarts autour de la valeur moyenne. Cette méthode appliquée aux autres heures indique une distribution suivant une loi normale des écarts entre prévision et observation.

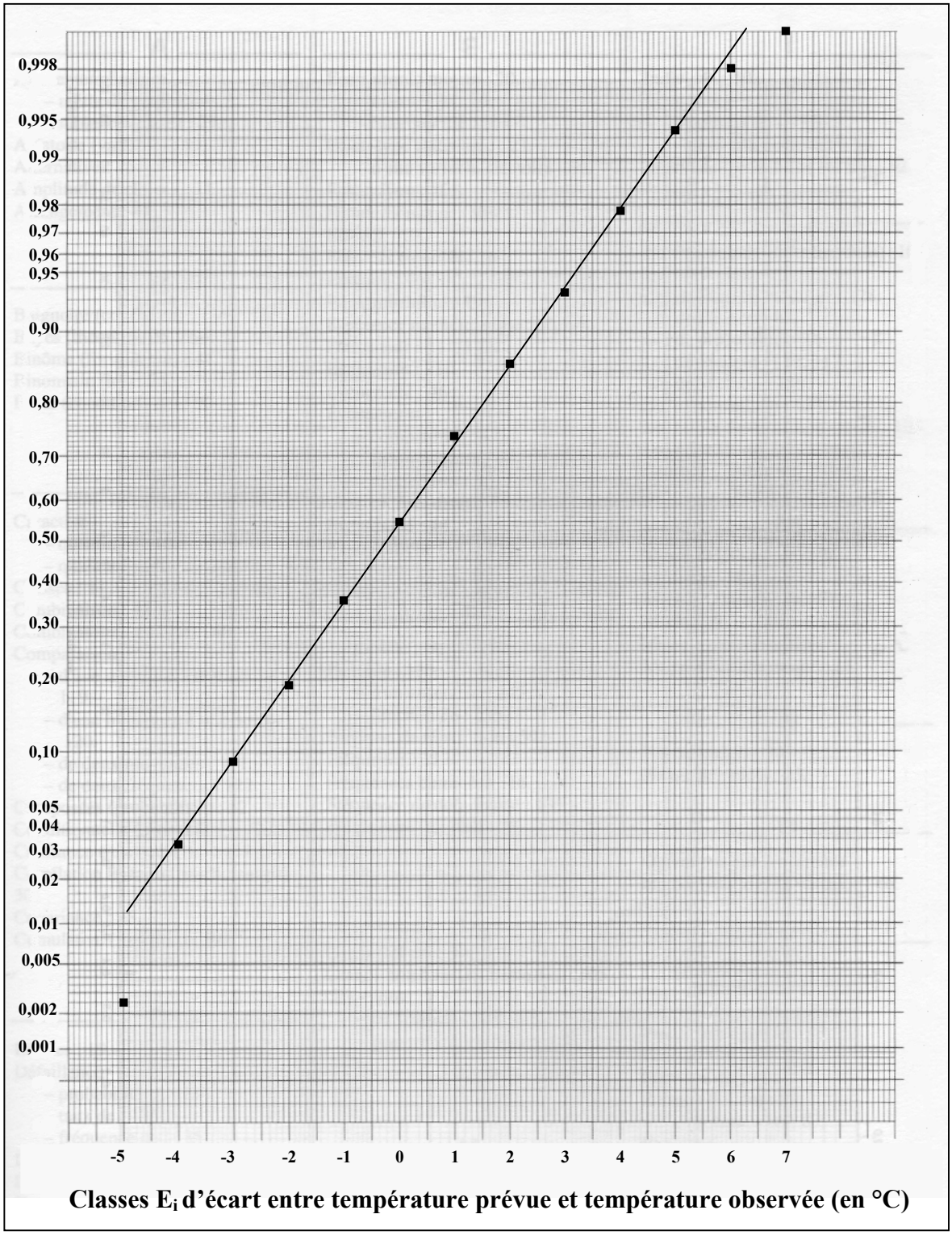


Figure 35 Fréquence cumulée normalisée des écarts E_i entre la température de surface observée et la température de surface prévue en fonction des classes d'écart et ce pour 22h00 pour la période 1999-2002 toutes stations confondues.

Cette conclusion est confirmée par les résultats de la Figure 36. Cette figure représente pour la période hivernale 1999-2002 l'évolution selon l'heure de la moyenne des écarts entre la température de surface observée et la température prévue. L'heure locale est reportée selon l'axe des abscisses et la moyenne des écarts ainsi que l'écart-type de cet écart sont représentés par l'axe des ordonnées. La courbe rose représente l'évolution de la moyenne des écarts. Les barres noires qui encadrent chaque écart moyen indiquent un intervalle d'une fois l'écart-type autour de la valeur moyenne.

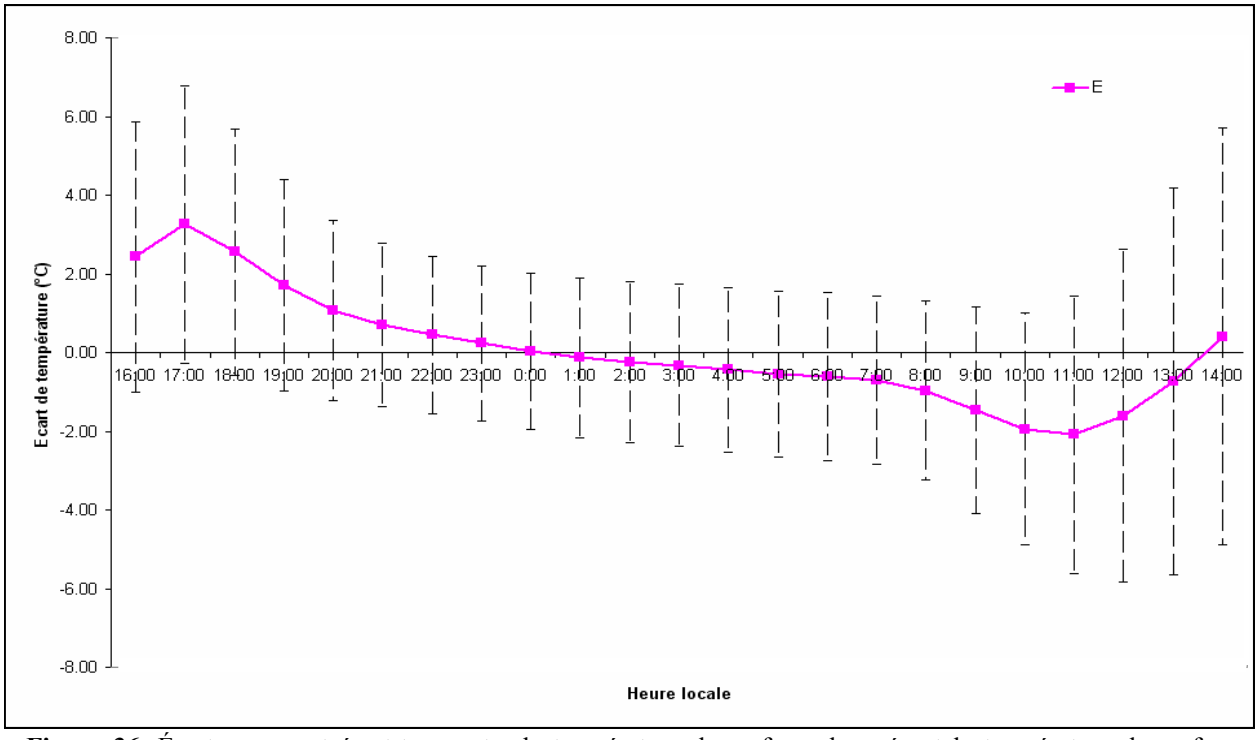


Figure 36. Écart moyen et écart-type entre la température de surface observée et la température de surface prévue en fonction de l'heure pour la période 1999-2002 toutes stations confondues.

La Figure 36 montre que la moyenne des écarts et l'écart-type sont toujours plus petits de nuit et plus grands lors des phases diurnes. Ceci signifie que les échanges radiatifs en infrarouge sont relativement bien estimés. Ces échanges en infrarouge sont prépondérants lors de la phase nocturne alors que le rayonnement solaire, qui est difficile à calculer précisément (spécialement pour les journées nuageuses), joue le rôle le plus important en journée dans le bilan d'énergie de surface. De 16H00 à 0H00 la moyenne des écarts est positif ce qui signifie que la prévision sous-estime la température de surface. Après minuit cette tendance s'inverse. Pendant toute la phase nocturne l'écart moyen est inférieur à 2°C et en fin de nuit (0H00 – 6H00) cet écart

est inférieur à 1°C. Ce résultat est particulièrement intéressant car la période de fin de nuit constitue pour le gestionnaire autoroutier la période la plus sensible en terme de sécurité routière car c'est le moment le plus froid de la journée et où le verglas est le plus susceptible de se former.

Le Tableau 30 résume les résultats pour les trois phases décrites et pour les six stations. Les résultats comportent la moyenne des écarts absolus $|\bar{E}|$, l'écart-type D ainsi que le nombre de points NB avec lequel $|\bar{E}|$ et D ont été calculés. Si le nombre de points utilisés NB est différent d'une station à une autre c'est dû aux défauts de fonctionnement des stations.

	Diurne 1			**Nocturne**			**Diurne 2**		
	|Ē| (°C)	**D (°C)**	**NB**	**|Ē (°C)|**	**D (°C)**	**NB**	**|Ē| (°C)**	**D (°C)**	**NB**
La Violette	1,92	2	989	1,61	1,28	2924	3,54	2,57	1702
Sal Bas	2,42	2,6	1010	1,54	1,26	2991	3,2	2,46	1739
La Fageole	2,52	2,39	1040	1,35	1,03	3106	2,87	2,5	1806
Saint Flour	3,13	3,16	1043	1,63	1,33	3076	3,34	2,67	1793
Garabit	4,39	3,12	961	2,31	1,61	2857	2,91	2,69	1657
Baraque du Roc	3,34	3,04	954	1,66	1,26	2829	3,13	2,66	1644
Total	**2,94**	**2,86**	**5997**	**1,68**	**1,34**	**17783**	**3,17**	**2,6**	**10341**

Tableau 30. Performance relative de chaque station pour chaque phase. Autoroute A75 période 1999-2002.

Il ressort de ce tableau qu'en moyenne la meilleure prévision est réalisée de nuit puisque $\bar{E}$ et D sont les plus petits ce qui indique une plus grande adéquation entre prévision et observation.

Ce tableau confirme aussi que la seconde phase diurne est la moins performante des trois phases.

En terme d'écart moyen et d'écart-type la station du viaduc de Garabit est la moins performante pour la première phase diurne et pour la phase nocturne.

Il conviendra pour la suite de ce document de toujours faire la distinction entre les différentes phases mises en évidence.

1.2.c. Performances selon la date

Les conditions météorologiques, la durée et l'intensité de l'ensoleillement varient tout au long d'une période hivernale modifiant probablement les performances du modèle de prévision de la température de surface. Ce paragraphe propose d'étudier la variation de la performance du modèle en fonction de la date de la prévision. Pour ce faire, la période hivernale est découpée en quatre mois (décembre, janvier, février et mars) et la performance est estimée pour chacun de ces mois. L'étude sera séparée en trois phases en fonction des trois périodes (diurnes et nocturnes) mises en évidence auparavant.

La performance est étudiée en utilisant les grandeurs $\bar{E}$ et D définies précédemment.

La Figure 37 représente l'évolution pour la première phase diurne de la qualité du modèle en fonction du mois. Les quatre mois sont reportés sur l'axe des abscisses. L'axe des ordonnées donne la valeur de la moyenne des écarts entre l'observation et la prévision pour chacun de ces mois sur toute la période 1999-2002. La moyenne des écarts est à chaque fois associée à son écart-type.

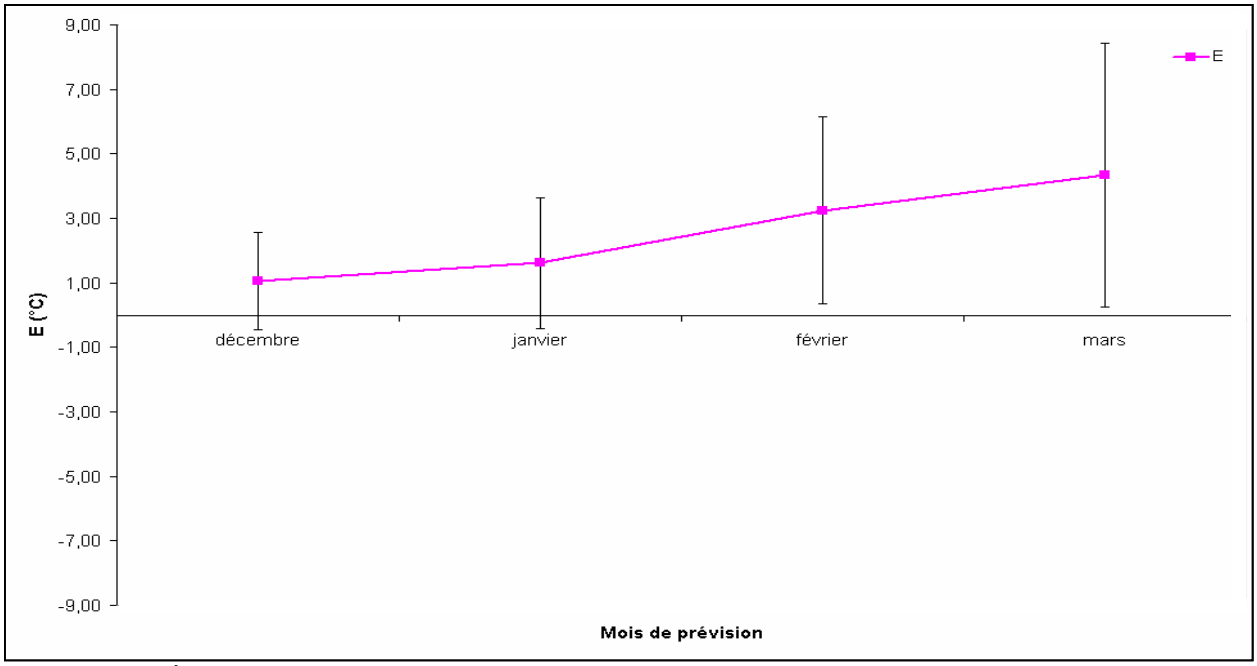


Figure 37. Évolution en fonction du mois de prévision de l'écart entre température observée et température prévue assorti de l'écart-type pour la 1ère phase diurne. Autoroute A75 période 1999-2002.

La Figure 37 permet de constater que la moyenne des écarts $\bar{E}$ entre observation et prévision est toujours positive pour la première phase diurne et que sa valeur croît au cours de la saison hivernale. $\bar{E}$ est de 1°C au mois de décembre et atteint 4°C au mois de mars. De la même manière l'écart-type D croît également durant cette période pour atteindre près de 5°C d'amplitude au mois de mars.

Cette observation, réalisée pour toutes les stations confondues, est confirmée pour chaque station prise individuellement comme le montre le Tableau 31. Ce tableau présente dans ses colonnes l'évolution de $\bar{E}$ et D pour chaque station et pour chaque mois durant la première phase diurne. Ces données sont accompagnées du nombre NB de points que contient l'échantillon d'observation.

