

UNIVERSITE TOULOUSE III – PAUL SABATIER

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE TOULOUSE III

Spécialité : Météorologie, Hydrologie et Nivologie

Ludovic BOUILLOUD

Sujet de thèse :

Modélisation des caractéristiques de surface d'une chaussée en condition hivernale en fonction des conditions météorologiques

Soutenue le 13 octobre 2006, devant le jury composé de :

M. Hervé Andrieu	Rapporteur
M. Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry	Président
M. Jean-Marie Konrad	Rapporteur
M. Gilles Lefebvre	Examinateur
M. Jean Livet	Examinateur
M. Eric Martin	DIRECTEUR DE THÈSE

Météo-France, Centre National de Recherches Météorologiques, Centre d'Etudes de la Neige
1441, rue de la Piscine, 38400 Saint-Martin d'Hères, France

Remerciements

Tout d'abord, je dois un grand merci à mon directeur de thèse, Eric Martin, pour son aide et ses précieux conseils. Ses compétences en météorologie, modélisation...m'ont permis de réaliser ce travail. Je le remercie pour tout le temps qu'il a su me consacrer et pour tout ce qu'il m'a appris. Je tiens à le remercier particulièrement pour sa disponibilité et son aide permanente, malgré la distance entre Grenoble et Toulouse.

Je tiens également à remercier Eric Brun pour m'avoir fait confiance après mon stage de DEA et m'avoir permis d'effectuer cette thèse.

Je remercie également le LRPC de Nancy, plus particulièrement Mario Marchetti et Jean Livet, qui ont suivi ce travail et m'ont fait partager leurs connaissances sur la viabilité hivernale. Je les remercie également pour m'avoir permis d'effectuer un séjour dans un service d'exploitation. Ce séjour m'a permis d'apprécier le contexte opérationnel et m'a été très utile. J'en profite donc également pour remercier l'entreprise ATMB (Autoroute et Tunnel du Mont-Blanc), particulièrement Christophe Dubois, pour m'avoir accueilli durant une semaine.

Merci également à l'équipe MC2 de GMME, plus particulièrement Florence Habets, pour m'avoir accueilli à Toulouse au début de cette thèse et m'avoir aidé pour l'adaptation d'ISBA à la problématique des routes.

Un merci particulier à ceux qui ne participaient pas directement à ce travail mais qui ont eu un rôle essentiel : tous les membres du CEN. Je tiens à remercier Yves Durand, Gérald Giraud et Pierre Etchevers qui ont toujours répondu à mes fréquentes questions sur les modèles, les statistiques ou le fortran. J'adresse également un merci tout particulier à Yves Lejeune qui m'a permis de travailler avec lui sur la problématique du Zongo et avec qui j'ai pu partager de nombreux moments. Merci également à tout ceux qui ont travaillé sur le projet Gelcro et qui ont constitué la base de données sans laquelle ce travail n'aurait pas existé. Je remercie également les informaticiens, notamment Jean-Louis Dumas et François Touvier, pour m'avoir aidé à résoudre mes problèmes informatiques. Je tiens également à remercier Delphine Charlieu pour m'avoir aidé dans la mise en page de ce manuscrit.

Je tiens également à remercier Hervé Andrieu et Jean-Marie Konrad qui ont accepté d'endosser la charge de rapporteurs de cette thèse et pour la pertinence de leurs remarques.

Table des matières

1 Introduction générale	7
2 La viabilité hivernale – vue d'ensemble	13
2.1 Introduction	15
2.2 La viabilité hivernale	16
2.2.1 Quelques définitions.....	16
2.2.2 La viabilité hivernale dans le monde	17
2.2.3 La viabilité hivernale en France	20
2.3 Les facteurs intervenant en viabilité hivernale	21
2.3.1 Les opérations de maintenance	22
2.3.1.1 Les déneigements effectués par les services d'exploitation	22
2.3.1.2 L'utilisation de fondants routiers	22
2.3.2 Le trafic routier	24
2.3.2.1 Les conséquences du trafic sur le bilan thermique de surface	24
2.3.2.2 Les conséquences du trafic sur le bilan hydrique de surface	26
2.3.2.3 Modification structurelle de la neige par le trafic	26
2.3.2.4 L'impact du trafic sur les fondants routiers	27
2.3.3 Le contexte opérationnel – cas pratique	29
2.4 Les modèles de prévision d'état des routes	31
2.4.1 Les modèles statistiques.....	31
2.4.2 Les principaux modèles physiques.....	33
2.4.3 La gestion des paramètres extérieurs (effets locaux et trafic).....	34
2.4.4 La prévision de l'état de surface en hiver (neige et verglas).....	37
2.4.5 Les systèmes opérationnels routiers.....	39
2.4.6 Le traitement de la neige dans les modèles.....	41
2.4.7 Conclusion sur les modèles de prévision d'état des routes.....	42
2.5 Le projet Gelcro	43
2.5.1 Les objectifs.....	44
2.5.2 Le site expérimental.....	44
2.5.3 le protocole de mesure en conditions naturelles – classification de l'interface....	46
2.5.4 Les résultats expérimentaux en conditions naturelles.....	49
2.5.5 La prise en compte des fondants routiers et du trafic.....	50
2.5.5.1 Modification de la couche de neige par action du trafic.....	50
2.5.5.2 Prise en compte des fondants routiers.....	52
2.5.6 Le modèle initial Gelcro.....	53
2.6 Conclusion du chapitre.....	53
3 La modélisation	57
3.1 Introduction	59
3.2 Les éléments du modèle couplé	61
3.2.1 Le modèle de sol ISBA	61
3.2.1.1 Equations	64
3.2.1.2 Propriétés thermiques du sol	65
3.2.1.3 Transfert de chaleur dans le sol	67
3.2.1.4 Transferts hydriques dans le sol	70
3.2.1.5 Résolution numérique	73

3.2.1.6 Présence de neige en surface	73
3.2.1.7 Conclusion	76
3.2.2 Le modèle CROCUS	76
3.2.2.1 Transferts thermiques dans le manteau neigeux	77
3.2.2.2 Transferts hydriques dans le manteau neigeux	80
3.2.2.3 Métamorphose des grains de neige et tassemement mécanique	81
3.2.2.4 Conclusion	82
3.3 L'adaptation des modèles ISBA-DF et CROCUS à la problématique des routes	82
3.3.1 Adaptation du modèle ISBA-DF : ISBA-Route	82
3.3.2 Les modifications apportées au modèle CROCUS	86
3.3.2.1 Problèmes numériques	86
3.3.2.2 Modification des phénomènes physiques	88
3.4 Le modèle couplé ISBA-Route/CROCUS	90
3.4.1 Principe	90
3.4.2 Transferts thermiques entre la route et le manteau neigeux	91
3.4.2.1 Flux d'écoulement	92
3.4.2.2 Flux solaire	92
3.4.2.3 Flux de conduction	92
3.4.2.4 Résistance thermique à l'interface	93
3.4.3 Transferts hydriques entre la route et le manteau neigeux	97
3.4.3.1 Conditions pour les remontées capillaires	97
3.4.3.2 Couche saturée en eau liquide selon le type de revêtement	99
3.4.4 Résolution numérique	100
3.4.4.1 Principe de couplage	100
3.4.4.2 Calcul du flux de conduction	102
3.4.4.3 Gestion des transferts hydriques entre la chaussée et la neige	108
3.4.5 Conclusion	108
3.5 Conclusion du chapitre	109
4 Validation du modèle couplé ISBA-Route/CROCUS.....	111
4.1 Introduction	113
4.2 Validation sur le site du Col de Porte	114
4.2.1 Les conditions de simulation	114
4.2.1.1 La chaussée modélisée	114
4.2.1.2 Les données météorologiques	115
4.2.1.3 Initialisation de la simulation	115
4.2.2 Tests de sensibilité du modèle	116
4.2.3 Résultats de simulations pour trois épisodes typiques	119
4.2.3.1 Episode 1 : du 16 au 26 février 1998	119
4.2.3.2 Episode 2 : du 12 au 23 décembre 1998	121
4.2.3.3 Episode 3 : du 7 au 20 avril 2000	123
4.2.3.4 Conclusion sur les simulations d'épisodes	125
4.2.4 Résultats de simulations pour les hivers entiers	126
4.2.4.1 Résultats de simulation pour l'hiver 1998/99	126
4.2.4.2 Analyse des résultats	129
4.2.4.3 Résultats statistiques pour les 3 hivers de la campagne	131
4.2.4.4 Température à 60cm de profondeur	132
4.2.4.5 Sensibilité à la rétention en surface du revêtement	134
4.2.4.6 Conclusion sur les simulations à long terme	135
4.3 Utilisation du modèle de neige ISBA-ES	136
4.4 Sensibilité au revêtement (site du LRPC Nancy)	138

4.4.1 Les données expérimentales	138
4.4.1.1 Les revêtements utilisés	139
4.4.1.2 Les données de forçage météorologique	140
4.4.2 Paramétrisation des revêtements	142
4.4.2.1 Conductivité hydraulique à saturation	143
4.4.2.2 Coefficient de rétention	144
4.4.2.3 Potentiel hydrique à saturation	145
4.4.2.4 Rétention de la couche de surface pour les remontées capillaires.....	145
4.4.3 Les simulations	146
4.4.3.1 Simulation des températures des différents revêtements	146
4.4.3.2 Simulation des hauteurs de neige sur les différents revêtements	150
4.4.4 Sensibilité à la porosité du revêtement	155
4.4.5 Conclusion sur la validation effectuée à partir des revêtements du LRPC	156
4.5 Conclusion du chapitre	157
5 Prévision sur le site expérimental du Col de Porte	161
5.1 Introduction	163
5.2 Les conditions de prévision	163
5.2.1 Le modèle SAFRAN	164
5.2.2 Principe et intérêt de la prévision	165
5.2.2.1 Initialisation de la prévision	165
5.2.2.2 Les déneigements dans le modèle	167
5.2.2.3 Le principe de la prévision	168
5.2.3 Conclusion	168
5.3 Résultats des prévisions sur le site expérimental	168
5.3.1 Les différents types de prévision	168
5.3.2 Résultats	169
5.3.3 Analyse des résultats	175
5.3.3.1 Simulations avec le forçage mesuré	175
5.3.3.2 Simulations avec le forçage analysé	176
5.3.3.3 Prévision de la température de surface	177
5.3.3.4 Prévision de la tenue de la neige au sol	178
5.3.4 Sensibilité de la prévision	179
5.3.4.1 Exemple de résultats pour de bonnes prévisions	180
5.3.4.2 Exemple de résultats pour de mauvaises prévisions	182
5.3.4.3 Exemple de résultats pour des cas limites	183
5.3.4.4 Conclusion sur la sensibilité de la prévision	184
5.4 Conclusion du chapitre	185
6 Prévision à l'échelle de la France	187
6.1 Introduction	189
6.2 Le modèle spatialisé	189
6.3 Recherche d'un état initial	190
6.4 Validation à partir de données de stations météoroutières	191
6.4.1 Données de validation.....	192
6.4.2 Autoroute A40	194
6.4.3 Autoroute A20	202
6.4.4 Autoroute A4	205
6.4.5 Autoroute A10	210
6.4.6 Aéroport de Paris-Orly.....	213
6.4.7 Conclusion sur les validations ponctuelles	216

6.5 Les épisodes neigeux de l'hiver 2004/05	218
6.5.1 Données de validation	218
6.5.2 Episode 1 :du 28 au 29 décembre 2004	220
6.5.3 Episode 2 : du 24 au 25 janvier 2005	223
6.5.4 Episode 3 : du 3 au 4 mars 2005	226
6.5.5 Episode 4 : du 5 au 6 mars 2005	229
6.5.6 Autres épisodes neigeux	231
6.5.7 Conclusion sur les épisodes neigeux	231
6.6 Conclusion du chapitre	232
7 Conclusion générale	235
Annexe A : Les chaussées expérimentales	241
Annexe B : Résolution numérique du profil de température.....	247
Annexe C : Résultats de simulation au Col de Porte.....	250
Annexe D : Résultats de simulation sur le site du LRPC de Nancy.....	257
Annexe E : Les épisodes neigeux de l'hiver 2004/05.....	261
Liste des symboles.....	277
Références bibliographiques.....	281

Introduction générale

En période hivernale, la présence de neige sur les chaussées peut avoir de graves conséquences sur le trafic routier. L'intervention des services d'exploitation routiers est nécessaire pour limiter les risques d'accidents et maintenir autant que possible la viabilité du réseau routier. Les conditions de circulation sont influencées par de nombreux paramètres : les conditions météorologiques, les interventions des services d'exploitation et également l'usager (comportement et aptitude, équipement du véhicule). Dans le cas d'épisodes neigeux importants, la densité du trafic rend difficile le déneigement par les services d'exploitation. La prévision des épisodes neigeux sur les routes peut s'avérer très utile, elle permet une meilleure coordination et une plus grande rapidité d'intervention des services d'exploitation. En plus d'une amélioration de la viabilité du réseau routier, intérêt principal pour l'usager, le caractère économique d'une prévision correcte est un facteur important pour l'exploitant. En effet, le coût important des opérations de maintenance, comme le déneigement et l'épandage de fondants routiers, pourrait être réduit grâce à un outil d'aide à la décision performant. De plus, une meilleure gestion de l'utilisation des stocks de fondants routiers engendrerait une limitation de l'impact de ces fondants sur l'environnement.

Un très grand nombre de pays situés en Europe, en Amérique du Nord, en Asie ou en Océanie sont soumis à des problèmes de viabilité hivernale, c'est à dire l'état des conditions de circulation en situations hivernales. Chaque pays possède sa propre stratégie, la viabilité hivernale étant dépendante à la fois des conditions climatiques, géographiques et démographiques. Cependant, la majorité des pays utilise des outils d'aide à la décision basés sur des modèles de prévision de la température de surface des routes. La complexité de ces outils d'aide à la décision est croissante, afin de servir au mieux l'usager et l'exploitant. Ainsi, de nombreuses données sont utilisées afin d'améliorer la prévision de l'état des routes. Par exemple, les grands itinéraires routiers sont équipés de stations météoroutières, qui permettent une prévision à l'échelle de l'itinéraire routier. Le principe est une prévision de la température de surface associée aux stations météoroutières, complétées par une extrapolation entre les stations météoroutières à partir de signatures thermiques du réseau obtenues avec des véhicules équipés de radiomètres infrarouges. D'autres outils comme une expertise humaine, des observations satellites, peuvent être utilisés afin d'améliorer la prévision. La multiplication des données rend la prévision de plus en plus précise, cependant le coût de production des

prévisions devient de plus en plus élevé. Dans les modèles associés aux stations météoroutières, l'occurrence de neige est traitée de manière très simple, à partir de la température de surface et des précipitations. Aucun modèle ne permet de simuler explicitement l'occurrence d'une couche de neige sur une route, et ainsi de prendre en compte l'importance et la variabilité du flux thermique par conduction entre la chaussée et la neige. Ce flux énergétique est prépondérant concernant le devenir d'une couche de neige déposée sur une chaussée.

Afin d'améliorer nos connaissances sur l'interface entre la chaussée et la neige, et ainsi les transferts thermiques et hydriques associés, un projet nommé Gelcro est mené en France depuis 1995. Ce projet associe les compétences respectives du Centre d'Etudes de la Neige de Météo-France, du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, des Centres d'Etude Technique de l'Equipement de l'Est et de Lyon, de la Direction Départementale de l'Equipement de l'Isère et du Service d'Etude Technique des Routes et Autoroutes. Le site expérimental de Météo-France situé au Col de Porte (1320m, Isère), a été équipé pour les besoins du projet de chaussées expérimentales instrumentées (sondes de température, capteurs de hauteur de neige et caméra vidéos), complétant l'instrumentation du site (mesure de vent, de température de l'air, de précipitation, de rayonnement infrarouge et solaire). Ce projet a permis d'une part d'accroître considérablement les connaissances sur les phénomènes mis en jeu à l'interface entre la chaussée et la neige, mais également de documenter soixante épisodes de chute de neige sur chaussée (température en surface et à différentes profondeurs de la chaussée, hauteur de neige sur la chaussée).

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet Gelcro. Il fait suite à la campagne expérimentale. Le but est le développement d'un modèle permettant de simuler le comportement d'une couche de neige se déposant sur une chaussée en conditions naturelles (sans prise en compte du trafic et des fondants routiers). Ce modèle est envisagé à partir du couplage d'un modèle de neige et d'un modèle de sol, et il doit intégrer les connaissances acquises au cours de l'expérimentation. Le modèle est envisagé dans un but opérationnel de prévision de l'état de surface des routes. Ces prévisions d'état de surface des chaussées routières doivent être effectuées uniquement à partir des données météorologiques. Ainsi, l'absence de toute instrumentation telle que les stations météoroutières, permet une prévision sur une échelle plus large que l'itinéraire routier. L'échelle envisagée pour ce projet est celle de la France. La prévision se place dans un cadre proche des systèmes opérationnels de Météo-France, utilisés pour la prévision hydrologique

(chaîne SAFRAN/ISBA/MODCOU) ou de température de surface (chaîne SAFRAN/ISBA-Route). La résolution horizontale associée à ces outils opérationnels est d'environ 8 kilomètres.

Présentation du plan de la thèse

Ce rapport se divise en quatre parties.

Le **chapitre 2** se propose de faire le point sur les connaissances et les outils utilisés en viabilité hivernale. La première partie de ce chapitre présente la viabilité hivernale et décrit les différents facteurs qui influencent l'état des routes. Ces facteurs sont les interventions des services d'exploitation (les déneigements ou l'épandage de fondants routiers) ou encore des paramètres extérieurs comme le trafic routier. La seconde partie de ce chapitre présente différents modèles de prévision utilisés dans le monde. Enfin, la dernière partie de ce chapitre s'intéresse au projet Gelcro. Sont présentés les travaux antérieurs à ce travail, qui ont permis d'aboutir à une connaissance approfondie des phénomènes mis en jeu à l'interface entre la chaussée et la neige, et à la constitution d'une vaste base de données.

Le **chapitre 3** est quant à lui relatif au modèle développé. La première partie de ce chapitre présente les modèles utilisés pour le développement d'un modèle couplé : le modèle de sol ISBA et le modèle de neige CROCUS. La seconde partie explique les différentes adaptations qui ont été nécessaires afin de pouvoir utiliser ces deux modèles dans le contexte de la viabilité hivernale, contexte éloigné de leur problématique d'origine. Enfin, la dernière partie de ce chapitre décrit le principe de couplage, et les différentes paramétrisations adoptées afin d'intégrer les résultats de la campagne expérimentale du projet Gelcro.

La validation du modèle développé est décrite dans le **chapitre 4**. La première partie de ce chapitre est relative aux comparaisons des résultats des simulations sur les hivers correspondant aux épisodes de l'expérimentation effectuée sur le site du col de Porte (1997/1998, 1998/1999 et 1999/2000). Ensuite, la seconde partie de ce chapitre s'intéresse à la sensibilité du modèle à différents types de revêtements. Sont discutés dans cette section, les résultats de simulations comparés aux mesures obtenues sur les différents revêtements du site du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Nancy.

La dernière partie est relative à la prévision des caractéristiques de surface des routes. Le **chapitre 5** est consacré à la prévision effectuée sur le site expérimental du Col de Porte. Ce chapitre montre les résultats de prévision obtenus sur les trois hivers de la campagne expérimentale. La comparaison avec les mesures et les simulations effectuées pour la validation

(avec les données météorologiques observées) permet de discuter l'utilisation du modèle en prévision.

Le **chapitre 6** est quant à lui relatif aux prévisions à l'échelle de la France. Ce chapitre s'intéresse aux résultats des prévisions effectuées sur l'hiver 2004/05. Les résultats globaux de simulation sur l'hiver 2004/2005 sont comparés à des mesures issues du réseau de Météo-France, puis certains points de grille particuliers correspondant à des stations météoroutières sont discutés.

Les conclusions et les futures perspectives envisageables pour le modèle couplé ISBA-Route/CROCUS sont discutées dans le **chapitre 7**.

Chapitre 2

La viabilité hivernale - vue d'ensemble

La viabilité hivernale - vue d'ensemble

2.1 Introduction

Ce chapitre se propose de faire le point sur les connaissances et les outils utilisés en viabilité hivernale. Une définition générale de la viabilité hivernale dans le monde, et plus particulièrement en France, est donnée en guise d'introduction.

De nombreux facteurs ont une influence sur l'état des routes. En effet, les interventions des services d'exploitation, c'est à dire les déneigements ou l'épandage de fondants routiers, ou encore le trafic ont une influence plus ou moins importante sur l'état de surface des routes (quantité d'eau liquide, de verglas ou de neige en surface, température de surface). L'impact peut être sensible sous plusieurs formes : mécanique, thermique ou hydrique. Ainsi, les différents effets sont présentés dans ce paragraphe.

Afin de prévoir l'état de surface des routes, les pays soumis à la viabilité hivernale disposent d'outils basés sur des modèles numériques de prévision de la température de surface. Les principaux outils de prévision de l'état des routes sont présentés.

La connaissance des transferts thermiques et hydriques mis en jeu à l'interface entre la chaussée et la neige reste relativement méconnue. Afin de pallier ce manque de connaissance, un projet nommé Gelcro est mené en France depuis 1995, associant les compétences respectives du Centre d'Etudes de la Neige de Météo-France, du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, des Centres d'Etude Technique de l'Equipement de l'Est et de Lyon, de la Direction Départementale de l'Equipement de l'Isère et du Service d'Etude Technique des Routes et Autoroutes. Les résultats expérimentaux de ce projet ont permis d'accroître considérablement les connaissances sur l'interface, et ils ont été largement utilisés dans ce travail. C'est pourquoi le projet et les principaux résultats antérieurs à ce travail sont présentés dans ce chapitre.

2.2 La viabilité hivernale

2.2.1 Quelques définitions

Afin de faciliter la compréhension des travaux de ce manuscrit, une définition des expressions utilisées fréquemment est donnée dans ce paragraphe.

Viabilité hivernale

La viabilité hivernale est l'état des conditions de circulation en situations hivernales résultant des diverses actions et dispositions prises par tous les acteurs, pour s'adapter ou combattre les conséquences directes ou indirectes des phénomènes hivernaux sur le réseau routier.

Chaussée

On désigne par l'expression "chaussée" l'intégralité de la structure verticale multicouche de la chaussée routière.