	Diurne 1											
	Décembre			**Janvier**			**Février**			**Mars**		
	Ē (°C)	**D (°C)**	**NB**	**Ē (°C)**	**D (°C)**	**NB**	**Ē (°C)**	**D (°C)**	**NB**	**Ē (°C)**	**D (°C)**	**NB**
La Violette	0,09	1,19	248	0,63	1,58	294	1,79	2,29	218	2,65	3,61	229
Sal Bas	0,20	1,34	247	0,72	2,18	308	2,69	2,84	218	3,99	3,87	237
La Fageole	0,83	1,43	244	1,44	1,75	305	2,49	2,74	218	3,73	3,61	273
Saint Flour	0,77	1,67	245	1,53	2,34	307	3,33	3,20	218	5,08	4,59	273
Garabit	2,83	1,57	247	3,37	2,11	287	5,30	3,17	154	5,97	4,34	273
Baraque du Roc	1,66	1,84	244	1,98	2,22	284	3,88	3,19	153	4,67	4,55	273

Tableau 31. Performance relative de la 1ère phase diurne par station pour chaque mois de prévision. Autoroute A75 période 1999-2002.

En outre le Tableau 31 permet d'observer que quel que soit le mois de prévision la station du viaduc de Garabit présente en général le couple ($\bar{E}$,D) le plus grand.

Les résultats observés pour la première phase diurne permettent de conclure que la qualité du modèle est fortement influencé par la date de la prévision et que le mois de décembre pour cette phase, est plus performant que le mois de mars en terme de prévision de la température de surface. Il est également juste de remarquer que la station du viaduc de Garabit constitue la station la moins performante.

La Figure 38 représente l'évolution pour la phase nocturne de la qualité du modèle en fonction du mois. Les quatre mois sont reportés sur l'axe des abscisses. L'axe des ordonnées donne la valeur de la moyenne des écarts entre l'observation et la prévision pour chacun de ces mois sur toute la période 1999-2002. La moyenne des écarts est à chaque fois associée à son écart-type.

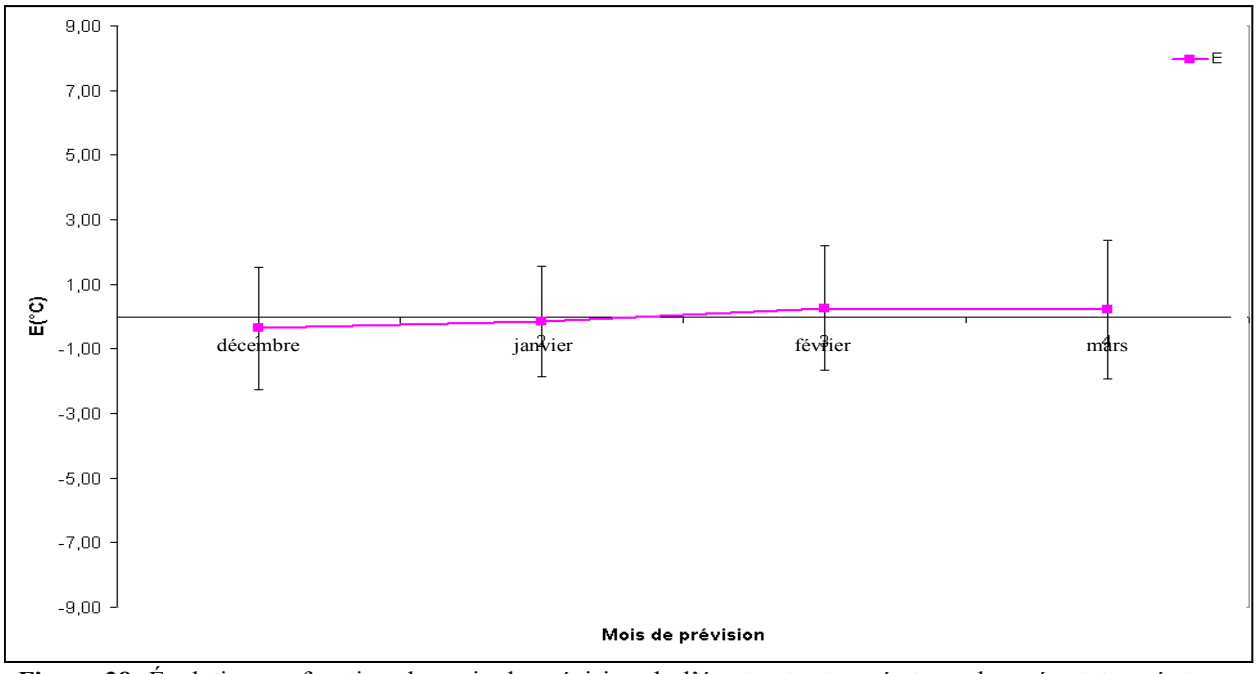


Figure 38. Évolution en fonction du mois de prévision de l'écart entre température observée et température prévue assorti de l'écart-type pour la phase nocturne. Autoroute A75 période 1999-2002

La Figure 38 montre que la moyenne des écarts $\bar{E}$ entre observation et prévision est toujours inférieure à 1°C en valeur absolue pour la phase nocturne et que sa valeur bascule du négatif vers le positif en évoluant au cours de la saison hivernale. De la même manière l'écart-type D reste constant et est de l'ordre de 2°C durant cette phase.

Cette observation réalisée pour toutes les stations confondues est confirmée pour chaque station prise individuellement comme le montre le Tableau 32. Ce tableau présente dans ses colonnes, l'évolution de $\bar{E}$ et D pour chaque station et pour chaque mois durant la phase nocturne. Ces données sont accompagnées du nombre NB de points que contient l'échantillon d'observation.

Nocturne												
	Décembre			**Janvier**			**Février**			**Mars**		
	Ē (°C)	**D (°C)**	**NB**	**Ē (°C)**	**D (°C)**	**NB**	**Ē (°C)**	**D (°C)**	**NB**	**Ē (°C)**	**D (°C)**	**NB**
La Violette	-1,30	1,75	723	-1,09	1,52	882	-0,81	1,73	648	-1,00	2,03	671
Sal Bas	-1,01	1,81	714	-0,88	1,73	924	-0,30	1,84	648	0,01	2,05	705
La Fageole	-0,05	1,61	730	0,20	1,52	924	-0,08	1,79	648	-0,13	1,88	804
Saint Flour	-0,87	2,03	714	-0,56	1,75	914	-0,06	2,00	645	0,21	2,36	803
Garabit	1,30	2,25	735	1,65	1,80	861	2,36	2,11	456	2,20	2,28	805
Baraque du Roc	-0,21	1,95	719	-0,21	1,92	852	0,46	2,09	456	0,02	2,31	802

Tableau 32. Performance relative de la phase nocturne par station pour chaque mois de prévision. Autoroute A75 période 1999-2002.

En outre le Tableau 32 montre que de la même manière que pour la première phase diurne, quel que soit le mois de prévision la station du viaduc de Garabit présente en général le couple ($\bar{E}$,D) le plus grand.

Les résultats observés pour la phase nocturne permettent de conclure que la qualité du modèle est indépendante du mois de la prévision et que la prévision de la température de surface est d'égale qualité pour toute la période hivernale pour cette phase. Il est également permis de conclure que, individuellement, la station du viaduc de Garabit constitue la station la moins performante.

La Figure 39 représente l'évolution pour la seconde phase diurne de la qualité du modèle en fonction du mois. Les quatre mois sont reportés sur l'axe des abscisses.

La Figure 39 montre que la moyenne des écarts $\bar{E}$ entre observation et prévision est toujours négatif pour la seconde phase diurne et que sa valeur se rapproche de 0°C en fin de la saison hivernale (février mars). Par contre l'écart-type D qui est de l'ordre de 2°C est relativement constant durant les trois premiers mois, puis augmente brutalement pour le mois de mars indiquant une forte dispersion des valeurs pour ce mois comme celle constatée lors de la première phase diurne.

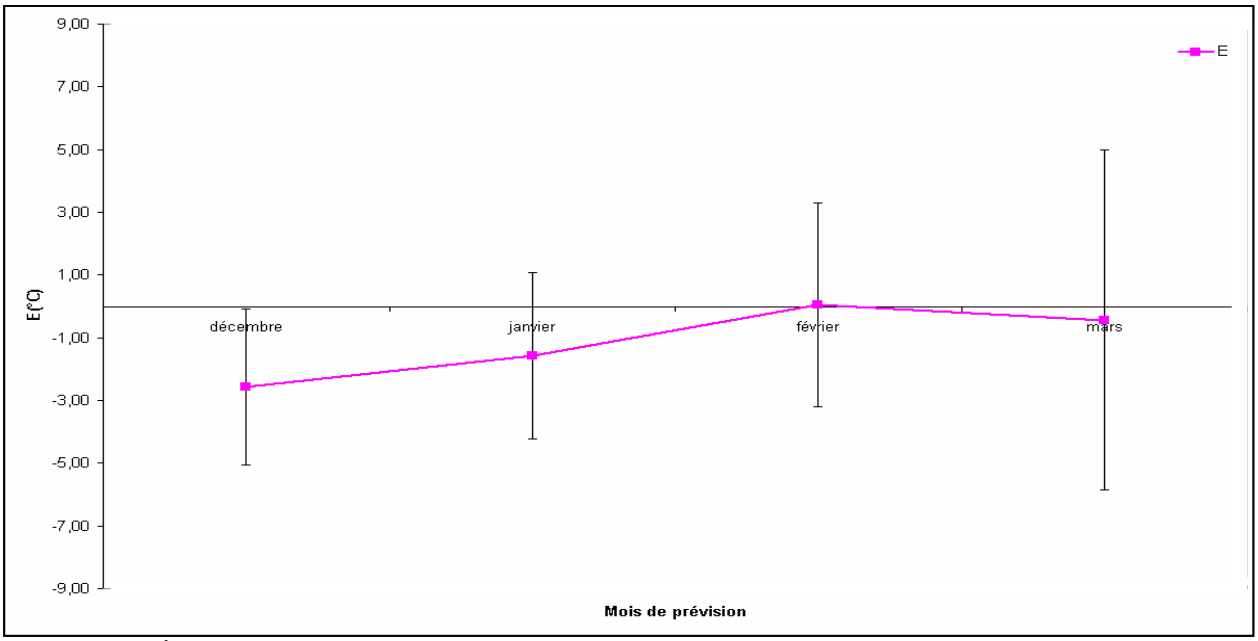


Figure 39. Évolution en fonction du mois de prévision de l'écart entre température observée et température prévue assorti de l'écart-type pour la 2nde phase diurne. Autoroute A75 période 1999-2002.

Cette observation réalisée pour toutes les stations confondues est confirmée pour chaque station prise individuellement comme le montre le Tableau 33.

Diurne 2												
	Décembre			**Janvier**			**Février**			**Mars**		
	Ē	**D**	**NB**	**Ē**	**D**	**NB**	**Ē**	**D**	**NB**	**Ē**	**D**	**NB**
La Violette	-3,75	2,32	415	-2,96	2,56	517	-1,43	2,81	378	-2,98	4,90	392
Sal Bas	-3,21	2,29	409	-2,27	2,55	540	-0,37	3,47	378	-0,79	5,16	413
La Fageole	-2,21	2,42	421	-0,97	2,45	538	0,29	3,48	378	0,32	5,32	469
Saint Flour	-3,11	2,60	411	-2,05	2,66	535	-0,40	3,23	378	-0,37	5,84	469
Garabit	-1,16	2,71	421	0,00	2,76	501	1,60	3,16	266	1,16	5,60	469
Baraque du Roc	-1,94	2,56	407	-1,23	2,88	502	0,61	3,38	266	0,04	5,75	469

Tableau 33. Performance relative de la 2nde phase diurne par station pour chaque mois de prévision. Autoroute A75 période 1999-2002.

L'examen du Tableau 33 permet aussi de noter que, de la même manière que pour la première phase diurne, quel que soit le mois de la prévision, la station du viaduc de Garabit présente le couple ($\bar{E}$,D) le plus grand.

Les résultats observés pour la seconde phase diurne permettent de conclure que la qualité du modèle dépend fortement du mois de la prévision et que la prévision de la température de surface est de meilleure qualité pour les trois premiers mois de la période hivernale pour cette phase. Il est également permis de conclure que, individuellement, la station du viaduc de Garabit constitue la station où la prévision de la température de surface est la moins bonne. En effet de par sa position géographique et de par la topographie des lieux cette station est la station la plus sujette aux variations climatiques dues aux vents et c'est aussi pour cette station que les prévisions météorologiques de Météo-France sont les moins bonnes.

1.2.d. Sensibilité à l'état de surface de la chaussée

En période hivernale l'état de surface du revêtement de la chaussée peut varier. Il peut être sec, humide, verglacé ou salé. L'état de la chaussée est mesuré par un capteur de surface (décrit page 44) au niveau des stations météorologiques routières. Selon l'état de la surface les propriétés thermiques, physiques et optiques de la chaussée peuvent varier. Compte tenu du fait que ces propriétés sont constantes dans le modèle, il est probable que les variations de l'état de surface affectent la qualité de la prévision de la température de surface du revêtement.

Ce paragraphe propose une étude de la performance du modèle en fonction de l'état de surface et ce pour les trois phases (diurnes et nocturne) pour les périodes hivernales de 1999-2002.

La Figure 40 indique la moyenne des écarts $\bar{E}$ (courbe rose) entre observation et prévision en fonction de l'état de surface du revêtement de la chaussée pour la première phase diurne. L'écart moyen $\bar{E}$ est accompagné de son écart-type D. La figure indique également l'histogramme du nombre de cas pour chaque état de surface (indéterminé, sec, humide, verglacé et salé). L'ordonnée de l'écart $\bar{E}$ en température est rapportée sur l'axe de gauche alors que l'ordonnée de l'histogramme est rapportée sur l'axe de droite. L'état de surface est donné par l'axe des abscisses.

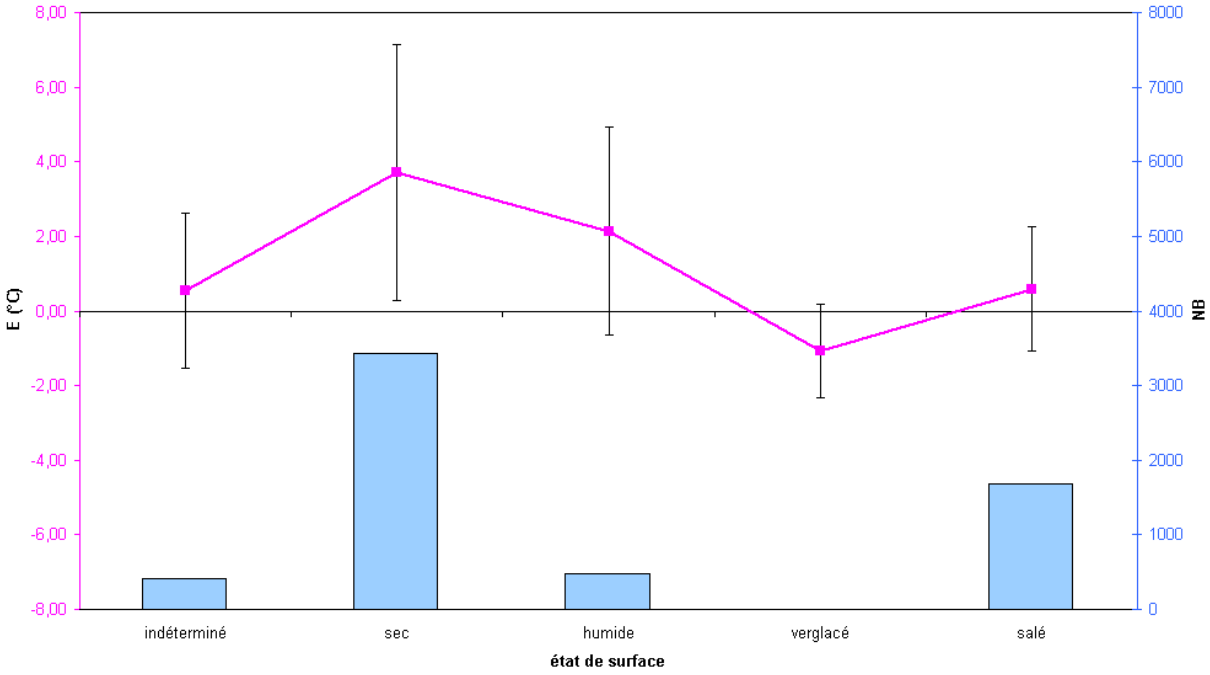


Figure 40. Évolution en fonction de l'état de la chaussée de l'écart entre température observée et température prévue assorti de l'écart-type pour la 1ère phase diurne. Autoroute A75 période 1999-2002.

La Figure 40 permet d'observer que durant les périodes hivernales étudiées, lors de la première phase diurne l'état verglacé est anecdotique et que les états de surface les plus représentés sont l'état sec puis l'état salé (comprenons par salé, une chaussée avec des résidus de fondant). Il est à noter que l'état sec est l'état qui fournit le plus grand $\bar{E}$ (de l'ordre de 4°C) et l'écart-type D le plus grand (de l'ordre de 3,5°C). L'état salé donne quant à lui l'écart-type le moins important et une moyenne des écarts entre l'observation et la prévision proche de 0°C.

Ces observations montrent que durant la première phase diurne les performances de la prévision de la température de surface sont correctes pour un état de surface salé. Ces états constituent les états les plus critiques dans le cadre de la viabilité hivernale. Cette performance diminue largement dans le cadre d'une chaussée sèche.

La Figure 41 utilise la même représentation que la Figure 40 mais pour la phase nocturne.

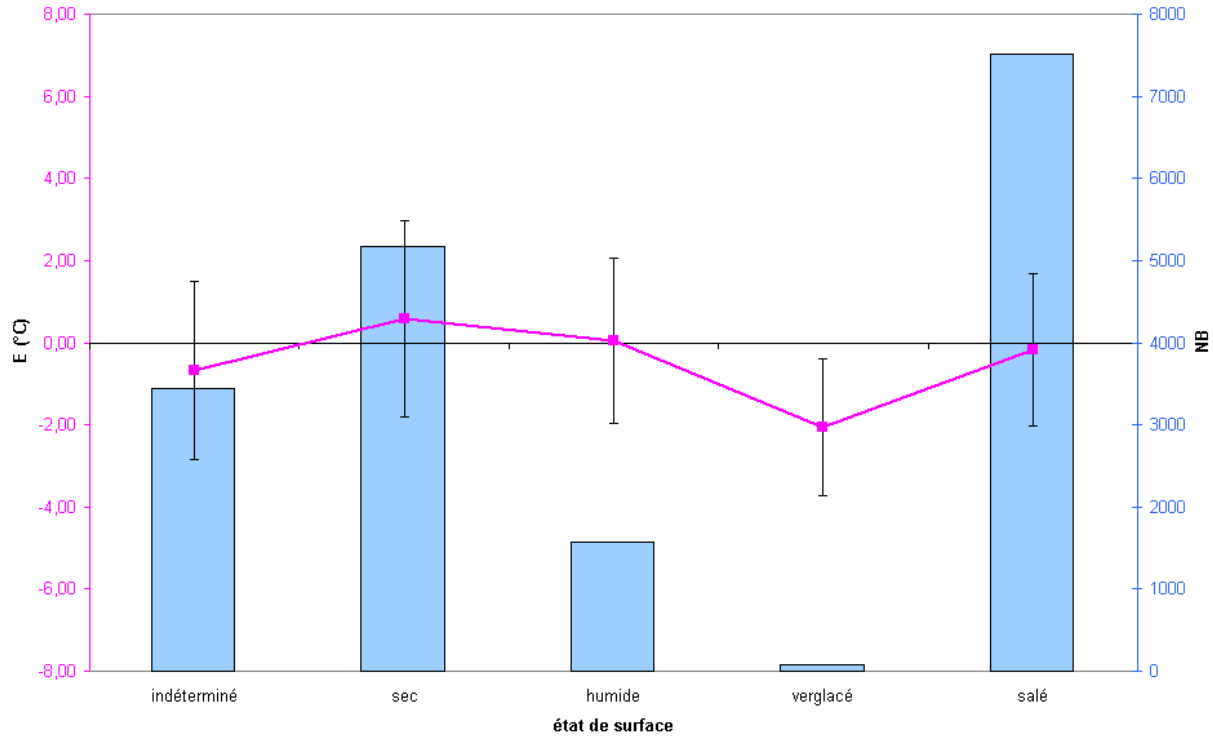


Figure 41. Évolution en fonction de l'état de la chaussée de l'écart entre température observée et température prévue assorti de l'écart-type pour la phase nocturne. Autoroute A75 période 1999-2002

La Figure 41 montre ici aussi dans le cas de la phase nocturne que l'état verglacé reste anecdotique. Les états de surface les plus représentés sont l'état salé puis l'état sec. Notons que quel que soit l'état de surface la moyenne des écarts $\bar{E}$ est inférieur à 2°C en valeur absolue et que l'écart-type D est petit.

Ces observations montrent que durant la phase nocturne la prévision de la température de surface est d'égale qualité quel que soit l'état de la chaussée.

La Figure 42 concerne la seconde phase diurne.

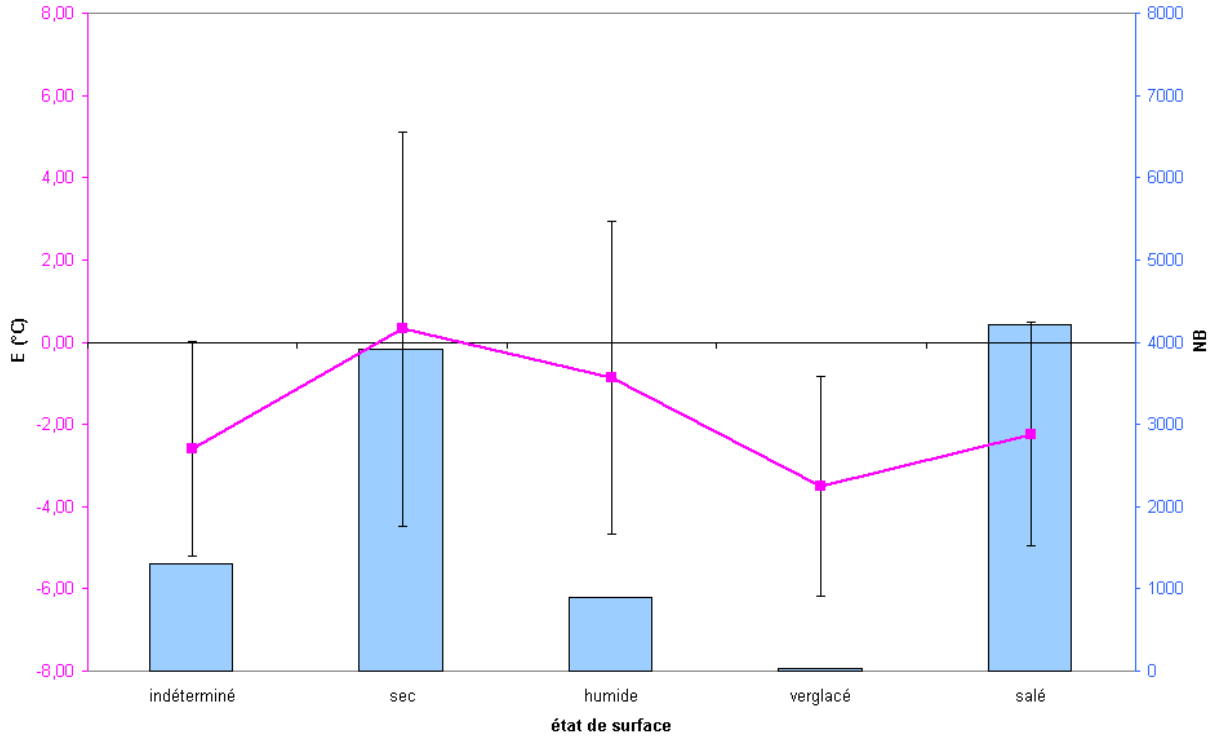


Figure 42. Évolution en fonction de l'état de la chaussée de l'écart entre température observée et température prévue assorti de l'écart-type pour la 2nde phase diurne. Autoroute A75 période 1999-2002

La Figure 42 permet d'observer que durant les périodes hivernales étudiées, lors de la seconde phase diurne, l'état verglacé reste toujours rare et que les états de surface sec et salé sont les états les plus fréquents. Quel que soit l'état de surface l'écart-type D des écarts est supérieur à 2°C. La moyenne des écarts $\bar{E}$ n'est proche de 0°C que pour les états sec et humide.

Ces observations montrent que durant la seconde phase diurne, les performances de la prévision de la température de surface sont peu satisfaisantes quel que soit l'état du revêtement de la chaussée.

Ce paragraphe permet de justifier que l'influence de l'état de surface dans la seconde phase diurne ne peut pas être identifiée compte tenu que durant cette phase la qualité de la prévision est très peu satisfaisante. Par contre en phase nocturne, phase qui retient toute l'attention du gestionnaire autoroutier, la performance de la prévision est correcte quel que soit l'état de surface du revêtement observé.

1.3. Confrontation au modèle ISBA-ROUTE

Nous avons comparé les performances de nos prévisions aux performances d'un autre modèle en cours de développement. Il s'agit du modèle de surface ISBA [Noilhan et Planton, 1989 ; Noilhan et Mahfouf, 1996], développé par le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM / Météo-France). La comparaison a plus particulièrement porté sur son extension ISBA-ROUTE destiné à l'étude du comportement de la neige sur le revêtement de la chaussée.

1.3.a. Description d'ISBA-ROUTE

ISBA (Interaction between Soil-Biosphere-Atmosphere) est un modèle de type SVAT (Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer) développé par le Centre National de Recherches Météorologiques de Météo-France. Il sert à modéliser les transferts de masse et d'énergie entre la surface terrestre et l'atmosphère à son contact. ISBA-ROUTE est l'adaptation de ce modèle d'hydrologie du sol à la problématique des chaussées. Son fonctionnement suppose la connaissance des propriétés physiques, thermiques et hydriques du sol étudié et restitue, dans notre cas, l'état thermique et hydrique de la chaussée.

La chaussée est représentée par un modèle à N niveaux sur une profondeur de 10 mètres (voir Figure 43). Chaque niveau est représenté par une couche au centre de laquelle on définit un nœud. Les couches sont d'autant plus épaisses qu'elles sont profondes. ISBA-ROUTE restitue un profil vertical des températures et du contenu en eau de la chaussée. Pour ce faire ISBA-ROUTE réalise un bilan d'énergie et de masse en chacun des nœuds et résout une équation de conduction de chaleur dans le sol.

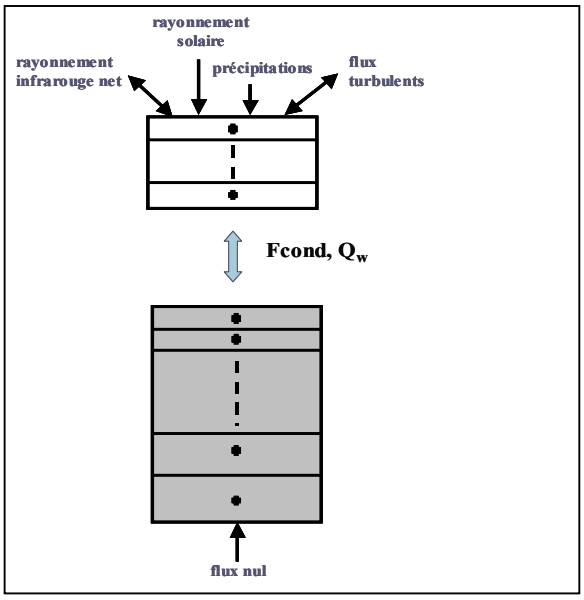


Figure 43. Bilan d'énergie à la surface de la chaussée et modèle de la chaussée d'après ISBA-ROUTE.

Pour fonctionner en mode prévisionnel, ISBA-ROUTE nécessite la connaissance des propriétés physiques, thermiques et hydriques de la chaussée. Il doit également être alimenté par un jeu de données météorologiques de routine tel que l'humidité de l'air, la vitesse du vent, la température de l'air, le rayonnement solaire global, le rayonnement atmosphérique infrarouge et la quantité de précipitations solides et liquides.

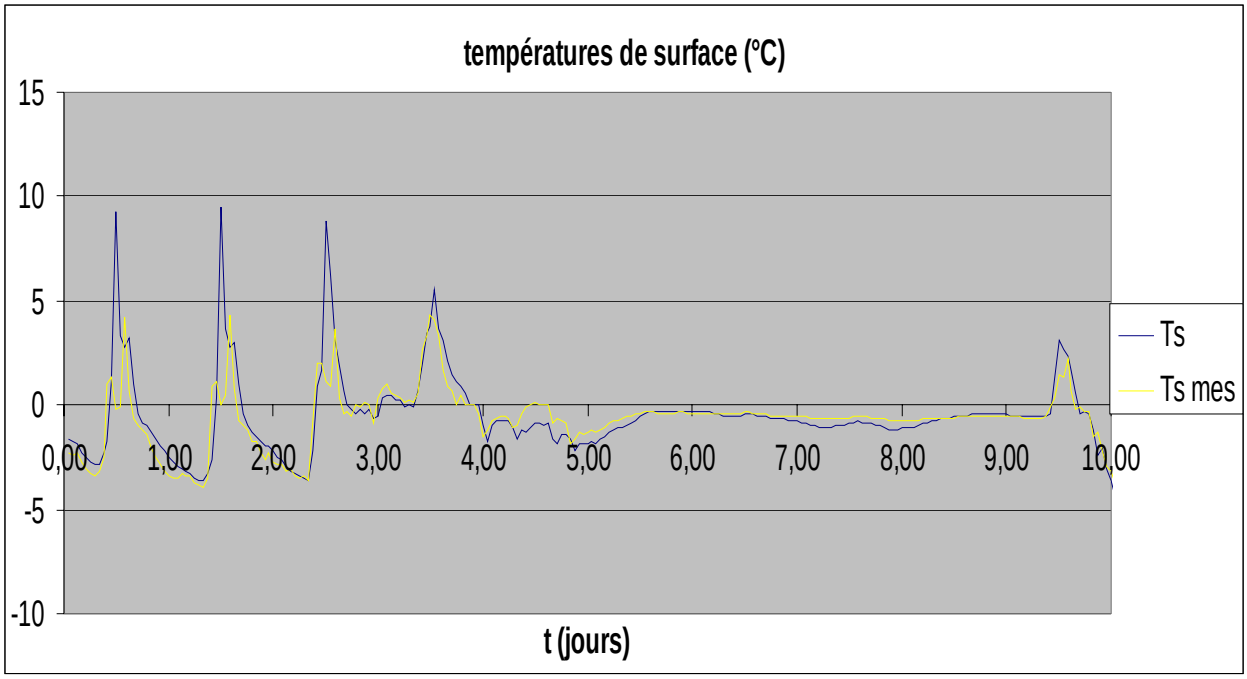


Figure 44. Évolution et comparaison sur 10 jours des températures de surface mesurée et simulée par le modèle ISBA-ROUTE. [Bouilloud 2004]

Les études de validation de ISBA-ROUTE réalisées par Bouilloud (2004) montrent une bonne adéquation entre la mesure et la prévision. Pour des simulations à 24 heures, ISBA-ROUTE marque un écart moyen de l'ordre de 3°C. La Figure 44 (issue de Bouilloud, 2004) compare la simulation de la température de surface par ISBA-ROUTE avec la température de surface mesurée sur 10 jours. Les quatre premiers jours sur le graphique montrent que ISBA restitue imparfaitement le cycle journalier de variation des températures de surface avec une correspondance accrue entre simulation et mesure pour les plus basses températures. Les jours suivants, correspondants à un épisode neigeux, montrent bien la capacité de ISBA-ROUTE à restituer la température du sol en cas de présence de couverture neigeuse.