Etat de la route

On s'intéresse dans ce travail à la prévision de l'état des routes. On désigne par cette expression les conditions thermiques et hydriques en surface du revêtement de la chaussée. Plus particulièrement, on s'intéresse ici à la présence de neige en surface de la chaussée, ainsi qu'à la température de surface du revêtement (utilisée pour la prévision d'un éventuel risque de gel). Concernant la présence de neige en surface, on emploiera fréquemment l'expression "occurrence de neige au sol", expression signifiant une présence de neige en surface de la chaussée.

Forçage

Les conditions de surface d'une chaussée résultent de plusieurs facteurs, dont les conditions météorologiques. D'un point de vue de la modélisation, les données météorologiques d'entrée d'un modèle de simulation du comportement d'une route sont désignées par le terme "forçage". Cette expression sous-entend que la chaussée ne rétro-agit pas sur l'atmosphère.

2.2.2 La viabilité hivernale dans le monde

La neige et le verglas sur les routes causent des problèmes aux usagers pendant les saisons froides, nécessitant des interventions curatives. Ainsi, l'état des routes dépend de plusieurs acteurs : les usagers et le personnel d'entretien des routes (pouvoirs publics ou exploitants autoroutiers). Un très grand nombre de pays situés en Europe, en Amérique du Nord, en Asie ou en Océanie sont soumis à des problèmes de viabilité hivernale. Ainsi, de nombreux types de climats (figure 2.1) sont responsables de dégradations des conditions de circulation en périodes froides.

Climats des différents pays	
Autriche	Tempéré – Continental – Montagneux
Belgique	Tempéré maritime – Continental (dans certaines zones limitées)
Canada	Tempéré maritime – Continental – Sub-arctique – Arctique
Danemark	Tempéré maritime
Estonie	Tempéré – Continental (dans certaines zones limitées)
Finlande	Tempéré – Continental – Sub-arctique
France	Tempéré maritime – Continental – Montagneux - Méditerranéen
Allemagne	Tempéré – Continental – Maritime (dans certaines zones limitées)
Islande	Maritime – Continental – Montagneux – Sub-arctique
Italie	Tempéré – Montagneux - Méditerranéen
Japon	Tempéré maritime – Continental - Montagneux
Lettonie	Tempéré – Continental (dans certaines zones limitées)
Lituanie	Tempéré – Continental (dans certaines zones limitées)
Norvège	Tempéré – Continental – Montagneux - Sub-arctique
Québec	Tempéré maritime – Continental – Sub-arctique – Arctique
Slovénie	Tempéré – Montagneux - Méditerranéen
Espagne	Tempéré maritime - Continental – Montagneux - Méditerranéen
Suède	Tempéré – Continental – Montagneux - Sub-arctique
Suisse	Tempéré – Continental – Montagneux
Pays-Bas	Tempéré maritime
Royaume-Uni	Tempéré maritime
Etats-Unis	Tempéré maritime – Continental – Montagneux – Sub-arctique

Figure 2.1 : Données climatiques pour des pays soumis à la viabilité hivernale, d'après Snow & Ice Databook 2006.

De plus, chaque pays possède sa propre démographie, son organisation politique, son propre réseau routier et sa propre intensité de trafic (figure 2.2).

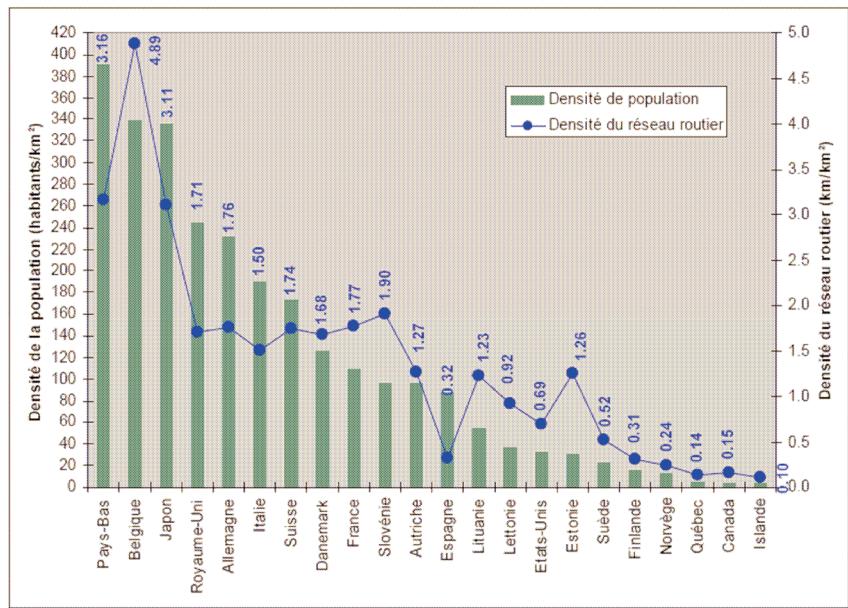


Figure 2.2 : Densités de population et du réseau routier pour des pays soumis à la viabilité hivernale, d’après Snow & Ice Databook 2006.

C'est pourquoi les stratégies de gestion opérationnelle des réseaux routiers sont propres à chaque pays, voire à chaque région pour les pays vastes soumis à des conditions climatiques très différentes. De même, l'usager a un rôle important dans la stratégie de gestion hivernale du réseau routier. Par exemple, les régions soumises à des conditions climatiques plus clémentes ont besoin d'un entretien hivernal très important, en raison d'une plus grande demande de la part des citoyens car les personnes vivant dans des régions au climat plus rude sont plus habituées à des conditions de circulation difficiles (Snow & Ice Databook 2006). La figure 2.3 récapitule les principaux phénomènes hivernaux et les besoins d'entretien auxquels les gestionnaires routiers de différents pays sont confrontés. Cette classification a été établie en fonction des conditions climatiques, de l'utilisation de la route (intensité du trafic, modes de transport,...) ainsi qu'à divers paramètres relatifs au conducteur (comportement et aptitude, équipement des véhicules,...).

Conditions météorologiques hivernales par rapport aux densités de population et de routes									
Densité de population	Principaux types de conditions météorologiques hivernales								
	Brouillard givrant	Gel long et sévère	Température fluctuant autour de 0°C	Chutes de neige modérées	Chutes de neige brèves et importantes	Congères	Verglas	Importantes chutes de neige	Avalanches
Elevée (>200 hab./km²)	Belgique Allemagne Pays-Bas Royaume-Uni	Japon	Belgique Allemagne Pays-Bas Royaume-Uni	Belgique Allemagne Pays-Bas Royaume-Uni	Belgique Allemagne Japon	Japon	Belgique Allemagne Japon Pays-Bas Royaume-Uni	Japon	Japon
Moyenne (<200 mais >80 hab./km²)	Autriche Danemark France Italie Slovénie Espagne Suisse	Autriche Danemark France Italie Slovénie Espagne Suisse	Autriche Danemark France Italie Slovénie Espagne Suisse	Autriche France Italie Slovénie Espagne Suisse	Autriche France Italie Slovénie Espagne Suisse	Autriche Danemark France Italie Slovénie Espagne Suisse	Autriche Danemark France Italie Slovénie Espagne Suisse	Autriche Danemark France Italie Slovénie Espagne Suisse	Autriche Slovénie Suisse
Basse (<80 hab./km²)	Canada Finlande Norvège Québec Suède Etats-Unis	Etats-Unis	Estonie Islande Lettonie Lituanie Norvège Suède Etats-Unis	Norvège Québec Etats-Unis	Canada Norvège Québec Etats-Unis	Canada Islande Norvège Québec Suède Etats-Unis	Canada Estonie Finlande Islande Lettonie Lituanie Norvège Québec Suède Etats-Unis	Canada Finlande Norvège Québec Suède Etats-Unis	Norvège Etats-Unis

Figure 2.3 : Besoins d'entretien et types de conditions hivernales pour des pays soumis à la viabilité hivernale, d'après Snow & Ice Databook 2006.

La décision d'entreprendre ou non une opération d'entretien hivernal est relativement importante. En effet, les sorties inutiles ont un coût économique (gaspillage de ressources) et environnemental (impact des fondants routiers sur l'environnement). D'un autre côté, l'intervention trop tardive peut mener à des accidents ou des embouteillages qui présentent également un coût pour la société. C'est pourquoi chaque gestionnaire routier doit essayer de prendre la décision la plus juste pour garantir un service hivernal efficace et des routes sûres, tout en utilisant un minimum de ressources. Les ressources utilisées par le gestionnaire, afin de rendre la route praticable sont matérielles (camions de déneigement, d'épandage de produits de dé verglaçage) mais également humaines. En effet, les opérations de maintenance nécessitent une forte mobilisation de personnel. Afin d'optimiser les interventions, les gestionnaires font couramment appel aux systèmes d'information météoroutiers comme outil d'aide à la décision, afin de prévoir au mieux l'occurrence et le type des phénomènes dégradant la circulation. Tous ces facteurs intervenant en viabilité hivernale (matériel, produits de dé verglaçage, modèles de prévision météoroutiers) sont décrits dans ce chapitre.

2.2.3 La viabilité hivernale en France

Afin de montrer l'importance de la viabilité hivernale en France, quelques chiffres d'accidents sont révélateurs. Ces chiffres, provenant de la Direction Générale des Routes (Dossier de presse : Circuler en hiver : Campagne d'information sur la viabilité hivernale 2005/2006), sont ceux de l'année 2004, pour la période hivernale (janvier-février puis novembre-décembre). Au cours de ces quatre mois, 485 accidents corporels ont été recensés sur des routes verglacées, faisant 684 blessés et 58 tués. 305 accidents corporels ont été recensés sur des routes enneigées, faisant 453 blessés et 11 tués. Cependant, même en hiver, la principale cause d'accident reste la pluie. On dénombre 4394 accidents corporels faisant 5721 blessés et 241 tués. Les chiffres d'accidents sont difficilement comparables d'année en année dans la mesure où les conditions météorologiques peuvent varier considérablement. Cependant ils permettent d'apprécier l'importance des dangers de la route en hiver. Au niveau humain, environ 30000 agents des Directions Interdépartementales des Routes et des Services Techniques Départementaux, et 4000 employés des sociétés d'autoroutes sont mobilisables pour assurer la viabilité hivernale des routes principales. La France possède un réseau routier dense, constitué d'environ 11000 km de routes nationales, de 9000 km d'autoroutes concédée, de 378000 km de routes départementales et de 55000 km de voiries urbaines et communales. Les moyens économiques mis en œuvre pour l'hiver 2005/2006 s'élèvaient à 40 millions d'euros, uniquement pour le réseau routier national non concédé.

Les différents types de climat en France (figure 2.4, gauche) ont permis de définir des zones selon la rigueur de l'hiver (figure 2.4, droite). Ces zones ont été définies à partir du nombre de jours avec chutes de neige, du nombre de jours avec du verglas lié à des précipitations et du nombre de jours avec du verglas ou de la neige sur les routes sans précipitations. Ainsi, quatre zones existent en France, correspondant à un hiver clément (H1), un hiver peu rigoureux (H2), un hiver assez rigoureux (H3) et un hiver rigoureux (H4).

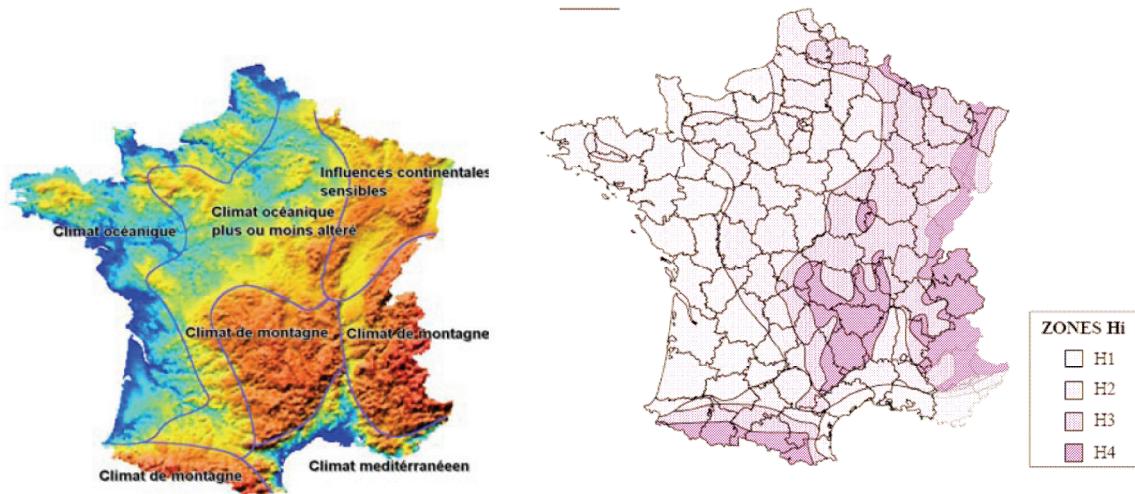


Figure 2.4 : Climats (gauche) et zones climatiques hivernales Hi (droite) en France, d’après Snow & Ice Databook 2006.

Il n’existe pas, en matière de service hivernal, de réglementation au sens strict du terme, à l’exception du cahier des charges imposé par l’Etat aux sociétés d’autoroutes concédées. L’Etat s’est toutefois doté d’un corpus doctrinaire (circulaires ministérielles, guides méthodologiques...) destiné à encadrer le domaine de façon à minimiser les impacts des mauvaises conditions météorologiques hivernales et assurer ainsi la sécurité des biens et des personnes dans un contexte économique maîtrisé. Le ministère de l’Equipement a établi des règles concernant la viabilité hivernale. Ces règles définissent des niveaux de service en fonction de la zone Hi et du type de réseau. De plus amples informations sont disponibles dans Muzet (2000).

2.3 Les facteurs intervenant en viabilité hivernale

Les facteurs prépondérants pour la viabilité hivernale sont les conditions météorologiques. En effet, l’état de surface de la route est principalement dépendant des conditions météorologiques : précipitations et état de l’atmosphère. Cependant, des facteurs extérieurs influent également sur l’état de surface d’une chaussée. Les principaux sont le trafic routier et les opérations de maintenance (traitement de la chaussée avec des fondants routiers et déneigements) qui visent à fluidifier le trafic routier pour minimiser l’impact des conditions météoroutières dégradées. Le problème principal de ces facteurs extérieurs est la difficulté à estimer et à quantifier leurs effets sur l’état de surface de la route. De plus, dans un contexte de

prévision, la variabilité et les incertitudes temporelles viennent s’ajouter à la variabilité spatiale de ces phénomènes.

2.3.1 Les opérations de maintenance

Afin d’éviter la présence prolongée de neige ou de glace sur la route, l’intervention des services d’exploitation est nécessaire. On peut distinguer deux sortes d’interventions : les interventions préventives, se produisant avant l’occurrence de neige ou de verglas sur la chaussée, ou celles curatives, intervenant après l’apparition du phénomène. Les opérations de maintenance utilisées sont l’épandage de fondants (appliqués de manière préventive ou curative) et le déneigement.

2.3.1.1 Les déneigements effectués par les services d’exploitation

Le déneigement consiste à évacuer la neige présente en surface d’une route par passage d’une lame et permet ainsi d’éviter toute accumulation. Dans un contexte de modélisation, ces déneigements sont à prendre en compte, bien que les horaires et le nombre de déneigements ne soient évidemment pas connus à l’avance. De plus, les déneigements ne sont pas parfaits et laissent en surface de la chaussée de la neige (et de l’eau) résiduelle dont les quantités sont difficilement appréciables.

2.3.1.2 L’utilisation de fondants routiers

Un fondant routier (généralement du chlorure de sodium) est un produit hydrosoluble. Le mélange constitué (saumure dans le cas des sels utilisés en viabilité hivernale) à pour conséquences de :

- diminuer la tension de vapeur d’eau du mélange aqueux
- déplacer le point d’équilibre liquide/solide/gaz au profit de la phase liquide
- abaisser la température de congélation du mélange.

Ces propriétés physico-chimiques sont utilisées en viabilité hivernale afin de lutter contre la présence de glace ou de neige en surface des routes. Le fondant est appliqué sous forme solide (grains) ou/et sous forme de saumure/bouillie. Cependant, pour être efficace, le fondant doit se trouver sous forme de saumure. Ainsi, lorsqu’il est appliqué sous forme solide, il doit s’hydrater à partir de l’humidité disponible en surface de la chaussée (glace, neige, vapeur d’eau). Le phénomène d’hydratation n’est pas instantané et peut ne pas se produire par manque d’eau (Marchetti et al. 2006b).

L’efficacité du fondant est donc reliée à sa concentration et est dépendante de la quantité d’eau en surface de la chaussée. Ainsi, l’efficacité des fondants routiers est fortement liée au cycle de l’eau en surface des revêtements. Le cycle de vie des fondants routiers est discuté en section 2.3.2.4.

Plusieurs types de fondants routiers existent, les plus courants sont le chlorure de sodium (NaCl) et le chlorure de calcium (CaCl_2). Dans le cas d’un épandage sous forme solide sur un revêtement, l’hydratation est soit un phénomène endothermique dans le cas du chlorure de sodium (-971.48 J), soit un phénomène exothermique dans le cas du chlorure de calcium (+9184.54 J), ce mécanisme participant au bilan thermique global. La température de congélation (ou température de protection) d’une solution saturée est de -21.12°C pour le chlorure de sodium et de -56°C pour le chlorure de calcium. Ces températures de protection augmentent avec la dilution.

Deux types de traitement sont utilisés : les traitements préventifs, appliqués avant l’apparition du phénomène et les traitements curatifs, appliqués après l’apparition du phénomène. Le dosage, le type de fondant utilisé vont dépendre du type de phénomène (gelée blanche, pluie en surfusion, neige, congélation d’une humidité préexistante) de l’ampleur, de la durée et de paramètres extérieurs (type de revêtement, conditions météorologiques, trafic). Des conseils d’utilisation à destination des exploitants ont été établis (Livet 1998, Ketcham et al. 1996, Blackburn et al. 2004).

D’après Livet 1998, le choix du dosage dépend principalement de 2 facteurs :

- la quantité d’eau (liquide ou solide) présente ou attendue sur le revêtement
- la température de protection recherchée pour le milieux aqueux (liquide ou solide) présent ou attendu sur le revêtement.

La quantité d’eau dépend de trois facteurs :

- la nature du phénomène météoroutier
- l’importance du phénomène météoroutier
- la macrotexture du revêtement et le trafic.

De plus, le dosage théorique est également dépendant du produit utilisé, dont l’efficacité dépend :

- de la température du milieu et de la granularité

- des moyens d’épandage, dont les performances varient en fonction des modèles et de leur maintenance
- de la capacité des revêtements, spatialement hétérogènes, à intercepter et à permettre l’homogénéisation de la saumure.

Si l’on s’intéresse au cas particulier de la neige, il est important de noter que l’épandage de fondants ne doit pas être employé pour faire fondre la neige (Muzet 2000). En effet, la quantité à employer serait trop importante. L’épandage de fondants est recommandé pour transformer la neige, dans le but d’éviter le compactage et faciliter le raclage. De plus, l’application ou non de fondants, le type de fondant, sont dépendants de l’état de surface de la toute (froide, humide ou mouillée) et de la neige (sèche, humide ou mouillée). A titre d’exemple, une neige sèche et froide sur une route sèche adhère peu et n’est pas compactée par le trafic. Aucune application n’est recommandée, afin d’éviter une transformation de cette neige en neige humide qui serait compactée par le trafic.

D’autres techniques existent, mais restent marginales par rapport à l’utilisation de fondants. Par exemple, l’utilisation préventive de sable, qui peut être chauffé (Vaa 2004, Vaa 2006) ou encore la circulation d’eau dans des canaux (Mimura et al. 2004).

2.3.2 Le trafic routier

Le trafic routier est un facteur à conséquences multiples sur l’état des routes. Il va influer sur le bilan thermique et hydrique de surface. Pour une chaussée recouverte de neige, en plus des conséquences générées sur le bilan de masse de la couche de neige par une modification des bilans thermiques et hydriques en surface, vient s’ajouter un effet de tassement mécanique dû aux passage des véhicules dans le cas de la neige humide et de projections latérales du mélange eau, neige-glace, saumure dans le cas de la neige mouillée.

2.3.2.1 Les conséquences du trafic sur le bilan thermique de surface

La première conséquence est l’influence du passage d’un véhicule sur le bilan thermique de surface. On peut distinguer des conséquences directes et indirectes de l’effet du passage d’un véhicule. En effet, un véhicule est une source de chaleur multiple et de différentes formes (Prusa et al. 2002) : thermiques (énergie dégagée par la combustion, rayonnement émis par la base du véhicule, flux turbulents associés aux gaz d’échappements) et mécaniques (friction des pneumatiques). De plus, le passage d’un véhicule va influencer également de

manière indirecte le bilan thermique de surface : génération d’une zone d’ombre et modification des conditions aérodynamiques, donc des transferts turbulents en surface. De plus, ces flux énergétiques sont très variables. En effet, la couverture du véhicule sur la route est partielle, et de la même manière de nombreuses hétérogénéités existent sur la zone couverte par le véhicule : la friction ne s’exerce qu’au niveau des pneus, les conditions aérodynamiques et la surface de rayonnement sont thermiquement hétérogènes... Les différents flux thermiques générés par un véhicule sur la surface de la chaussée sont schématisés sur la figure 2.5.

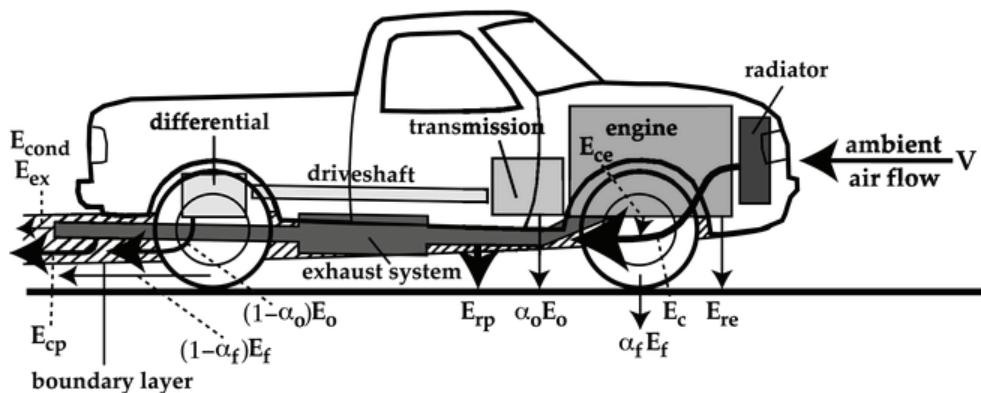


Figure 2.5 : Illustration schématique des flux thermiques générés par le véhicule, d’après Prusa et al.2002. E_{re} , E_{rp} sont respectivement les flux radiatifs émis par le moteur et le circuit d’échappement. E_{ce} et E_{cp} sont respectivement les flux convectifs générés par le moteur et le circuit d’échappement. E_f , E_d et E_o sont respectivement les pertes mécaniques par dissipation des pneus, du freinage et de la totalité des autres composants du véhicule. E_c est le flux thermique total dû au système de climatisation.