1.3.b. Étude comparative

Pour comparer les performances des deux modèles, on a procédé à une prévision de température de surface de chaussée pour la journée du 14/02/2003 en utilisant ISBA-ROUTE et PRÉVIROUTE alimentés par les données météorologiques prévisionnelles de Météo-France. Toutefois ne disposant pas des données prévisionnelles de Météo-France pour le rayonnement (indispensables au fonctionnement d'ISBA-ROUTE) nous avons eu recours aux valeurs de rayonnement calculées par la modélisation de Brunt et les modèles de transfert de rayonnement solaire utilisés par PRÉVIROUTE pour alimenter ISBA-ROUTE.

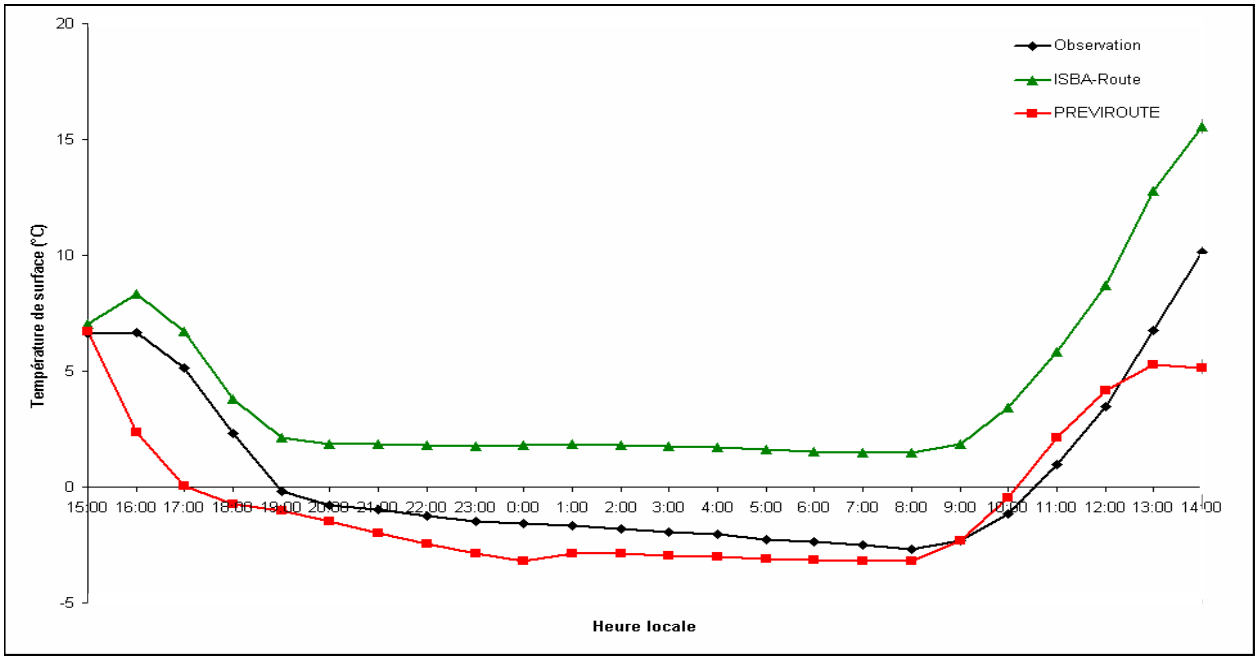


Figure 45. Évolution et comparaison sur 24 heures des températures de surface observées, prévues par le modèle physique et simulées par le modèle ISBA-ROUTE. Station de la Violette journée du 14-02-2003.

Les résultats des prévisions d'ISBA-ROUTE et de PRÉVIROUTE ainsi que les valeurs de température de surface observées pour la station de la Violette sont reportés sur la Figure 45. L'heure locale est donnée par l'axe des abscisses et sur l'axe des ordonnées est reportée la température de surface. La température de surface observée (courbe noire), prévue par le système PRÉVIROUTE (courbe rouge) et prévue par ISBA-ROUTE (courbe verte) sont figurées sur ce graphe.

La Figure 45 montre que la température de surface observée commence par amorcer une légère décroissance qui s'amplifie pour nous amener à des températures négatives en début de nuit. Cette température continue à décroître mais de manière plus lente jusqu'au lever du soleil. L'apport d'énergie qui en découle provoque une hausse des températures de surface jusqu'à la fin de la période concernée (14H00).

La température prévue par le modèle physique (courbe rouge) décroît beaucoup plus rapidement que l'observation en début de prévision et atteint les températures négatives avec deux heures d'avance. Cette température continue sa décroissance au cours de la nuit en présentant un faible écart avec la mesure. La température prévue commence à remonter environ une heure avant la température mesurée mais l'écart entre observation et prévision reste petit, excepté pour le dernier point de comparaison à 14H00.

La température simulée par ISBA-ROUTE a grossièrement la même allure que la température mesurée à l'exception de la période 15H00-16H00. Mais elle présente un écart très important entre l'observation et la simulation qui tend à croître avec le temps. Après 16H00 la température simulée, à l'instar de la température observée, décroît lentement pour se stabiliser durant la période nocturne. On observe néanmoins qu'à aucun moment la simulation ne restitue l'épisode de température de surface négative observé. En fin de simulation la température ISBA se met également à augmenter au même moment que la température observée. ISBA-ROUTE respecte l'évolution temporelle de la température de surface mais pas la valeur de la température de surface elle-même.

Le défaut d'ISBA-ROUTE pour ce cas de figure, est moins dû à une incapacité du modèle qu'à son défaut d'adaptation aux conditions de fonctionnement qui lui sont imposées. En effet comme il a été indiqué en préambule, ISBA n'a pas fonctionné dans ce cas avec des données prévisionnelles d'entrées homogènes. De plus ISBA suppose pour son fonctionnement la connaissance des propriétés physiques thermiques et hydriques de la chaussée.

Cette comparaison entre les modèles prouve donc que PRÉVIROUTE est particulièrement adapté au fonctionnement simple imposé par les conditions expérimentales adoptées.

1.4. Conclusions

Nous venons d'étudier la performance du modèle pour diverses situations. Il en ressort que la performance du modèle n'est pas égale pour les trois phases de fonctionnement : diurne 1, nocturne et diurne 2, la dernière phase (diurne 2) étant celle qui donne la moins bonne qualité de prévision de la température de la surface. Cette moindre performance en fin de prévision est due à trois phénomènes. D'abord on a pu constater une légère et progressive divergence du modèle au cours du temps, même en cas de conditions météorologiques stables. Cette divergence est intrinsèque au modèle et il est naturel qu'en fin de prévision cette divergence atteigne son amplitude maximale. Rappelons dans un second temps que le modèle fonctionne grâce à des données prévisionnelles fournies par le CDM, il est notoire que plus la période de prévision et grande est plus l'incertitude est grande sur des données prévisionnelles. Cette dégradation de la fiabilité des données prévisionnelles se répercute sur la prévision de la température de surface. Enfin lors de la dernière phase diurne le bilan radiatif est complexe puisqu'il fait intervenir toutes les composantes radiatives, conductives et convectives, ce qui augmente les causes d'erreur.

L'étude réalisée précédemment permet de constater que la phase pour laquelle le modèle est le plus performant est la phase nocturne. Durant cette phase le bilan d'énergie est beaucoup plus simple à calculer puisque la composante solaire, qui est compliquée à calculer, est absente pour cette phase et que les composantes convectives sont négligeables du fait du faible écart de température entre le sol et l'air. Cette absence du rayonnement solaire et le peu d'importance des flux convectifs constituent donc une élimination des causes d'erreur sur la prévision.

Durant la première phase diurne, la performance du modèle est moins bonne que lors de la phase nocturne. On constate bien au départ de la prévision à 15H00 que le modèle part avec les données initiales de la température de surface mais qu'après une forte divergence s'installe à 16H00 (la température de surface prévue est inférieure à la température de surface observée). Au-delà l'écart diminue. La seule différence entre la phase nocturne et la première phase diurne est la contribution solaire au bilan d'énergie. Il est clair que cette composante est le terme prépondérant dans l'équation du bilan de surface (cf. Équation 20 (a) page 56). La responsabilité des baisses des performances du modèle en phase diurne peut donc être attribuée à ce terme.

Nous allons donc par la suite proposer des pistes d'amélioration du modèle liées au calcul de la contribution solaire au bilan énergétique de la surface du revêtement de chaussée.

2. AMÉLIORATIONS

2.1. Correction du biais de 19H00

Bien que la qualité de la prévision lors de la phase nocturne soit bonne, il est possible qu'une faible part de l'erreur soit imputable à l'erreur commise à la fin de la première phase diurne. Pour améliorer la bonne performance de la prévision en phase nocturne, on corrige donc les températures de surface de chaussée prévues entre 20H00 et 6H00 du matin du biais observé à 19H00 (durant la période hivernale, pour le département du Cantal, l'heure de coucher du soleil varie entre 17H10 et 19H12). La prévision a donc été décalée sur toute la période nocturne de l'écart *E* observé à 19H00. Cette opération a été réalisée pour toutes les journées des 3 hivers 1999-2000, 2000-2001 et 2001-2002 et pour les six sites expérimentaux.

Les résultats obtenus sont illustrés par la Figure 46 et la Figure 47.

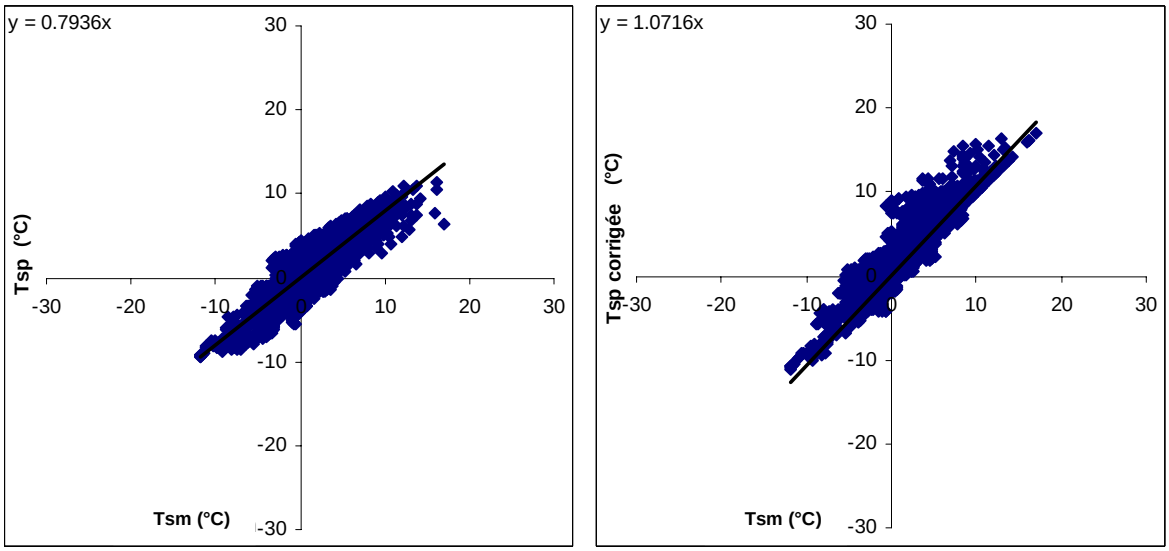


Figure 46. Régression linéaire de la température de surface prévue en fonction de la température de surface mesurée avant (a) et après (b) correction du biais de 19H00. Station du col de la Fageole. Période 1999-2002. Phase nocturne.

La Figure 46 représente la température de surface prévue en fonction de la température de surface observée en phase nocturne avant (a) et après (b) correction du biais observé à 19H00. L'axe des abscisses donne la valeur de la température observée par la station météorologique et l'axe des ordonnées donne la température de surface prévue par le modèle. Ces observations sont celles du col de la Fageole

pour la période 1999-2002 et en phase nocturne soit entre 20H00 et 6H00 du matin. La droite noire est la régression linéaire de la relation qui lie la température de surface prévue à la température de surface observée. Idéalement cette droite doit passer par l'origine et avoir une pente de 1. Il a été reporté dans le coin supérieur gauche des deux figures, l'équation de la droite de régression.

La Figure 46 (a) montre que le nuage de points se distribue autour d'une droite de pente 0,79. La Figure 46 (b) montre qu'après correction du biais de 19H00 le nuage de points se distribue autour d'une droite de pente 1,07.

La Figure 47 montre la distribution des écarts *E* entre l'observation et la prévision par classe de 1°C de largeur. La Figure 47 (a) montre la distribution de *E* par classe pour la prévision initiale. La Figure 47 (b) montre la distribution de *E* par classe pour la prévision après correction du biais de 19H00. L'axe des abscisses représente les classes d'écart allant de –15°C à +15°C. L'axe des ordonnées représente le nombre de situations par classe.

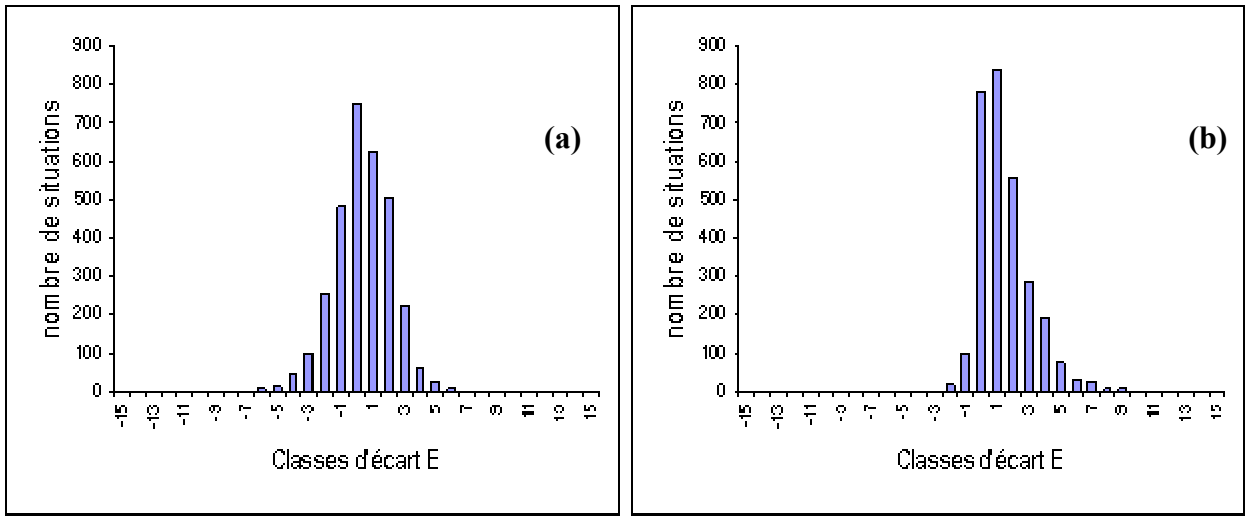


Figure 47. Distribution de l'écart entre la température de surface prévue et la température de surface mesurée avant (a) et après (b) la correction du biais de 19H00. Station du col de la Fageole. Période 1999-2002. Phase nocturne.