Des stations automatiques, installées principalement sur les grands axes, permettent de quantifier le flux de véhicules en temps réel. Certaines stations permettent également de distinguer les différents types de véhicules. Cependant, ce flux est dépendant du lieu et de l’heure, et il semble ainsi difficile d’intégrer une paramétrisation précise du trafic dans un modèle. La difficulté augmente dans un contexte de prévision car le caractère aléatoire du trafic, comme les accidents ou les ralentissements ponctuels, est impossible à prévoir. Le trafic peut être extrêmement variable au cours de la journée (par exemple très important pendant les heures de pointes et beaucoup faible pendant la nuit) ou selon la période (avec par exemple des densités de trafic très importantes pour les périodes de vacances). Le trafic est également très variable spatialement, à l’échelle du réseau routier, mais également à l’échelle d’une section. En effet, le trafic diffère selon les voies de circulation. Il est souvent plus dense, plus lent, avec plus de véhicules lourds sur les voies de droite, et au contraire plus fluide, avec des vitesses

plus élevées sur les voies de gauche. Ainsi les conséquences thermiques dues au trafic varient fortement d'une voie à l'autre. Des écarts significatifs sont observables sur la température de surface. Chapman et al. (2001) ont montré que le trafic pouvait causer jusqu'à 2°C d'écart entre une voie lente et une voie rapide et que déterminer l'impact du trafic sur la température de surface est relativement difficile. Shao (1999) à, quant à lui, montré que l'influence du trafic sur la température de surface des chaussées était bien moins importante que celle des conditions météorologiques.

2.3.2.2 Les conséquences du trafic sur le bilan hydrique de surface

En absence de trafic, l'incertitude sur la quantité d'eau liquide présente en surface d'un revêtement, ainsi que sa répartition, est très importante. Cette incertitude est due à l'hétérogénéité (forme des macrorugosités très variable) du matériau constituant le revêtement de surface, à la variabilité spatiale du ruissellement de surface due à la topographie (pente de la chaussée, déformations). A cette incertitude s'ajoute celle de la précipitation, car la répartition spatiale et temporelle d'une chute de pluie est relativement difficile à déterminer précisément. Cette incertitude est augmentée en présence de trafic. En effet, le passage d'un véhicule génère des flux latéraux d'eau liquide, et également des flux verticaux par la dépression générée par les pneumatiques (Shao et al. 1994). Ces flux générés par le trafic ne font qu'augmenter la difficulté à estimer précisément la quantité d'eau liquide en surface.

2.3.2.3 Modification structurelle de la neige par le trafic

La neige étant un matériau déformable, le trafic a un effet mécanique très important. Le passage des véhicules va avoir pour conséquence de densifier la neige présente en surface de la chaussée. Fujimoto et al. (2006) ont étudié l'augmentation de densité en conditions expérimentales (neige artificielle obtenue en chambre froide à température constante). Ils ont reproduit le passage d'une roue sur de la neige fraîche et mesuré l'évolution de densité de la neige (figure 2.6). Ils ont pu observer l'impact rapide de la densification due au trafic, ou après seulement 10 passages ($N_w = 10$ sur la figure 2.6), la densité avait quasiment doublé. Sur la figure 2.6, les symboles (\square , Δ , \circ) représentent les mesures de densités pour différentes températures d'air dans la chambre froide (-3°C, -6°C, -10°C).

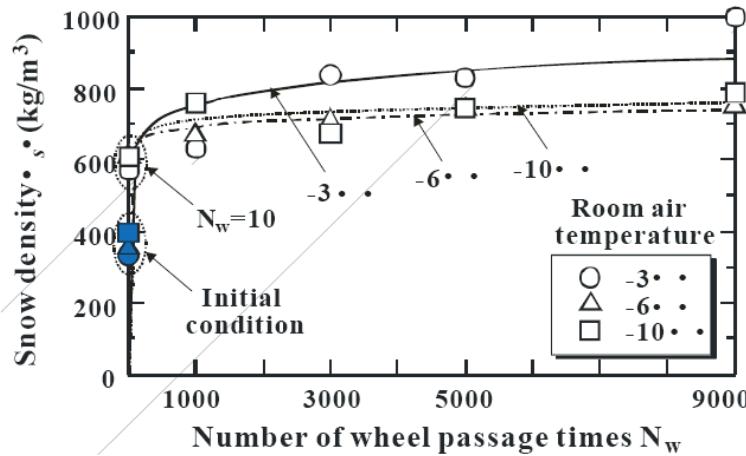


Figure 2.6 : Modification de la densité de la neige en fonction du passage de véhicules, d’après Fujimoto et al. 2006.

L’augmentation de la densité de la neige due au compactage va avoir des conséquences sur les conditions d’adhérence des véhicules sur la neige. Kobayashi et al. (2006) proposent une corrélation entre le volume de trafic et la diminution de l’adhérence entre les pneumatiques et la surface de la neige. De la même manière, le compactage de la neige en surface du revêtement va rendre plus difficile le déneigement de la route par les services de viabilité hivernale (Muzet, 2000). Une étude de l’influence du compactage de la neige a été effectuée en France au cours du projet Gelcro (voir la section 2.5.5.1).

2.3.2.4 L’impact du trafic sur les fondants routiers

L’impact du trafic sur la teneur résiduelle en fondants routiers n’est pas négligeable. En effet, après la fonte d’une partie de glace ou de neige due aux fondants, une saumure (mélange d’eau liquide et de fondants résiduels) résiduelle est présente en surface du revêtement. Ainsi, le brassage (de l’eau en surface ou de la neige) généré par le trafic va entraîner des hétérogénéités de concentration en fondants routiers. De manière plus précise, le trafic provoque un entraînement des fondants le long de l’itinéraire, une perte de fondants par expulsion latérale et une perte par nébulisation dispersée par le vent.

Blomqvist et Gustafson (2004) ont mesuré les quantités résiduelles de fondants sur une section de route circulée, sur une durée de 12 jours allant du 10 au 22 février 2002. Un traitement de la route avait été effectué le 8 février (3 jours avant le début de la mesure) et deux traitements ont été effectués au cours de la période de mesure (les 15 et 17 février). La figure 2.7 montre la salinité résiduelle d’un profil transversal au cours du temps (en heures sur l’axe des abscisses).

On peut ainsi voir la forte hétérogénéité des concentrations entre zones circulées et non circulées.

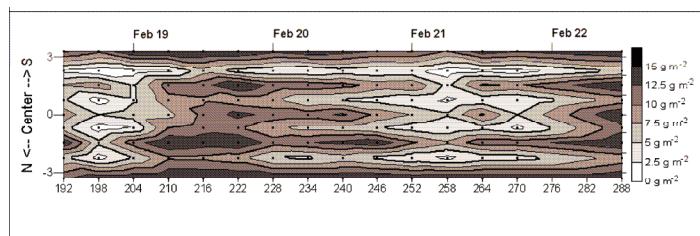


Figure 2.7 : Concentration résiduelle en fondants sur une section de route circulée, d’après Blomqvist et Gustafson (2004).

Le cycle de vie des fondants routiers est encore méconnu et fait l’objet de recherches, notamment au LRPC de Nancy (Marchetti et al. 2006b). Une recherche sur le sujet a également été effectuée au cours du projet Gelcro (section 2.5.5.2).

Ainsi, prendre en compte de manière précise les effets thermiques, hydriques et chimiques (cycle de vie des fondants) du trafic dans un modèle de prévision d’état des routes semble extrêmement difficile. Pour les services d’exploitation, la quantité résiduelle de sel, est un facteur important, afin de permettre une meilleure gestion des stocks de fondants routiers. Les recherches sur le cycle de vie des fondants progressent et laissent penser qu’à terme ce paramètre pourra être pris en compte dans un modèle opérationnel. Par exemple, Blomqvist et Gustafson (2004) ont développé un modèle empirique qui permet de déterminer la quantité résiduelle moyenne (sur la section) de fondants, en fonction de la quantité de sel épandue et du nombre de véhicules accumulés. Ce modèle doit être calibré et amélioré, mais les premiers résultats se montrent encourageants (figure 2.8). Ils ont conclu à une perte de fondants de 17% à 50% due au trafic.

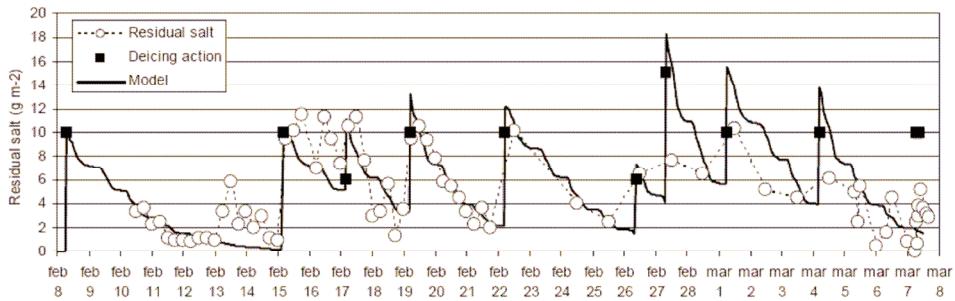


Figure 2.8 : Comparaison des mesures et des résultats d'un modèle empirique de la teneur en sel résiduelle moyenne, d'après Blomqvist et Gustafson (2004).

2.3.3 Le contexte opérationnel – cas pratique

Afin de connaître plus précisément les besoins réels dans un contexte opérationnel, il m'a été permis de passer une semaine (du 14 au 19 février 2005) dans un service d'exploitation autoroutier chez Autoroutes et Tunnels du Mont-Blanc (ATMB). La société ATMB gère un réseau autoroutier de 110 km situé principalement en Haute-Savoie, avec également une partie de la concession située dans l'Ain. La concession est située entre les villes de Le Fayet (Haute-Savoie), en direction de Chamonix, et de Chatillon en Michaille (Ain), en direction de Lyon/Paris (figure 2.9).

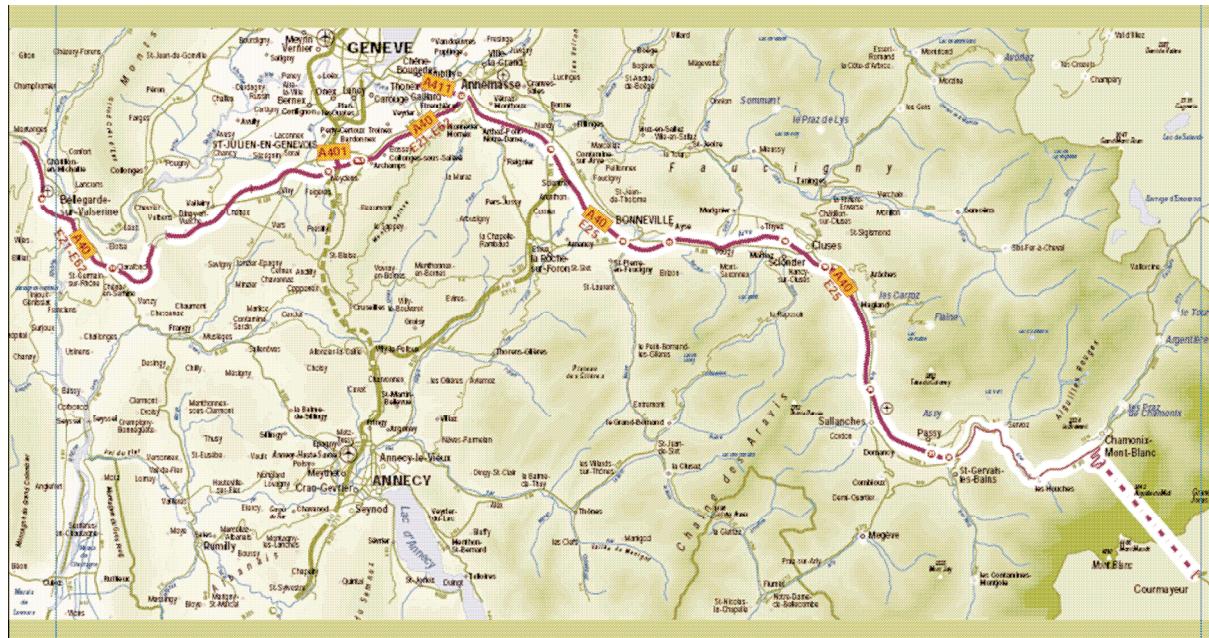


Figure 2.9 : Carte du réseau géré par la société ATMB

La totalité du réseau est soumise à des conditions climatiques hivernales rudes sur une période allant de octobre à mai. Ainsi la viabilité hivernale de ce réseau constitue un problème majeur (Dubois 2006). Au cours de ma présence, un épisode neigeux très important s'est produit dans la nuit du 14 au 15 février. Durant cet épisode, j'ai pu participer à l'opération de maintenance de la viabilité du réseau, à différents niveaux : gestion des déneigeuses/saleuses depuis le centre d'exploitation et gestion sur le terrain au sein d'un véhicule de patrouille.

Cette opération m'a permis de voir plus précisément les problèmes réels du contexte opérationnel et d'apprécier l'écart existant entre le contexte opérationnel et celui de la recherche. En effet, la simulation numérique pourra très difficilement reproduire la réalité avec exactitude mais doit essayer de s'en approcher autant que possible, même si certains phénomènes ne pourront probablement jamais être modélisés. Connaître avec précision les multiples effets du trafic et les quantifier semble très difficile dans un contexte de modélisation. De la même manière, les effets locaux (congères, zones ventées et humides...) ne peuvent pas être intégrés à un modèle général de prévision numérique, seule une connaissance du terrain, ou encore l'utilisation d'un modèle local, va permettre une bonne gestion du problème de viabilité hivernale par les exploitants. Dans un contexte de modélisation, se pose aussi le problème des déneigements. En effet, ceux-ci sont parfois très fréquents et non planifiés, ils sont décidés sur le terrain en fonction de la situation (conditions météorologiques, trafic...). Les dérives de température dues aux alternances de sol enneigé/sol non enneigé sont délicates à prévoir. C'est pourquoi l'utilité d'un modèle opérationnel réside dans la prévision de la tenue de la neige au cours d'un épisode neigeux. Pour les services d'exploitation, la prévision météorologique (atmosphérique) n'est qu'un indice pour la prise de décision. La décision n'est pas basée uniquement sur la prévision météorologique. L'expérience des exploitants du réseau a une part importante dans la prise de décision. Dès qu'un risque est pressenti, des précautions vont être prises (salage). En effet, le caractère payant du réseau autoroutier conduit à une obligation de résultats, car pour l'usager le fait de payer doit être synonyme de praticabilité du réseau. Ceci a pour conséquence une utilisation parfois excessive de fondants routiers.

Ainsi, un outil opérationnel de prévision de l'état des routes vis à vis de la neige comblerait un manque au niveau des modèles de prévision utilisés par les services d'exploitation en viabilité hivernale, et son utilité serait double : permettre une meilleure gestion des effectifs et ainsi une intervention plus efficace, mais également une meilleure gestion de l'utilisation de fondants routiers. En effet, les quantités très importantes de fondants routiers pourraient être réduites

grâce à une bonne prévision de l’état des routes. Les traitements préventifs pourraient être supprimés pour les épisodes à risque nul, comme une précipitation neigeuse sans accumulation au sol ou pour une température de surface de chaussée positive prévue avec certitude. Cette économie de fondants routiers pourrait être encore plus importante en intégrant une paramétrisation des fondants routiers dans le modèle, comme il est par exemple fait aux Etats-Unis au sein du projet dédié à la viabilité hivernale MDSS (Maintenance Decision Support System) (Mahoney et al. 2006). La connaissance de la quantité résiduelle de fondants, permettrait l’application curative d’une quantité de fondants moins aléatoire. En plus du gain économique engendré par une réduction des volumes de fondants appliqués, l’impact de ces fondants sur l’environnement serait considérablement réduit.

2.4 Les modèles de prévision d’état des routes

La majorité des pays soumis à des conditions climatiques hivernales (Europe, Amérique, Asie, Océanie) utilisent des modèles de prévision de l’état de surface des routes au cours de l’hiver. Deux types de modèles existent : les modèles statistiques et les modèles physiques. Ces derniers sont utilisés en majorité et sont traités plus en détail dans cette étude.

2.4.1 Les modèles statistiques

Un premier type de modélisation est l’utilisation de modèles statistiques. Par exemple, Hertl et Schaffar (1998) ont obtenu des prévisions de température de surface satisfaisantes. Les mesures des stations météoroutières pour différents paramètres (température de surface, température de l’air, vent, rayonnement infrarouge et visible) sont analysées et décomposées selon des modèles typiques issus d’une base de données élaborée à partir des mesures de la station météoroutière. Ensuite, ces mesures sont extrapolées temporairement selon des évolutions typiques. Un exemple pour le rayonnement infrarouge est donné sur les figures 2.10 et 2.11.

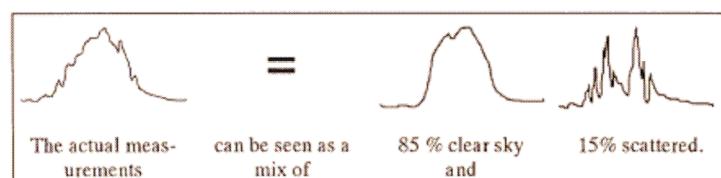


Figure 2.10 : Exemple d’analyse des mesures de rayonnement infrarouge : décomposition en combinaison de modèles typiques, d’après Hertl et Schaffar (1998).

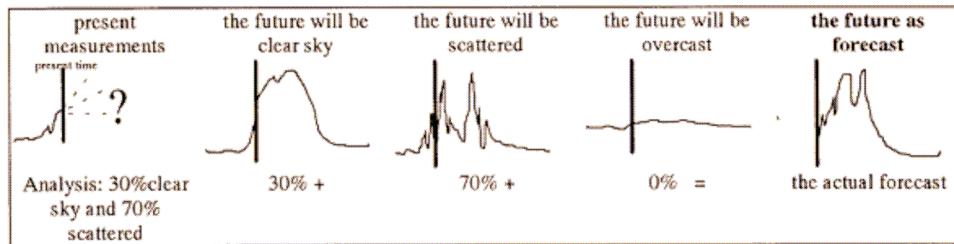


Figure 2.11 : Exemple de prévision de rayonnement infrarouge à partir de combinaison de modèles typiques, d’après Hertl et Schaffar (1998).

A partir de ce modèle, Hertl et Schaffar (1998) ont testé deux approches. La première est l’utilisation des paramètres météorologiques extrapolés comme condition limite au bilan énergétique de surface pour la prévision de la température de surface. La seconde est l’extrapolation directe de la température de surface. Les résultats ont montré que la prévision statistique directe de la température de surface n’a pas dégradé les résultats. Les résultats obtenus avec cette méthode sont similaires à ceux obtenus avec des modèles physiques (écart quadratique moyen de l’erreur de l’ordre de 2°C), cependant l’échéance de prévision du modèle est faible (3 heures).

En France, un modèle statistique a été développé à Météo-France (Baraer 2003). Il est basé sur le calcul d’un écart de température à appliquer à la température d’air prévue pour obtenir une prévision de la température de surface. Cet écart de température est dépendant de la vitesse du vent et de la nébulosité prévue. Le pas de temps du modèle est tri-horaire. Un exemple de calcul de la température de surface est donné sur la figure 2.12.

T _{sol} =		
Si H=12 ou 15	Si N=0,1,2,4,5 Si FF=0,1 Si FF>=2	Tabri+1° C Tabri
	Si N=3 Si FF=0,1 Si FF>=2	Tabri Tabri
Sinon, H=0, 3, 6, 9, 18 ou 21	Si N=0,1,2,4,5 Si FF=0 Si FF=1 Si FF>=2	Tabri-3° C Tabri-2° C Tabri-1° C
	Si N=3 Pout Tout FF	Tabri-1° C

Figure 2.12 : Exemple de prévision de température de surface (T_{sol}) valable pour la période du 16 octobre au 14 mars, d’après Baraer 2003. FF est la vitesse du vent ($m s^{-1}$), H est l’heure et N est la nébulosité (octas).

2.4.2 Les principaux modèles physiques

Depuis le début des années 80, plusieurs modèles physiques ont été développés dans un but de prévision d'état des routes en condition hivernale (Thornes 1984, Rayer 1987, Shao 1990, Sass 1992, Jacobs et Raatz 1996, Paumier et Arnal, 1998, Crevier et Delage 2001). Tous les modèles sont des modèles unidimensionnels verticaux basés sur la résolution du bilan énergétique de surface afin de déterminer la température de surface de la route. Le bilan énergétique de surface s'établit grâce à l'équilibre des flux énergétiques en surface de la route (flux de rayonnement net, flux de chaleurs turbulents) avec le flux de conduction entre la surface et la route. Le schéma du bilan énergétique de surface est donné sur la figure 2.13.