La Figure 47 (a) montre que la distribution des écarts est une gaussienne autour d'une valeur moyenne d'environ 0°C. La gaussienne s'étend entre –6°C et +6°C. Plus de 95% des points sont situés dans une bande de largeur –3°C +3°C.

La Figure 47 (b) montre que la distribution des écarts est une gaussienne plus resserrée que précédemment autour d'une valeur moyenne d'environ 1°C. La gaussienne s'étend entre –2°C et +9°C. Plus de 96% des points sont situés dans une bande de largeur –1°C +5°C.

Les observations réalisées pour la station du col de La Fageole peuvent être généralisées à toutes les stations et sont résumées dans le Tableau 34. Les deuxième et troisième colonnes contiennent respectivement la moyenne des écarts entre observation et prévision initiale et l'écart-type qui lui est associé. Les quatrième et cinquième colonnes contiennent respectivement la moyenne des écarts entre observation et prévision après correction et l'écart-type qui lui est associé.

	$E_{initial}$ (°C)	$D_{initial}$(°C)	$E_{corrigé}$(°C)	$D_{corrigé}$(°C)
La Violette	0.87°C	1.81°C	1.41°C	1.84°C
Sal Bas	0.41°C	2.00°C	1.28°C	2.07°C
La Fageole	-0.13°C	1.76°C	1.07°C	1.60°C
Saint Flour	0.08°C	2.22°C	1.83°C	2.35°C
Garabit	-2.07°C	2.24°C	1.76°C	2.17°C
Baraque du Roc	-0.19°C	2.18°C	1.70°C	1.05°C

Tableau 34. Performance par station de la prévision de la température de surface avant et après correction du biais de 19H00.

Les résultats du Tableau 34 montrent que la correction du biais de 19H00 donne un écart moyen entre observation et prévision plus important que pour la prévision initiale mais que l'écart-type soit reste équivalent soit diminue.

En conclusion même si une meilleure prévision de la température de surface en fin de la première phase diurne permet de s'approcher de la droite idéale de pente 1 entre la température prévue et la température mesurée, cette simple correction n'améliore pas sensiblement la qualité de la prévision durant la phase nocturne. Une procédure plus compliquée telle que le redémarrage de la prévision à 19H00 avec les paramètres mesurés comme nouvelles données initiales reste à explorer.

2.2. Correction des heures de lever et coucher du soleil

Le calcul de la contribution de l'énergie solaire de part sa complexité est une source d'incertitude pour la prévision de la température de surface. Cette incertitude est due aux hypothèses simplificatrices utilisées pour ce calcul, mais ces hypothèses sont indispensables pour deux raisons. D'une part à cause du peu de données disponibles pour ce calcul. En effet le rayonnement solaire global incident à la surface de la chaussée est affecté par les nuages, par la quantité de vapeur d'eau et par la quantité et l'espèce des aérosols présents dans toute la colonne atmosphérique traversée. Or nous ne disposons que de données prévisionnelles partielles telles que la nébulosité exprimée en octas et l'humidité relative de l'air à 2m de hauteur de la chaussée. D'autre part, pour des raisons de commodité et de fonctionnalité, le gestionnaire autouroutier a besoin d'un modèle simple et rapide ne nécessitant pas plus de quelques minutes de calul, ce que réalise ce modèle.

Compte tenu des données disponibles et des contraintes de simplicité et de rapidité exigées pour la viabilité hivernale, la modélisation du rayonnement solaire utilisée par le modèle paraît satisfaisante. Si l'amélioration du modèle de prévision de la température de surface ne peut être apportée en modifiant la modélisation du rayonnement solaire incident, celle-ci peut néanmoins être apportée à la période d'ensoleillement de la chaussée. En effet, le rayonnement solaire a un effet cumulatif. Or dans le modèle de prévision, les heures de lever et de coucher du soleil sont calculées de manière approximative par le biais du calcul de la hauteur du soleil sur l'horizon pour un lieu, une date et une heure donnés. En remplacant ces calculs par les données de l'Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides (IMCCE), il est donc possible de corriger la durée d'ensoleillement de la chaussée.

La Figure 48 montre l'évolution du rayonnement solaire global pour la station de Sal Bas, à la date du 14-02-2003. L'heure locale est donnée par l'axe des abscisses. L'axe des ordonnées donne le flux de rayonnement en W/m². La courbe noire indique le rayonnement solaire global mesuré par la station météorologique routière, la courbe rouge le rayonnement prévu initialement par le modèle et la courbe verte le rayonnement prévu après correction par les données de l'IMCCE.

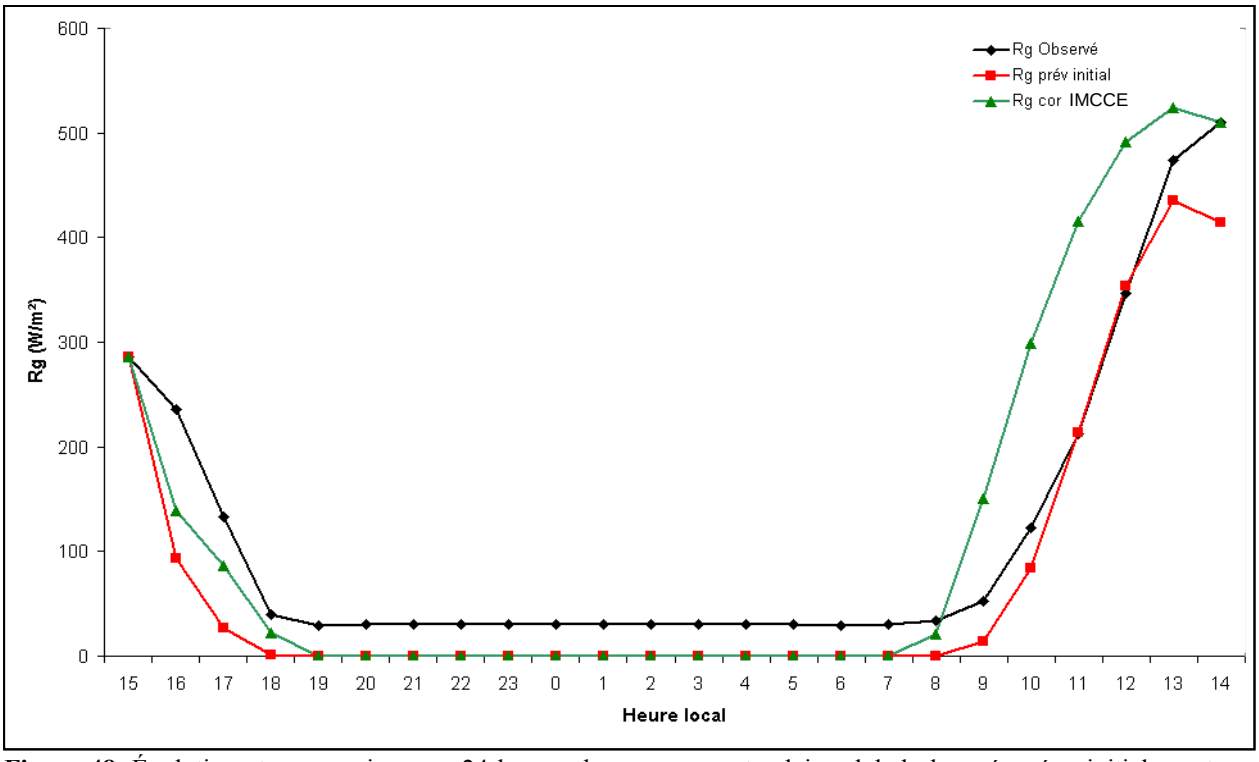


Figure 48. Évolution et comparaison sur 24 heures du rayonnement solaire global observé, prévu initialement par le modèle et prévu après correction par les données de l'IMCCE. Station de Sal Bas journée du 14-02-2003.

Cette figure permet d'observer que la station météorologique routière donne une valeur de rayonnement solaire global de nuit de l'ordre de 30W/m². Cela correspond à un biais systématique de mesure qui peut être corrigé.

La Figure 48 montre également que le modèle prévoit initialement le coucher du soleil pour cette date à 18H00 et le lever à 8H00. Or, l'IMCCE donne le coucher du soleil à environ 17H12 et le lever à environ 6H50.

Le calcul de la hauteur du soleil à l'horizon par le modèle intervient non seulement sur la détermination de l'heure de lever et coucher du soleil mais également sur le calcul du chemin optique parcouru par le rayonnement solaire pour arriver à la surface de la chaussée. Donc la détermination du chemin otique du rayonnement solaire est affectée par l'approximation du calcul de la hauteur du soleil et influence par là même la prévision de la température de surface. La Figure 48 montre bien qu'après correction avec les données de l'IMCCE, l'écart entre le rayonnement prévu et le rayonnement observé se réduit pour la première phase diurne.

Si on représente sur la Figure 49 la quantité d'énergie du rayonnement solaire cumulée à la surface de la chaussée entre l'heure de début de prévision (15H00) et de coucher du soleil (19H00), on peut constater que le modèle après correction avec les données de l'IMCCE est plus proche de la valeur mesurée corrigée du biais.

La Figure 49 présente la quantité de rayonnement solaire global cumulée entre 15H00 et 19H00 pour quatre cas de figure : la mesure faite par la station météorologique routière, la mesure corrigée du biais de 30W/m², la prévision initiale du modèle et la prévision du modèle après correction par les données de l'IMCCE.

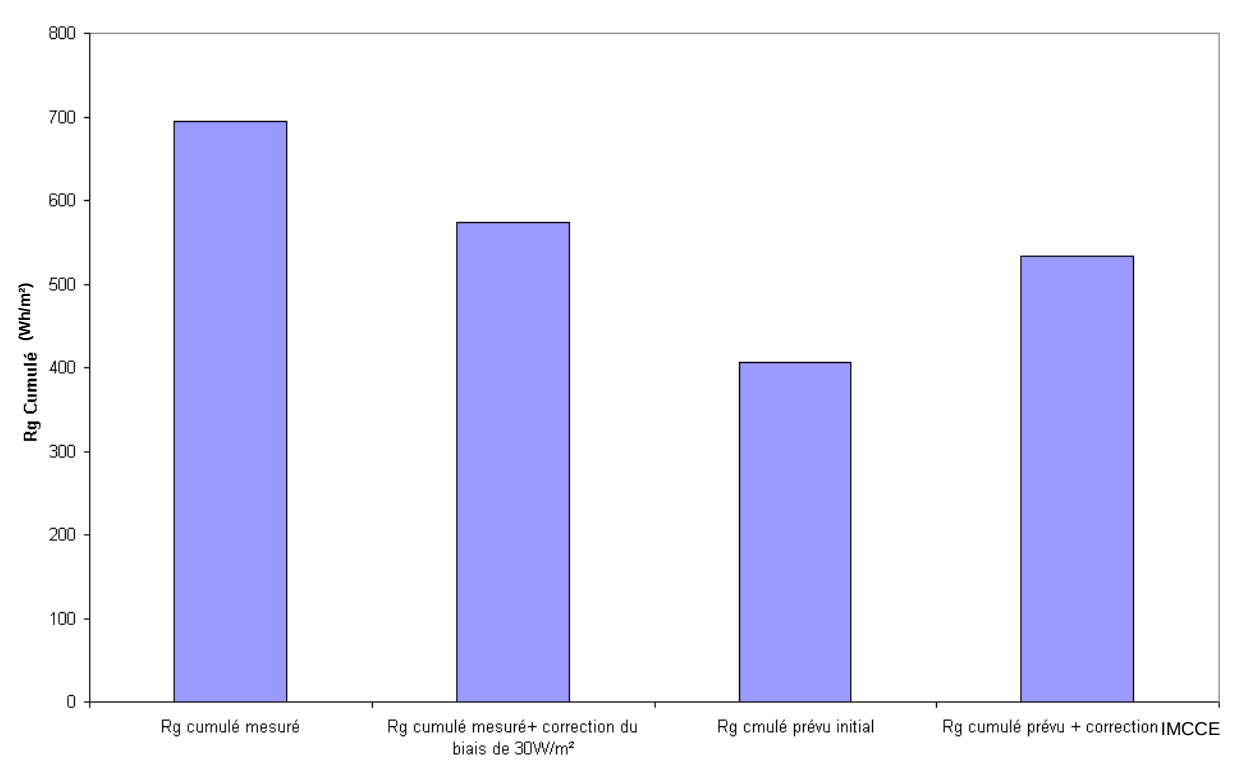


Figure 49. Comparaison du rayonnement solaire global cumulé entre 15H00 et 19H00 dans différents cas de figure. Station de Sal Bas journée du 14-02-2003.

La Figure 50 montre l'influence de la correction par les données de l'IMCCE sur la prévision de la température de surface du revêtement de la chaussée pour la station de Sal Bas à la date du 14-02-2003. Cette figure présente l'évolution temporelle sur 24 heures des températures de surface observée (courbe noire), prévue initialement par le modèle (courbe rouge) et prévue après correction par les données de l'IMCCE

(courbe verte). L'heure locale est donnée par l'axe des abscisses. Les températures de la surface se lisent sur l'axe des ordonnées.