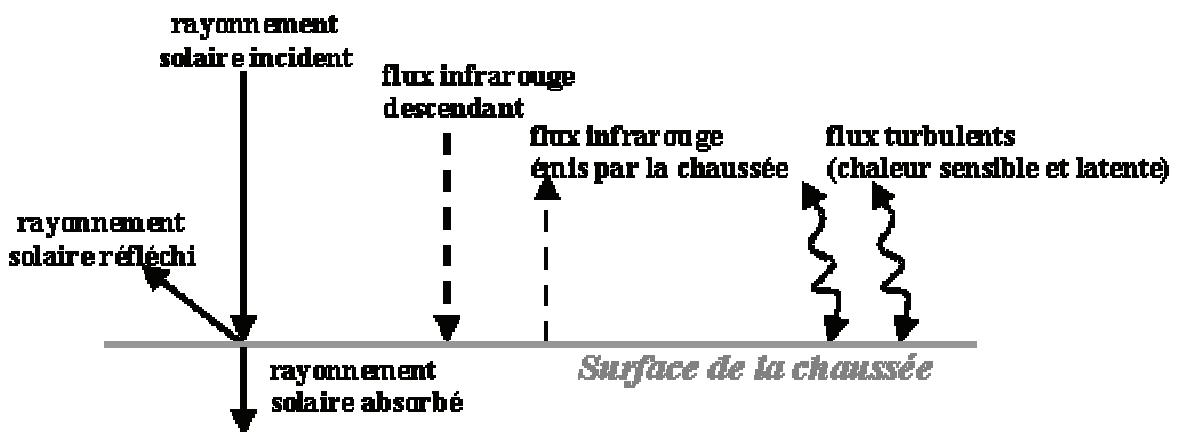


Figure 2.13 : Schéma du bilan énergétique de surface .

Afin de modéliser le plus précisément possible cette température de surface, les réseaux routiers ont été équipés de station météoroutières. Ces stations météoroutières se déclinent sous plusieurs formes, les plus simples étant équipées uniquement de capteurs de température dans la chaussée, de température et d'humidité de l'air, alors que les plus complexes possèdent également des capteurs de rayonnement (visible et infrarouge). Les mesures de ces stations météoroutières ont été couplées avec les modèles précédemment décrits pour conduire à des systèmes automatiques de prévision locale.

Les mesures de température en surface et dans la route servent de condition initiale à la prévision. C'est pourquoi les systèmes de prévision déterministes élaborés à partir des modèles précédents (Sass 1997, Shao et lister 1995, Shao et Lister 1996, Chapman et al. 2001, Crevier et Delage 2001, Raatz and Niebrügge 2002, Paumier et Arnal 1998) utilisent les données des

stations météoroutières. En surface, les flux sont calculés à partir des prévisions météorologiques de modèles atmosphériques, la route est discrétisée verticalement sur une épaisseur de 1m à 3m selon le modèle, le profil initial de température est obtenu par extrapolation des mesures de température dans le sol et la température au-dessous de la route est considérée comme constante. Certains modèles prennent en compte des paramètres influant sur le bilan de surface, comme les zones d’ombre, le trafic routier. Par exemple, le modèle allemand (Jacobs et Raatz 1996) résout le bilan énergétique de surface pour plusieurs caractéristiques : avec et sans trafic, zone ombragée, zone urbaine et pont. Les caractéristiques principales des différents modèles sont décrites dans le tableau 2.1.

Référence	Thornes (1984)	Rayer (1987)	Shao (1990)	Sass (1992)	Jacobs et Raatz (1996)	Paumier et Arnal (1998)	Crevier et Delage (2001)
Pays	Grande-Bretagne	Grande-Bretagne	Grande-Bretagne	Danemark	Allemagne	France	Canada
Nom du modèle	/	Met-Office	Icebreak	DMI-Hirlam-R	DWD	Préviroute	METRo
Equation de base	Bilan de surface	Equation de la chaleur	Equation de la chaleur				
Profil de température dans la chaussée	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Utilisation de station météoroutière	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Effets locaux	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Non
Influence du trafic	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Oui

Tableau 2.1 : Principales caractéristiques des différents modèles

La prise en compte du trafic et des effets locaux sont détaillés en section 2.4.3, et le traitement de l’eau liquide en surface est détaillé en section 2.4.4.

2.4.3 La gestion des paramètres extérieurs (effets locaux et trafic)

La prise en compte des effets du trafic dans un modèle est assez complexe du fait des effets thermiques dus au passage d’un véhicule (rayonnement émis par un véhicule, modification des

échanges turbulents, ombre lors du passage...), accentué par les incertitudes relatives à la densité du trafic. Ainsi ces modèles utilisent une paramétrisation simple pour décrire l'effet du trafic, ou ne le prennent pas en compte du tout (Rayer 1987, Paumier et Arnal 1998). Par exemple, Shao et Lister 1996 proposent une paramétrisation basée sur une modification des coefficients d'échanges turbulents et du rayonnement infrarouge net, en fonction de la densité du trafic. Chapman et al. 2001 (pour le modèle Thornes 1984) proposent quant à eux de tenir compte de trois effets du trafic : l'échauffement de température avec l'introduction d'un facteur correctif sur la température de surface, la modification du bilan infrarouge net dû au passage des véhicules avec l'introduction d'un facteur correctif sur le flux infrarouge émis, et l'augmentation des échanges turbulents avec augmentation de la vitesse du vent de 2 m.s^{-1} . Jacobs et Raatz (1996) intègrent le trafic par une augmentation des échanges turbulents, en imposant une vitesse de vent minimale de 10 nœuds au cours de la journée et une vitesse minimale de 5 nœuds au cours de la nuit et lors des périodes de vacances. Crevier et Delage 2001 adoptent quant à eux une paramétrisation plus simple, par l'ajout dans le bilan de surface d'un flux dû au trafic d'une valeur constante de 15 W m^{-2} (avec une correction en fonction du biais sur la température moyenne de surface de la nuit précédente). D'une manière similaire, Sass 1997 propose l'introduction dans le bilan de surface d'un flux de sources externes (effets de la topographie locale et du trafic). La prise en compte du trafic dans les modèles présentés est récapitulée dans le tableau 2.2.

Nom	Pays	Référence	Paramétrisation du trafic
/	Grande-Bretagne	Thornes (1984)	Facteur correctif sur la température de surface et sur le rayonnement infrarouge émis, augmentation de la vitesse du vent
Met-Office	Grande-Bretagne	Rayer (1987)	Aucune
Icebreak	Grande-Bretagne	Shao (1990)	Modification du coefficient d’échange et du rayonnement infrarouge
DMI-Hirlam-R	Danemark	Sass (1992)	Flux source constant
DWD	Allemagne	Jacobs et Raatz (1996)	Modification du coefficient d’échange et valeur de vent minimum imposée
Préviroute	France	Paumier et Arnal (1998)	Aucune
METRo	Canada	Crevier et Delage (2001)	Flux source constant

Tableau 2.2 : Paramétrisation du trafic dans les modèles.

Concernant la paramétrisation des effets locaux, Shao et Lister (1995) intègrent pour les zones ombragées uniquement la part de rayonnement diffus dans le bilan énergétique de surface. De la même manière, Sass (1997) n’intègre pour les zones ombragées qu’une partie de rayonnement diffus. Le rayonnement diffus est réduit d’un facteur dépendant de la hauteur moyenne des masques. Thornes (1984) a également intégré les zones d’ombres dues aux effets topographiques et aux bâtiments (Chapman et al. 2002). Jacobs et Raatz (1996) adoptent quant à eux une paramétrisation plus complexe des effets locaux, ne se limitant pas uniquement aux zones d’ombres. Ils proposent également d’inclure des influences urbaines et traitent le cas particulier des ponts. Pour les zones d’ombres, la simulation est effectuée en considérant la présence d’un mur de 8m de hauteur, situé à 10m du point simulé. Concernant la prise en compte des zones urbaines, une longueur de rugosité beaucoup plus élevée (52cm) que pour le cas d’une route isolée (0.1 mm) est utilisée pour le calcul des flux turbulents, et un flux anthropique de 14 W m^{-2} est ajouté au bilan de surface. Pour le cas particulier des ponts, ils proposent une simulation avec comme condition limite à la base du pont, une température prise égale à la température de l’air.

2.4.4 La prévision de l’état de surface en hiver (neige et verglas)

Bien que la principale variable de sortie de ces modèles soit la température de surface de la route, la prévision de l’état des routes en condition hivernale concerne également la présence de glace ou de neige sur la route. La connaissance de l’état de surface constitue une information pertinente pour les centres d’exploitation. Les variables pronostiques des différents modèles pour la prévision de l’état de surface de la route sont récapitulées dans le tableau 2.3.

Nom	Pays	Référence	Variables pronostiques pour la prévision de l’état de surface
/	Grande-Bretagne	Thornes 1984	Température de surface, possible présence d’eau (précipitation prévue)
Met-Office	Grande-Bretagne	Rayer 1987	Température de surface, possible présence d’eau (précipitation prévue)
Icebreak	Grande-Bretagne	Shao 1990	Température de surface, possible présence d’eau (précipitation prévue)
DMI-Hirlam-R	Danemark	Sass 1992	Température de surface, réservoirs d’eau liquide et de glace
DWD	Allemagne	Jacobs et Raatz 1996	Température de surface, possible présence d’eau (précipitation prévue)
Préviroute	France	Paumier et Arnal 1998	Température de surface
METRO	Canada	Crevier et Delage 2001	Température de surface, réservoirs d’eau liquide et de glace

Tableau 2.3 : Variables pronostiques des différents modèles pour la prévision de l’état de surface de la route

Certains modèles (Thornes 1984 , Rayer 1987, Shao 1990, Jacobs et Raatz 1996) n’utilisent que la température de surface et la possible présence d’eau liquide (due aux précipitations) pour la prévision de l’état de surface. Ainsi, trois états de surface sont possibles :

- sec si la teneur en eau reste inférieure à une teneur critique
- mouillé si la température de surface reste positive et si la teneur en eau reste inférieure au seuil critique
- gelé si la température de surface devient négative et la teneur en eau supérieure au seuil critique.

Les autres modèles (Sass 1992, Crevier et Delage 2001) utilisent deux réservoirs en surface : un réservoir d'eau liquide et un réservoir d'eau solide (sans distinction de la neige et de la glace). Ces deux réservoirs évoluent avec la température de surface et l'apport des précipitations. Cette paramétrisation est légèrement plus élaborée que celle des précédents modèles décrits mais reste relativement simple. En effet, la formation de glace sur les routes est un problème relativement complexe du fait de ses nombreuses origines possibles (pluie verglaçante, givre, gel de l'eau liquide en surface, brouillard givrant, condensation solide de la vapeur d'eau).

C'est pourquoi la prévision du verglas n'est accessible précisément que grâce à des modèles experts intégrant les conditions atmosphériques au-dessus de la route et les effets météorologiques locaux. Elle nécessite également l'utilisation des mesures des stations météoroutières. La présence de glace en surface peut être prévue à partir de la température de surface et du réservoir d'eau de surface, mais les autres formes de glace superficielle nécessitent d'autres données.

Ainsi, suite à une campagne expérimentale comparant les mesures et les observations sur différentes stations météorologiques, Karlson (2001) propose une alerte en temps réel, établie à partir des mesures de la vitesse du vent, de la température de surface et de l'écart entre la température de rosée et la température de surface. Cependant, les mesures d'humidité et de température sont effectuées par des capteurs placés à deux mètres du sol, ainsi les conditions en surface peuvent être mal estimées.

Knollhoff (2003) propose un modèle d'accumulation de givre, permettant d'en estimer le taux en surface, à partir des données des stations météoroutières. Ce modèle utilise les prévisions de températures de surface, d'air et de point de rosée et de vitesse du vent pour prévoir l'accumulation de givre. Le flux de vapeur en surface est estimé à partir d'une relation utilisant les prévisions de température d'air et de surface, établie à partir des lois de Dalton et des gaz parfaits. Le gradient de pression de vapeur saturante entre l'atmosphère et la surface est estimé à partir de l'équation de Clausius-Clapeyron. La fonte est, quant à elle, estimée par une loi empirique utilisant la température de surface prévue.