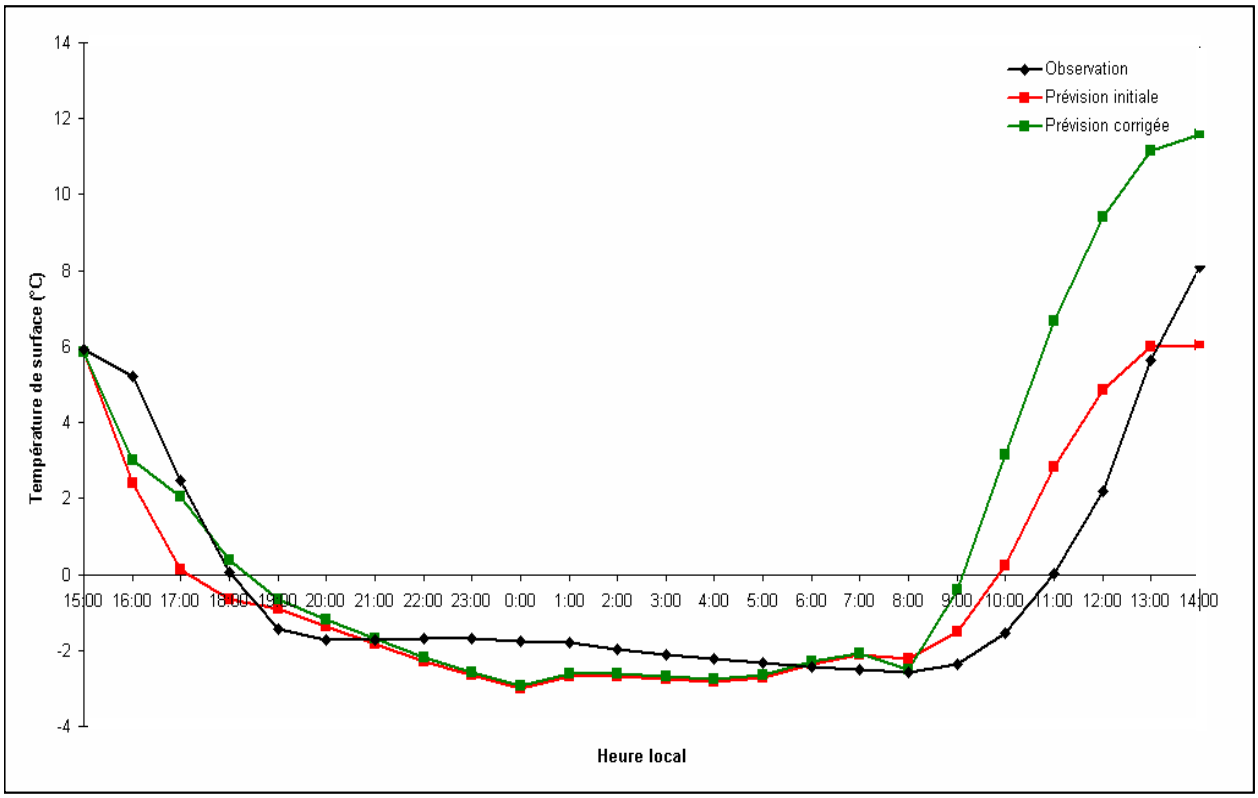


Figure 50. Évolution et comparaison sur 24 heures des températures de surface observée, prévue initialement par le modèle et prévue après correction par les données de l'IMCCE. Station de Sal Bas journée du 14-02-2003.

La Figure 50 permet de distinguer les trois périodes : diurne 1, nocturne et diurne 2.

Durant la première phase, l'écart entre l'observation et la prévision est moins grand dans le cas de la prévision après correction. En fin de la première phase diurne (vers 19H00), les deux températures prévues sont très voisines l'une de l'autre.

Lors de la phase nocturne, il n'y a pas de différence notable entre la prévision initiale et la prévision après correction. Les légères différences existantes se situent en début et en fin de la phase nocturne et sont de l'ordre de quelques dixièmes de degré.

Lors de la phase de réchauffement qui débute avec la seconde phase diurne la prévision corrigée par les données de l'IMCCE diverge très fortement de l'observation. Ici la prévision après correction est moins performante pour cette phase que la prévision initiale.

Les observations décrites ci-dessus se trouvent confirmées par le Tableau 35. Ce tableau présente pour chacune des trois phases de prévision, les écarts moyennés entre observation et prévision pour la journée du 14-02-2003 pour la station de Sal Bas. Les deuxième et troisième colonnes contiennent respectivement la moyenne des écarts entre observation et prévision initiale et l'écart-type qui lui est associé. Les quatrième et cinquième colonnes contiennent respectivement la moyenne des écarts entre observation et prévision après correction et l'écart-type qui lui est associé.

	$\bar{E}_{initial}$ (°C)	$D_{initial}$ (°C)	$\bar{E}_{corrigé}$ (°C)	$D_{corrigé}$ (°C)
Diurne 1	1,08	1,44	0,32	1,15
Nocturne	0,52	0,48	0,43	0,49
Diurne 2	-0,89	1,57	-3,75	2,74

Tableau 35. Comparaison des performances de la prévision initiale de la température de surface et de la prévision après correction. Station de Sal Bas journée du 14-02-2003

Le Tableau 35 montre bien que, pour cette journée, les performances du modèle sont accrues par la correction apportée avec les données de l'IMCCE pour la première phase diurne. La bonne performance, pour la phase nocturne, est légèrement améliorée. Pour la seconde phase diurne, la correction détériore la prévision.

Au vu de ces résultats, on est autorisé à penser qu'il n'y a pas d'amélioration notable apportée par la correction des heures de lever et coucher du soleil. Les approximations employées par le modèle sont suffisantes et satisfaisantes.

3. CONCLUSIONS DU CHAPITRE

Dans ce chapitre nous avons montré que le modèle présentait trois phases de fonctionnement aux performances différentes. Lors de la première phase, dite diurne 1, l modèle a une performance moyenne. Lors de la seconde phase, dite nocturne, le modèle présente de très bonnes performances. Pour la dernière phase, dite diurne 2, la qualité de la prévision de T_s est largement perfectible. Nos efforts d'amélioration porteront cependant sur la phase nocturne qui est la phase la plus critique en terme de sécurité routière et sur la première phase diurne qui conditionne la qualité de la prévision nocturne. Nous avons montré par ailleurs que la prévision de la température de surface du revêtement de la chaussée dépendait également de la date de la prévision (la prévision en fin d'hiver est moins bonne qu'en début d'hiver) et du lieu de la prévision (la station du viaduc de Garabit présente dans l'ensemble de moins bonnes performances que les autre stations).

Les voies d'amélioration explorée ont porté sur deux points. Le premier est d'éliminer le biais systématique sur la prévision de la température de surface constaté en début de la phase nocturne. Le second consiste à mieux appréhender les heures de lever et coucher du soleil par le modèle afin de mieux prendre en compte la contribution solaire aux échanges énergétiques à la surface de la chaussée. L'amélioration apportée par ces deux méthodes se ressent pour la première phase diurne et pour la phase nocturne.

CONCLUSION

La sécurité routière fait l'objet depuis le début des années 80 de multiples investigations scientifiques. Il a été prouvé que la sécurité routière est fortement dépendante des conditions météorologiques en général et des conditions hivernales en particulier. En effet, l'une des principales sources d'insécurité sur les réseaux routiers est la formation de verglas en période hivernale. La recherche en sécurité routière s'est donc intéressée à ce phénomène, aux conditions propices à sa formation et à la méthode pour le combattre. Il s'avère que la manière la plus efficace et la plus économique en terme de lutte contre la formation de verglas est le salage préventif des portions routières susceptibles de subir ce phénomène. Pour ce faire, il est indispensable de savoir prévoir "où et quand" le verglas va se former. La formation du verglas étant tributaire de la présence d'eau sur la chaussée et de la température de surface négative du revêtement de la chaussée, des modèles de prévision de cette température ont été développés de par le monde. Le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand en collaboration avec le Laboratoire de Météorologie Physique de l'Université Blaise Pascal à Clermont-Ferrand ont développé l'un de ces modèles.

Les objectifs de ce travail se limitent à expliciter, valider et étudier la sensibilité du modèle physique développé par le LRPC et le LaMP. Nous nous sommes appuyés pour ce travail sur les données expérimentales acquises durant le fonctionnement du modèle depuis 1999 sur la portion de l'autoroute A75 traversant le département du Cantal dans la région Auvergne.

Dans le premier chapitre, nous avons introduit les phénomènes physiques qui régentent la variation de la température de surface d'un sol. Nous avons ainsi présenté les apports et pertes énergétiques qui se produisent à la surface du sol. La

température de surface dépend alors du rayonnement solaire global R_g incident à la surface du sol, du rayonnement atmosphérique infrarouge R_{at} qui est dû au rayonnement des constituants atmosphériques (molécules de gaz, vapeur d'eau, aérosols et nuages), du rayonnement de surface infrarouge R_{surf}, des flux convectifs de la chaleur sensible H et de la chaleur latente LE et du flux de conduction de chaleur K dans le sol. Nous avons également introduit dans ce chapitre la notion de bilan d'énergie à l'interface sol-atmosphère qui traduit le fait que toute énergie gagnée par la surface est cédée par celle-ci sous une autre forme. Tout ceci a été développé dans le cas général d'un sol quelconque mais peut être adapté et appliqué au revêtement d'une chaussée.

Dans le deuxième chapitre nous avons brièvement présenté quelques modèles physiques de prévision de la température de surface de la chaussée. Dans leur majorité ces modèles se fondent sur les phénomènes d'échange d'énergie à la surface décrits au premier chapitre. Ce sont généralement des modèles présentant de très bonnes performances (au $10^{ème}$ de degré près) mais ce sont des prévisions à court terme (3 à 6 heures). Or, dans le cahier des charges, le gestionnaire autoroutier souhaite disposer de prévisions à moyen terme (24 heures) avec une performance optimale.

Dans le troisième chapitre, nous avons détaillé le fonctionnement du modèle physique utilisé sur l'autoroute A75. Dans un premier temps, nous avons décrit les données d'entrée du modèle. Elles se subdivisent en deux familles : les données d'observation qui sont soit des variables atmosphériques (T_a, R_g, R_{at}, hr,…), soit des variables de chaussée (T_s, T_{-15}, T_{-30}, état de la surface,…) utilisées pour l'initialisation du modèle, soit des paramètres locaux de la chaussée (A, ε, c_p,…) et les données prévisionnelles qui sont des données météorologiques fournies par le CDM. Dans un deuxième temps, nous avons décomposé le fonctionnement du modèle en plusieurs étapes : d'abord l'acquisition des données, puis le calcul des conditions initiales de démarrage du modèle, ensuite la prévision de la température de surface locale et pour finir l'extension de la prévision à un itinéraire. Seule la prévision de la température de surface locale a fait l'objet de ce travail. Pour conclure ce chapitre

nous avons décrit le modèle physique utilisé, c'est-à-dire la modélisation du transfert de chaleur dans le sol, la modélisation des échanges d'énergie à l'interface sol-chaussée et la manière de résoudre le système. Compte tenu du nombre de paramètres impliqués dans la prévision de la température de surface, la performance du modèle dépend de certains de ces paramètres.

Le quatrième chapitre présente l'étude de sensibilité du modèle. Pour réaliser cette étude nous avons utilisé les données acquises sur l'autoroute A75 durant les périodes hivernales (décembre, janvier, février et mars) d'un intervalle de temps allant de 1999 à 2003. Dans un premier temps, ces données ont été réunies en une base de données unique et portées sous un environnement Windows. La présentation de la base de données ainsi constituée et son organisation font l'objet du premier paragraphe. Dans un deuxième temps, nous avons présenté les outils qui serviront à l'étude de la sensibilité et de la performance du modèle. Ces outils sont de deux types : d'abord l'observation la comparaison sur une journée type de l'évolution de la température de surface observée et prévue, puis les statistiques qui nous ont fait introduire la variable E représentant l'écart entre la température observée et la température prévue. Nous avons fait appel pour ce second outil à la valeur moyenne $\bar{E}$ de E et à son écart-type D. La performance est jugée satisfaisante pour un écart moyen $\bar{E}$ proche de 0°C et pour un écart-type D petit. Nous avons par la suite procédé à l'étude de la sensibilité du modèle pour les deux familles de paramètres. Il ressort de cette étude que, pour les paramètres de chaussée, seule la diffusivité thermique k avait une importante répercussion sur la prévision de la température de surface. En fait c'est ce paramètre qui gère l'inertie de la chaussée aux changements de température. Puis nous avons étudié la sensibilité du modèle aux paramètres atmosphériques et nous avons montré une forte sensibilité du modèle aux variations de la nébulosité n et de la température de l'air T_a prévisionnelles. La performance du modèle est donc fortement tributaire de la qualité des données prévisionnelles de T_a et n. Cette dépendance se fait par le biais du calcul des grandeurs R_g, R_{at} et LE qui sont fonction, entre autres, de ces variables.

Dans le cinquième chapitre, nous avons présenté les performances du modèle dans différents cas de figures afin de définir ses limites. Nous avons commencé par montrer que le modèle fournit de meilleures prévisions de température de surface sur 24 heures qu'une simple prévision par persistance. Ceci justifie dans un premier temps l'utilisation d'un modèle physique pour la prévision de la température de surface. Nous avons procédé par la suite à l'étude de la performance du modèle dans différents cas de figure. De manière générale, pour toutes les stations, toutes les heures, tous les mois et tous les hivers (1999-2002) confondus, le modèle présente un écart moyen de 0,05°C accompagné d'un écart-type de 3,23°C (cf. Chapitre 5 page 111). Cette performance varie selon l'heure de la journée ou le mois de prévision. Nous avons montré que le modèle présentait trois phases de fonctionnement sur les 24 heures de la prévision. La première phase, appelée phase diurne 1, présente un écart moyen $\bar{E}$ de 2,51°C accompagné d'un écart-type D de 3,19°C. Pour cette phase, au début, la prévision diverge de l'observation puis converge vers la fin de la phase : il y a un temps de stabilisation du modèle. La seconde phase, appelée phase nocturne, est la phase de prévision la plus performante puisque $\bar{E}$ est égal à –0,09°C et D à 2,09°C. La dernière phase, appelée phase diurne 2, est la moins performante : elle présente un écart moyen supérieur –1,14°C et un écart-type supérieur à 3.75°C traduisant une grande dispersion des écarts autour de la valeur moyenne. Compte tenu du fait que la période la plus sensible pour la lutte contre la formation du verglas est la phase nocturne et compte tenu du fait que le modèle est le plus performant pour cette phase quels que soient le mois et l'état du revêtement, nous sommes en droit d'estimer que le modèle satisfait aux besoins opérationnels du gestionnaire autoroutier. Nous avons néanmoins le souhait d'améliorer ses performances durant la phase nocturne et durant la première phase diurne. C'est pourquoi nous avons exploré des voies d'amélioration. Ces voies d'amélioration ont consisté en deux points. Dans un premier temps, nous sommes partis du constat que le biais qui peut exister en début de la phase nocturne se propage durant toute la nuit. Nous avons corrigé la prévision de la température de surface nocturne du biais constaté à 19H00. Cette correction apporte une amélioration qui reste cependant modeste. Dans un deuxième temps, nous avons procédé au remplacement des heures de lever et coucher du soleil calculées dans le modèle par celles fournies par l'IMCCE.

Bien que cette opération corrige la quantité de rayonnement solaire global cumulée à la surface avant le coucher du soleil, l'amélioration de la prévision de la température de surface est très sensible seulement dans la première phase diurne.

Nous avons montré que la prévision de la température de surface par le modèle est particulièrement efficace lors de la phase nocturne de par le fait de la simplicité de la modélisation des échanges énergétiques lors de cette phase. Nous avons également prouvé que les écarts entre l'observation et la prévision lors de la phase nocturne peuvent être dus à la propagation de l'erreur sur la prévision de la première phase diurne. Si nous voulons améliorer le modèle physique de prévision de la température de surface il faudra alors agir sur la prévision lors de la première phase diurne. Deux lignes de conduites indissociables se présentent à nous : la première consiste à mieux prendre en compte le cumul d'énergie solaire incidente à la surface et la seconde consiste à moins négliger la modélisation des échanges convectifs lors des phases diurnes.

Notons que lors de la prise en compte de la contribution énergétique du soleil, la grandeur qui nous intéresse n'est pas le flux de rayonnement solaire horaire mais le cumul d'énergie solaire en fin de journée. Il serait alors intéressant de pouvoir calculer cette énergie cumulée entre 15H00 et les heures du coucher du soleil en fonction du type de nébulosité observée à 15H00en utilisant les données acquise sur la période de 1999 à 2002. Une autre méthode pour s'affranchir de ce problème serait de reculer l'heure de la prévision de la température de surface pour ne la faire débuter qu'aux alentours du crépuscule.

Pour une meilleure prise en compte des échanges convectif, il faudrait reconsidérer la modélisation de LE et H avec des hypothèses moins réductrices et prendre en compte la topographie des lieux. Pour cela il faudrait élaborer une campagne de mesure permettant de calculer la rugosité des sites expérimentaux ainsi que des coefficients d'échanges globaux qui leurs seraient associés.

ANNEXE : ÉQUATION DE CONDUCTION DANS UN MUR SEMI-INFINI EN RÉGIME PÉRIODIQUE

On prend un mur semi-infini, en régime établi, sur lequel on applique une sollicitation périodique de forme sinusoïdale et de pulsation ω sur sa face extérieure (voir ci-dessous).

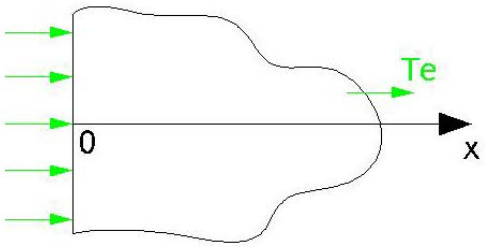


Figure 51. Mur semi-infini

Soit Te la température moyenne du mur à l'équilibre ou la température à la profondeur infinie.

On définit $\theta(x,t) = T(x,t) - Te$.

On commencera par résoudre le système sans connaître la condition à la surface (flux ou température imposé). On obtiendra ainsi une solution générale, sur laquelle on appliquera chaque cas.

$$\begin{cases} \rho Cp \dfrac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \dfrac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \\ \lim\limits_{x \to \infty} \theta(x,t) = 0 \end{cases}$$

On pose θ_c une température complexe. On récupère par la suite la température en prenant la partie réelle si la sollicitation est un cosinus et la partie imaginaire si c'est un sinus.

$$\begin{cases} \rho Cp \dfrac{\partial \theta_c}{\partial t} = \lambda \dfrac{\partial^2 \theta_c}{\partial x^2} \\ \lim\limits_{x \to \infty} \theta_c(x,t) = 0 \end{cases}$$

On pose $\theta_c(x,t) = Y(x).e^{i\omega t}$.

$$\frac{\partial \theta_c}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 \theta_c}{\partial x^2} \quad \text{avec } \alpha = \frac{\lambda}{\rho Cp}$$

$$i\omega Y e^{i\omega t} = \alpha Y'' e^{i\omega t}$$

$$Y'' = i\frac{\omega}{\alpha} Y$$

$$Y(x) = a.e^{-\sqrt{i\frac{\omega}{\alpha}}x} + b.e^{\sqrt{i\frac{\omega}{\alpha}}x}$$

Si on rajoute la deuxième condition :

$$\lim_{x \to \infty} \theta_c(x,t) = 0 \Rightarrow \lim_{x \to \infty} Y(x) = 0 \Rightarrow b = 0$$

ce qui donne

$$\theta_c(x,t) = a.e^{-\sqrt{i\frac{\omega}{\alpha}}x} e^{i\omega t} \quad \ldots\ldots\ldots(1)$$

<u>Mur semi-infini dont la température à la paroi varie de façon sinusoïdale</u>

On prend le cas où la température de la paroi du mur est imposée (figure ci-dessous).

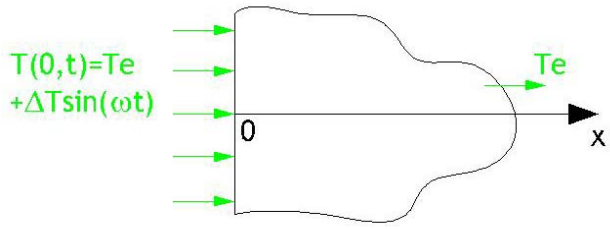


Figure 52. -Mur semi-infini soumis à une température imposée

$\theta(0,t) = \Delta T \sin(\omega t)$ ou $\theta(0,t) = \Delta T \cos(\omega t)$

ce qui correspond en température complexe à $\theta_c(0,t) = \Delta T.e^{i\omega t}$.

Avec l'équation (1) pour x=0 : $\theta_c(0,t) = a.e^{i\omega t}$, on remarque que a=ΔT

On a alors : $\theta_c(x,t) = \Delta T.e^{-\sqrt{i\frac{\omega}{\alpha}}x} e^{i\omega t}$ ou $\theta_c(x,t) = \Delta T.e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}x} e^{i(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}x)}$

Pour l'excitation $\theta(0,t) = \Delta T \sin(\omega t)$, on a la solution $\theta(x,t) = \Delta T.e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}x} \sin(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}x)$

Pour l'excitation $\theta(0,t) = \Delta T \cos(\omega t)$, on a la solution $\theta(x,t) = \Delta T.e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}x} \cos(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}x)$

<u>Mur semi-infini dont la paroi est soumise à un flux imposé de forme sinusoïdale</u>

On prend le cas où le flux à la paroi du mur est imposé (figure ci-dessous).

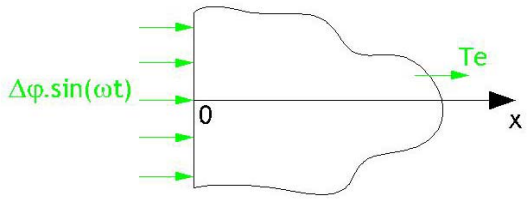


Figure 53. Mur semi-infini soumis à un flux de forme sinusoïdale

$$-\lambda \left.\frac{\partial \theta}{\partial x}\right|_{x=0} = \Delta\varphi \sin(\omega t) \text{ ou } -\lambda \left.\frac{\partial \theta}{\partial x}\right|_{x=0} = \Delta\varphi \cos(\omega t)$$

ce qui correspond en flux complexe à

$$-\lambda \left.\frac{\partial \theta_c}{\partial x}\right|_{x=0} = \Delta\varphi . e^{i\omega t} .$$

Avec l'équation (1) pour x=0 : $-\lambda \left.\frac{\partial \theta_c}{\partial x}\right|_{x=0} = \lambda a \sqrt{i\frac{\omega}{\alpha}} e^{i\omega t}$, on remarque que $a = \frac{\Delta\varphi}{\lambda\sqrt{i\frac{\omega}{\alpha}}}$

On a alors : $\theta_c(x,t) = \frac{\Delta\varphi}{\lambda\sqrt{i\frac{\omega}{\alpha}}} . e^{-\sqrt{i\frac{\omega}{\alpha}}x} e^{i\omega t}$ ou $\theta_c(x,t) = \frac{\Delta\varphi(1-i)}{2\lambda\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}} . e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}x} e^{i(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}x)}$

Pour l'excitation $-\lambda \left.\frac{\partial \theta}{\partial x}\right|_{x=0} = \Delta\varphi \sin(\omega t)$, on a la solution :

$$\theta(x,t) = \frac{\Delta\varphi}{2\lambda\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}} . e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}x} \left[\sin(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}x) - \cos(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}x) \right]$$

Pour l'excitation $-\lambda \left.\frac{\partial \theta}{\partial x}\right|_{x=0} = \Delta\varphi \cos(\omega t)$, on a la solution :

$$\theta(x,t) = \frac{\Delta\varphi}{2\lambda\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}} . e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}x} \left[\cos(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}x) + \sin(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}x) \right]$$

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Les courbes d'émission spectrale pour le soleil (T≈6000K) et la Terre ou l'atmosphère (T≈300K)..... 18

Figure 2. Bilan du flux solaire au niveau de la surface du sol..... 19

Figure 3. Représentation schématique des bilans d'énergie de jour et de nuit au niveau de la surface du sol. De jour on suppose que la température de surface est supérieure à la température de l'air et à celle du sol en profondeur. De nuit on suppose que la température de surface est inférieure à la température de l'air et à celle du sol en profondeur. 26

Figure 4 Opérational monthly verification results for february 1996 as an average for 200 road station sites. The mean absolute error of the rcm forcasts is shown by the solid line. The dashedline and the dot-dashed line apply to the persistency forcasts and linear trend forcasts, respectivly. 34

Figure 5 Error frequencies (%) of road surface temperature forcasts in february 1996 at 3 h,as an average for 200 station sites. The frequencies are in 1°C intervals. The two extrem intervals represent errors with absolute values larger than 2°C. 35

Figure 6. Seuils de détection de l'état de surface de la chaussée. 44

Figure 7. Schéma descriptif du capteur de l'état de la chaussée. 44

Figure 8. Schéma descriptif du capteur de la température du revêtement de la chaussée. 45

Figure 9. Évolution des températures mesurées par la station météorologique de La Violette du 9-02-2003 à 15H00 au 14-02-2003 à 15H00. 46

Figure 10. Représentation schématique des étapes de fonctionnement du système préviroute..... 52

Figure 11. Profil de température dans le corps de la chaussée à différentes heures de la journée. Station de La Violette 14-02-2003. 54

Figure 12. Profil thermique vertical en fonction de l'heure sur l'autoroute A72 du 31-01-1987 00H00 au 02-02-1987 00H00..... 58

Figure 13. Représentation schématique du parcours du rayonnement solaire dans l'atmosphère..... 60

Figure 14. Flux à travers un milieu d'épaisseur Δz..... 67

Figure 15. Décomposition de la chaussée en 14 niveaux (a), bilan des flux au niveau *i* (b). 68

Figure 16. Sorties du système préviroute : (a) prévision de la température de surface du revêtement de la chaussée calculée par le modèle (b) prévision de la température de l'air fournie par Météo-France (c) prévision de l'humidité relative de l'air fournie par Météo-France. Station de La Violette 14-02-2003. 73

Figure 17. Profil altimétrique de l'autoroute A75 dans la traversée du Cantal. 78

Figure 18. Comparaison entre *Ts* observée et *Ts* prévue pour la journée du 14-02-2003 pour la station du col de La Fageole..... 82

Figure 19. Évolution des températures de surface observée et prévue selon la valeur de *cp1* pour la journée du 14-02-2003 au col de La Fageole..... 85

Figure 20. Évolution des températures de surface observée et prévue selon la valeur de *cp2* pour la journée du 14-02-2003 au col de La Fageole..... 87

Figure 21. Évolution des températures de surface observée et prévue selon la valeur de ρ pour la journée du 14-02-2003 au col de La Fageole..... 88

Figure 22. Évolution des températures de surface observée et prévue selon la valeur de *k* pour la journée du 14-02-2003 au col de La Fageole..... 90

Figure 23. Évolution des températures de surface observée et prévue selon la valeur de *Cd* jour pour la journée du 14-02-2003 au col de La Fageole..... 93

Figure 24. Évolution des températures de surface observée et prévue selon la valeur de *Cd* nuit pour la journée du 14-02-2003 au col de La Fageole..... 94

Figure 25. Évolution selon les classes d'erreur des écarts entre observation et prévision pour la température de l'air et la température de surface (a). Nombre d'événements par classe d'erreur (b)..... 97

Figure 26. Évolution dans le temps des températures de surface avec et sans variation de *Ta*. 99

Figure 27. Loi de proportionnalité entre l'écart sur la prévision de la température de l'air et l'écart sur la prévision de la température de surface. 100

Figure 28. Évolution selon les classes d'erreur des écarts entre observation et prévision pour l'humidité relative de l'air et la température de surface (a). Nombre d'événements par classe d'erreur (b). 102

Figure 29. Évolution dans le temps des températures de surface avec et sans variation de *hr*..... 104

Figure 30. Évolution dans le temps des températures de surface avec et sans variation de *n*. 106

Figure 31. Bilan énergétique à l'interface chaussée-atmosphère de jour (a) et de nuit (b). Station de Sal Bas journée du 14-02-2003. 108

Figure 32. Évolution de |*Ēmodèle*| du modèle et de |*Ēpersistance*| de la prévision par persistance sur 24 heures. Autoroute A75 périodes hivernales 1999-2002. 112

Figure 33. Évolution de *Dmodèle* du modèle et de *Dpersistance* de la prévision par persistance sur 24 heures. Autoroute A75 périodes hivernales 1999-2002. 113

Figure 34. (a) Température de surface prévue en fonction de la température mesurée + la droite de meilleur ajustement. (b) évolution du coefficient de corrélation sur 24 heures. (c) évolution de la pente 'a' de la droite la plus probable sur 24 heures. (d) évolution du biais systématique 'b' sur 24 heures. Autoroute A75 période 1999-2002. 116

Figure 35 Fréquence cumulée normalisée des écarts Ei entre la température de surface observée et la température de surface prévue en fonction des classes d'écart et ce pour 22h00 pour la période 1999-2002 toutes stations confondues. 119

Figure 36. Écart moyen et écart-type entre la température de surface observée et la température de surface prévue en fonction de l'heure pour la période 1999-2002 toutes stations confondues. 120

Figure 37. Évolution en fonction du mois de prévision de l'écart entre température observée et température prévue assorti de l'écart-type pour la 1ère phase diurne. Autoroute A75 période 1999-2002. 122

Figure 38. Évolution en fonction du mois de prévision de l'écart entre température observée et température prévue assorti de l'écart-type pour la phase nocturne. Autoroute A75 période 1999-2002 124

Figure 39. Évolution en fonction du mois de prévision de l'écart entre température observée et température prévue assorti de l'écart-type pour la 2nde phase diurne. Autoroute A75 période 1999-2002. 126

Figure 40. Évolution en fonction de l'état de la chaussée de l'écart entre température observée et température prévue assorti de l'écart-type pour la 1ère phase diurne. Autoroute A75 période 1999-2002. 128

Figure 41. Évolution en fonction de l'état de la chaussée de l'écart entre température observée et température prévue assorti de l'écart-type pour la phase nocturne. Autoroute A75 période 1999-2002 129

Figure 42. Évolution en fonction de l'état de la chaussée de l'écart entre température observée et température prévue assorti de l'écart-type pour la 2nde phase diurne. Autoroute A75 période 1999-2002 130

Figure 43. Bilan d'énergie à la surface de la chaussée et modèle de la chaussée d'après isba-route. 131

Figure 44. Évolution et comparaison sur 10 jours des températures de surface mesurée et simulée par le modèle isba-route. [Bouilloud 2004] 132

Figure 45. Évolution et comparaison sur 24 heures des températures de surface observée, prévue par le modèle physique et simulée par le modèle isba-route. Station de la Violette journée du 14-02-2003. 133

Figure 46. Régression linéaire de la température de surface prévue en fonction de la température de surface mesurée avant (a) et après (b) correction du biais de 19H00. Station du col de la Fageole. Période 1999-2002. Phase nocturne. 136

Figure 47. Distribution de l'écart entre la température de surface prévue et la température de surface mesurée avant (a) et après (b) la correction du biais de 19H00. Station du col de la Fageole. Période 1999-2002. Phase nocturne. 137

Figure 48. Évolution et comparaison sur 24 heures du rayonnement solaire global observé, prévu initialement par le modèle et prévu après correction par les données de l'imcce. Station de Sal Bas journée du 14-02-2003. 140

Figure 49. Comparaison du rayonnement solaire global cumulé entre 15H00 et 19H00 dans différents cas de figure. Station de Sal Bas journée du 14-02-2003. 141

Figure 50. Évolution et comparaison sur 24 heures des températures de surface observée, prévue initialement par le modèle et prévue après correction par les données de l'imcce. Station de Sal Bas journée du 14-02-2003. 142

Figure 51. Mur semi-infini..... 151

Figure 52. -Mur semi-infini soumis à une température imposée..... 153

Figure 53. Mur semi-infini soumis à un flux de forme sinusoïdale 154

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Variables météorologique d'entrée du modèle. 30

Tableau 2 Paramètres physiques d'entrée du modèle. 31

Tableau 3 Performances de la prévision de la température de la surface de la chaussée par le modèle au Royaume Uni durant l'hiver 1999/2000. 31

Tableau 4 Variables météorologique d'entrée du modèle. 33

Tableau 5 Variables météorologique d'entrée du modèle. 33

Tableau 6 Paramètres géographiques introduits par Chapman dans le modèle numérique de Thornes. 36

Tableau 7 Comparaison des performances de modèles de prévision de météorologie routière (Thornes et Shao, 1991) incluant les performances du modèle amélioré par Chapman. 36

Tableau 8 étude comparative des performances du rst en mode 1 et 2. 38

Tableau 9. Récapitulatif des performances et utilisations des modèles physiques des prévisions de températures de la surface du revêtement de la chaussée. 39

Tableau 10. Données d'observations : les variables atmosphériques. 42

Tableau 11. Données d'observation : les variables de chaussée. 44

Tableau 12. Les paramètres de chaussée locaux. 47

Tableau 13. Données prévisionnelles à 24 heures d'échéance fournies par Météo-France quotidiennement à 15H00. 49

Tableau 14. Position géographique des stations de météorologie routière. 78

Tableau 15. Organisation de la base de données. 80

Tableau 16. Écart entre observation et prévision en fonction de *cp1* pour la journée du 14-02-2003 sur les six stations de l'autoroute A75. 86

Tableau 17. Écart entre observation et prévision en fonction de *cp2* pour la journée du 14-02-2003 sur les six stations de l'autoroute A75. 87

Tableau 18. Écart entre observation et prévision en fonction de ρ pour la journée du 14-02-2003 sur les six stations de l'autoroute A75. 89

Tableau 19. Écart entre observation et prévision en fonction de *k* pour la journée du 14-02-2003 sur les six stations de l'autoroute A75. 91

Tableau 20. Écart entre observation et prévision en fonction de *Cd* jour pour la journée du 14-02-2003 sur les six stations de l'autoroute A75. 94

Tableau 21. Écart entre observation et prévision en fonction de *Cd* nuit pour la journée du 14-02-2003 sur les six stations de l'autoroute A75. 95

Tableau 22. Récapitulatif de la distribution des écarts entre observation et prévision pour la température de l'air et la température de surface ainsi que leurs écarts-types associés selon les classes. 98

Tableau 23. Écart sur la prévision en fonction de la variation de *Ta* pour la journée du 14-02-2003 sur les six stations de l'autoroute A75. 100

Tableau 24. Récapitulatif de la distribution des écarts entre observation et prévision pour l'humidité relative de l'air et la température de surface ainsi que leurs écarts-types associés selon les classes. 103

Tableau 25. Écart sur la prévision en fonction de la variation de *hr* pour la journée du 14-02-2003 sur les six stations de l'autoroute A75. 105

Tableau 26. Écart sur la prévision en fonction de la variation de *n* pour la journée du 14-02-2003 sur les six stations de l'autoroute A75. 107

Tableau 27. Conditions météorologiques à la date du 14-02-2003 - Station de Sal Bas. 108

Tableau 28. Comparaison des écarts moyens et écarts types entre observation et prévision pour le modèle et la prévision par persistance pour les six stations de l'autoroute A75 période 1999-2002. 114

Tableau 29. Performance générale du modèle par station. Autoroute A75 période 1999-2002. 115

Tableau 30. Performance relative de chaque station pour chaque phase. Autoroute A75 période 1999-2002. .. 121

Tableau 31. Performance relative de la 1ère phase diurne par station pour chaque mois de prévision. Autoroute A75 période 1999-2002. 123

Tableau 32. Performance relative de la phase nocturne par station pour chaque mois de prévision. Autoroute A75 période 1999-2002. 125

Tableau 33. Performance relative de la 2nde phase diurne par station pour chaque mois de prévision. Autoroute A75 période 1999-2002..... 126

Tableau 34. Performance par station de la prévision de la température de surface avant et après correction du biais de 19H00. 138

Tableau 35. Comparaison des performances de la prévision initiale de la température de surface et de la prévision après correction. Station de Sal Bas journée du 14-02-2003 143

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Albignat J.P., *Estimation du bilan thermique d'un lac profond à l'aide de données météorologiques de routine*, Thèse de 3ème cycle, Université de Clermont 2, 1978.

Bogren J. et T. Gustavsson, *Site specific road surface temperature forcast improvements by use of radiation measurments*, Proceedings of the 11th SIRWEC Conference, January 2002, Sapporo Japan, 2002.

Bogren J. et T. Gustavsson, *Study of road climate in cities*, Proceedings of the 10th SIRWEC Conference, 22-24 March 2000, Davos Switzerland, 89-93, 2000.

Bouilloud l., *Prévision des caractéristiques de surface d'une chaussée en condition hivernale*, Journées du Réseau Scientifiques et Technique, Lyon-France, 2005.

Brunt D., *Notes on radiation in the atmosphere*, Q. J. R. Meteorol. Soc., 58, 389-418, 1932.

Chang-Keun S. et L. Boram*, Prognosis of the road surface condistion in Korea using Surface Energy Balance theory,* Proceedings of the 11th SIRWEC Conference, January 2002, Sapporo Japan, 2002.

Chapman L., *Improved one dimensional energy balance modelling*, Proceedings of the 10th SIRWEC Conference, 22-24 March 2000, Davos Switzerland. 32-40, 2000.

Chapman L., J.E. Thornes et A.V. Bradley, *Numerical modelling of road surface temperature from a geographical parameter data base*, Meteor. App., 2001(b).

Chapman L. et J.E. Thornes, *A Blueprint fot 21st Century road ice prediction*, Proceedings of the 11th SIRWEC Conference, January 2002, Sapporo Japan, 2002.

Department of Transport, *Winter maintenance of motorways and other trunk roads* – Statement of service and code practice,1987.

Eyglunent B., *Manuel de thermique : théorie et pratique*, deuxième édition revue et augmentée, édition hermès, 1997.

Faure T., *Modèle de prévision de température de surface et sa valorisation*, Rapport de stage de DEA Climat et Physico-Chimie de l'Atmosphère, Laboratoire de Météorologie Physique et Laboratoire Régional de Ponts et Chaussées, 1996.

Highway Research Broad, *Environmental considerations in use of de-icing chemicals*. Highway Research Record No. 193, Highway Research Board, National Research

Council Washington, DC. 1967.

Isaka H., C. Fei, C. Aubert-Dassé et J-L. Paumier, *Rapport n°1 : Prévision de la température de surface*, LaMP Université Balise Pascal et Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand, 1991.

Kasten F., *A new Table and Approximation Formula for Relative Optical Air Mass*, Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol. B14, 206-223, 1966.

Liou K.-N., *An Introduction to Atmospheric Radiation*. Academic Press, New York, 1980.

Mc Donald J.E., *Direct absorption of solar radiation by atmospheric water vapor*, J. Appl. Met., 17, 319-328, 1960.

Mermoud A., *Cours de Physique du Sol*, Chapitre 6, Régime thermique du sol, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2001.

Noilhan J. et J.F. Mahfouf, *The ISBA land surface parameterisation scheme, Global and Planetary Change*, 13, 145-159, 1996.

Noilhan J. et S. Planton, *A simple parameterization of land surface processes for meteorological models*, Monthly Weather Review, 117, 536-549, 1989.

OECD, Road Transport Research Program Rep. – *Curtailing usage of de-icing agents in winter maintenance. Organisation for Economic Co-operation and Development*, Paris, France 125pp,1989.

Olioso A., *Simulation des échanges d'énergie et de masse d'un couvert végétal, dans le but de relier la transpiration et la photosynthèse aux mesures de reflectance et de température de surface*, Université Montpellier 2, Montpellier, 1992.

Paumier J.-L., A. Pérus et H. Isaka, *Facteurs météorologiques de la sécurité routière : Détermination et prévision des conditions de formation du verglas - Bilan de l'étude 1988,* Programme détaillé de l'étude 1989, annexe 5, 1989.

Paumier J.-L. et M. Arnal, *Expérimentation Préviroute sur l'autoroute A75 dans le Cantal*, Revue Générale de Routes et Aérodromes, n° 758, 44-55, 1998.

Paumier, Document interne du LRPC, 1984.

Perrin de Brichambaut C., *Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels*, GV Gauthier-Villars-Paris, Monographes de météorologie : collection publiée sous la direction de A. Viaut directeur de la Météorologie Nationale, 1963.

Pérus A., J.-L. Paumier et H. Isaka, *Détermination et prévision des conditions de formation du verglas routier*, Exposé présenté lors de la réunion du groupe de travail METEO-ROUTES les 23 et 24 novembre 1987 à la direction de la météorologie, p18, 1987.

Rayer P.J., *The Meteorological Office Forecast road surface temperature model*, Meteor. Mag., 116, 180-191, 1989.

Reitan C.H., *Surface dew point and water vapor aloft*, J. Appl. Met., 2, 776-779, 1963.

Sass B.H., *A Numerical Forecasting System for the Prediction of Slippery Roads*, J. Appl. Meteor., 36, 801-817, 1997.

Sass B.H., *A numerical model for prediction of road temperature and ice*, J. Appl. Meteor., 31, 1499-1506, 1992.

Shao J. et P.J. Lister, *An automated now-casting model of road surface temperature and state for winter road maintenance*, J. Appl. Met., 35, 1352-1361, 1996.

Shao J. et P.J. Lister, *The prediction of road surface state and simulation of the shading effect*, Bound. Layer Meteor., 73, 411-419, 1995.

Shao J., P.J. Lister et A. McDonald, *A surface temperature prediction model for porous asphalt pavement and its validation*, Meteor. Appl., 1, 129-134, 1994.

Shao J., *A Winter road surface temperature prediction model with comparison with to others.* PH.D. thesis, The University of Birmingham, 245pp, 1990.

Stephanson T.E., *Wisconsin's winter weather system,* Proceedings of the 4th International Conference on Weather and Road Safety, Florence, Italy, Accademia Dei Georgofili, 61-101, 1988.

Thornes J.E., *The prediction of ice formation on motorways*, Ph.D. thesis, University College, London, 392pp, 1984.

Tomassi C., *Determination of the total precipitable water by varying the intercept in Reitan's relationship*, J. Appl. Met., 20, 1058-11069, 1981.

Yahia J.C., J.-L. Paumier et P. Personne, *Assessment of a physical model for the prediction of surface temperatures to prevent ice formation on roadways*, European Geosciences Union, 2005.

Résumé

Assurer la sécurité routière et maintenir les autoroutes en état de circulation est une charge qui incombe aux gestionnaires autoroutiers. Cette charge se voit compliquer en période hivernale par des conditions météorologiques difficiles dont la formation de verglas routier. Pour lutter contre ce fléau, il convient de savoir prévoir la température de la surface du revêtement de la chaussée. Une telle approche notamment mise en place au travers du système PRÉVIROUTE sur l'autoroute de semi montagne A75, a servi de cadre aux études réalisées au cours de cette thèse. Les études du système PRÉVIROUTE se sont articulées autours de deux thèmes : l'étude de la sensibilité du système aux variables et paramètres du modèle physique de prévision de la température de surface à 24 heures d'échéance qui le constitue et l'étude des performances de ce système dans différentes conditions afin d'en connaître les limites.

L'étude de la sensibilité de la prévision de la température de surface aux variables et aux paramètres du modèle a commencé par la constitution d'une base de données contenant huit années de mesures et de prévisions météorologiques relatives à l'autoroute A75. Ensuite, pour cette étude il a été procédé de deux manières différentes. La première a consisté à faire la relation entre les erreurs sur les variables météorologiques prévisionnelles et celles faites sur les prévisions de la température de surface. La seconde a consisté à apporter des variations volontaires sur les variables et paramètres et d'en observer l'influence sur la prévision de la température de surface. Cette étude a permit de conclure que parmi les paramètres du modèle, seule la diffusivité thermique possède une influence considérable sur le modèle. Quant à ce qui concerne les variables atmosphériques alimentant le modèle, ce sont la température de l'air et la nébulosité qui jouent le rôle le plus important par leur intervention dans le calcul des grandeurs radiatives.

Par ailleurs, j'ai évalué en utilisant la base de données constituée, la performance du modèle dans diverses configurations. Il fut ainsi possible de distinguer trois phases de fonctionnement pour ce modèle : une première phase diurne ou le modèle fournit des prévisions avec un écart moyen de 2,5°C±3,2°C, une phase nocturne ou le modèle fournit des prévisions avec un écart moyen de -0,1°C±2,1°C et une seconde phase diurne ou le modèle fournit des prévisions avec un écart moyen de -1, 1°C±3,8°C. J'ai pu constater et démontrer que ces performances étaient inchangées quel que soit le mois de la prévision, l'état de la surface de la chaussée ou le lieu géographique ce qui fait du système PRÉVIROUTE un outil performant pour la prévision de la température de surface spécialement en phase nocturne, phase critique en terme de formation de verglas.

Mots-clés : météorologie routière, modélisation, base de données, transfert radiatif, conduction thermique.

Abstract

Ensuring road safety and maintaining good traffic conditions are road managers' duties. This responsibility is being complicated during winters with harder meteorological conditions especially road-icing. To fight road-icing, it is proper to be able to foresee the temperature of roads surface. Such an approach was the framework of the studies carried out during this thesis and has been set up through a system called 'PREVIROUTE' on a semi-mountains motorway, the A75 motorway in France. The studies were based on two themes. First, the study of the system sensitivity to variables and parameters of the 24 hours term surface temperature forecasting physic model. Second, the study of the system's performances in different conditions in order to know its limits.

The study of surface temperature forecasts sensitivity to variables and parameters of the model has started with the constitution of a database containing eight years of measures and meteorological forecast on the motorway A75. Then the study has been carried out in two ways. First, the connection between the forecasted meteorological variables' errors and the errors on surface temperature forecasts has been done. Then voluntary changes on the variables and parameters were made and the influence on surface temperature forecasts observed. This study allowed concluding that among the model parameters; only thermal diffusivity has a significant influence on the model. As for the atmospheric variables, it is air temperature and cloud cover which are the more important with their role in the radiation magnitude's calculation.

Moreover, using the database I have evaluated the model performance in various configurations. It has been possible to distinguished three functioning phases for the model. A first diurnal phase, in which the model gives an average difference forecast of 2.5°C±3.2°C; a nocturnal phase with an average difference forecast of -0.1°C±2.1°C. And a second diurnal phase, with an average difference forecast of -1.1°C±3.8°C. I have been able to notice and demonstrate that no matter which month of forecast, road surface conditions or geographical location, these performances remain unchanged. This makes the 'PREVIROUTE' system an efficient tool, especially for the surface temperature forecast at night, a critical phase in road icing.

Keywords : road meteorology, modelling, database, radiative transfer, thermal conduction