Takle (1990) propose quant à lui un système expert pour la prévision du gel utilisant les mesures des températures de surface minimales et maximales de la veille, combinées à des prévisions (température de surface minimale le matin, température maximale au cours de la

journée, couverture nuageuse au cours de la journée et au cours de la nuit, température du point de rosée à 6h TU le lendemain, précipitation et vent).

Norrman (2000) s’appuie sur un système expert de classification de l’état de surface d’une route, fonctionnant également à partir des données des stations météoroutières. Ce système fonctionne avec de nombreux paramètres relatifs à la fois à l’état de la route (température de surface), aux conditions météorologiques (température, vent, brouillard, précipitation, ciel clair ou non), aux conditions de trafic et aux opérations de maintenance (sel, excès de sel). Ce système dénombre 16 types (tableau 2.4) d’état de surface glissants (uniquement glace et neige) et montre ainsi la difficulté à prévoir tous les types d’état de surface.

Type of slipperiness	Precipitation	Weather description and influence of other factors
<i>Primary types</i>		
1 Rainwater freezing at a cold surface	Rain	A period of low temperatures preceding the event
2 Supercooled rainwater	Rain	Various
3 Direct snowfall	Snow	Snowfall and $T_{\text{air}} < 0^{\circ}\text{C}$
4 Drifting snow	Snow	Recent or ongoing snowfall and strong winds
5 Melting snow at air temperature above 0°C	Snow	Heavy snowfall and $T_{\text{air}} > 0^{\circ}\text{C}$
6 Melting snow at air temperature below 0°C	Snow	Heavy snowfall and $T_{\text{air}} < 0^{\circ}\text{C}$
7 Watercover which freezes	No	Clear weather following a rainy period
8 Fog-water freezing at a cold surface	No	Fog and moderate winds
9 Freezing dew	No	Clear and calm weather
10 Hoar-frost due to radiative cooling	No	Clear and calm weather
11 Hoar-frost due to advection	No	Moderate winds
12 Hoar-frost during a period with increasing temperature but still cold road surface	No	Morning heating of air temperature
<i>Secondary types</i>		
13 Snow packed by traffic	Snow	Recent or ongoing snowfall. Traffic
14 Modd	Snow	Recent or ongoing snowfall. Salt
15 Refreezing slush	Snow	Recent or ongoing snowfall. Too much salt
16 Refreezing water on the surface	No	Salt solution

Tableau 2.4 : Classification des différents types d’état de surface glissant, d’après Norrman (2000).

2.4.5 Les systèmes opérationnels routiers

Les modèles utilisés pour la prévision de température de surface, tout comme les systèmes experts de prévision d’état de surface, sont liés aux stations météoroutières et ainsi sont donc intégrés dans un dispositif d’organisation pour un contexte opérationnel routier. Aussi, le temps opérationnel de réponse est rapide (estimé à 90 minutes par Shao et Lister 1996) et la prévision à courte échéance (de 1h à 3h), donc plus précise qu’une prévision à échéance longue, peut être favorisée.

De même, les mesures météorologiques disponibles, comme la mesure de rayonnement infrarouge (Bogren et Gustavsson 2002) et les expertises humaines peuvent être intégrées en temps réel pour éviter une dérive du modèle due à une mauvaise prévision des conditions atmosphériques.

Ces prévisions étant ponctuelles, des recherches ont été menées afin d’extrapoler les résultats entre les stations météoroutières et ainsi spatialiser les prévisions sur un réseau routier. Une technique de relevé thermique est utilisée dans ce but (Shao 1999, Chapman et al. 2001). Le principe consiste à relever le long d’un itinéraire donné les variations de température de surface. Les relevés de température de surface sont établis grâce à un véhicule équipé d’un radiomètre infrarouge, circulant sur le réseau. En France, un véhicule de ce type (Thermoroute, Paumier et Arnal 1998) a été développé par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées, pour permettre l’extrapolation des prévisions effectuées au niveau des stations météoroutières par le modèle Préviroute (Paumier et Arnal 1998, Yahia 2006). Les relevés sont effectués la nuit, par ciel dégagé et sur route sèche, au moment où la température est la plus basse, pour limiter les variations de température de surface liées à l’échauffement solaire. Ces mesures servent ainsi d’empreinte thermique montrant les variations de températures de surface pour des conditions météorologiques données. Ces relevés thermiques permettent une extrapolation des températures de surface prévues au niveau des stations à l’intégralité du réseau considéré à partir des informations archivées, des prévisions et des mesures de température de surface.

Ces cartographies thermiques ont été améliorées avec l’apport des technologies géomatiques (Global Positioning Systems (GPS) et Systèmes d’Information Géographique (SIG)) (Chapman et Thornes 2004, Thornes et al. 2004). En effet, les technologies géomatiques permettent de traiter les résultats des relevés thermiques et de représenter les résultats des prévisions sous forme de cartographie précise du réseau.

Ainsi, les recherches actuelles concernant les systèmes d’aide à la décision en condition hivernale, sont axés sur une prévision de plus en plus précise à échéance courte, ainsi qu’une discrétisation de plus en plus fine d’un réseau routier. Pour cela, de nombreuses données sont utilisées : utilisation de modèles numériques de terrain, de données satellites, multiplication des stations météoroutières... La plupart des pays exposés à des problèmes de viabilité hivernale possèdent des systèmes complexes de prévision d’état des routes en conditions hivernales (Pilli-Sihvola et Lähesmaa 2004, Pisano et al. 2004, Rohn et Raatz 2004,

Wallman 2004, Yamagiwa et al. 2004, Iivanainen et Petterson 2004). Un exemple de système opérationnel utilisé en Finlande est montré sur la figure 2.14.

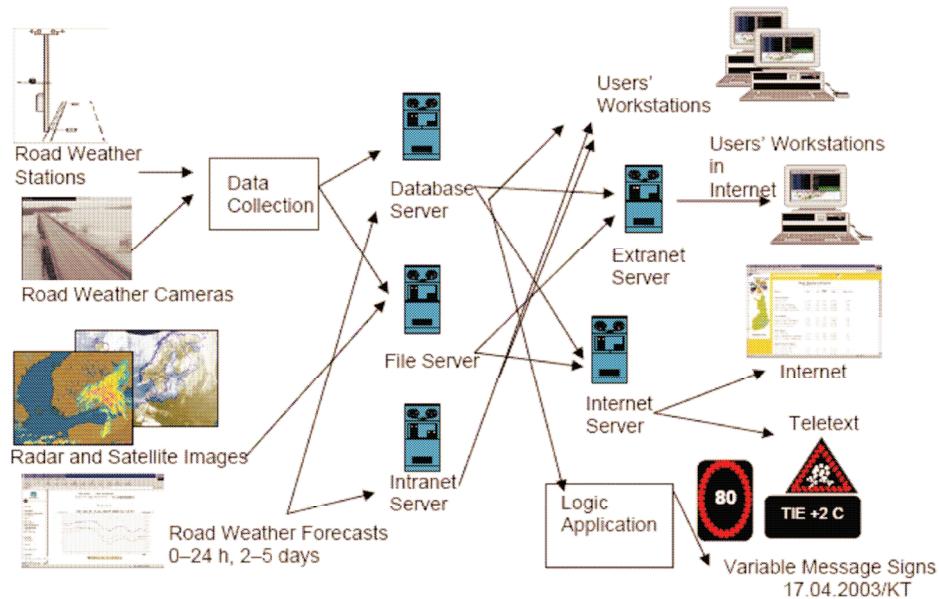


Figure 2.14 : Exemple d'un système opérationnel complexe de prévision d'état des routes, d'après Iivanainen et Pettersson (2004)

Ces systèmes sont extrêmement élaborés et utilisent autant de données que possible (mesures des stations météoroutières, prévisions, caméras vidéo, images satellites et radar, expertise humaine...) afin de prévoir de manière la plus précise possible l'état de surface d'une route sur un itinéraire routier. L'instrumentation importante de ces outils d'aide à la décision constitue un investissement significatif.

2.4.6 Le traitement de la neige dans les modèles

Les modèles utilisés en viabilité hivernale traitent de manière simple la neige en surface. Un récapitulatif est proposé dans le tableau 2.5.

Nom	Pays	Référence	Traitement de la neige
/	Grande-Bretagne	Thornes 1984	Aucun
Met-Office	Grande-Bretagne	Rayer 1987	Aucun
Icebreak	Grande-Bretagne	Shao 1990	Aucun
DMI-Hirlam-R	Danemark	Sass 1992	Réservoir d'eau solide (sans distinction neige/glace)
DWD	Allemagne	Jacobs et Raatz 1996	Aucun
Préviroute	France	Paumier et Arnal 1998	Aucun
METRo	Canada	Crevier et Delage 2001	Réservoir d'eau solide (sans distinction neige/glace)

Tableau 2.5 : Traitement de la neige dans les modèles.

Les systèmes experts (Normann 2000, Yamagiwa et al. 2004) sont basés sur la prévision de la précipitation neigeuse et sur les observations en temps réel, et les modèles physiques ne différencient pas la neige de la glace. Ainsi ces modèles ne tiennent pas compte de la variabilité importante des flux de chaleur au moment où une couche de neige se dépose sur une chaussée, ni des propriétés de l'interface route/neige. Or la caractéristique de l'interface route/neige intervient dans une modélisation précise du transfert thermique entre la route et la neige. De la même manière, le transfert de chaleur entre la route et la neige est un terme très important du bilan thermique d'une couche de neige déposée sur une route. C'est pourquoi le devenir d'une couche de neige (fonte ou tenue) nécessite une modélisation précise des transferts thermiques et donc de l'interface entre le sol et la neige.

2.4.7 Conclusion sur les modèles de prévision d'état des routes

La majorité des pays soumis à des conditions climatiques hivernales utilise des modèles pour la prévision de l'état de surface des routes au cours de l'hiver. Le principe est similaire pour tous les pays. La prévision est consacrée aux itinéraires routiers. Pour cela, les grands itinéraires sont équipés de stations météoroutières, permettant de connaître la température en surface et en profondeur de la route. Cette mesure de température va servir de condition initiale à une prévision de la température de surface au niveau de la station. Ces prévisions ponctuelles sont extrapolées sur l'intégralité du réseau à partir de signatures thermiques, obtenues grâce à des

relevés effectués avec un véhicule équipé de radiomètre infrarouge. D’autres données peuvent également être utilisées de manière complémentaire aux stations météoroutières, par exemple des données locales, des observations satellites et radar ou encore des expertises humaines. La multiplication des données rend les prévisions plus précises mais constitue également un investissement significatif en matériel et en hommes.

Les modèles physiques associés à ces prévisions sont basés sur la résolution du bilan énergétique de surface et des transferts thermiques dans le sol. Ils prévoient essentiellement la température de surface. La modélisation de l’état de surface (neige, verglas) est ainsi basée essentiellement sur la simulation de température de surface, et parfois sur l’évolution d’un réservoir de glace en surface. Les origines de glace en surface étant multiples, seuls des systèmes experts peuvent compléter ces modèles, afin d’obtenir une information plus précise sur l’état de surface.

Il apparaît qu’aucun modèle ne permet de simuler explicitement l’occurrence de neige sur les chaussées, par manque de connaissance sur les transferts thermiques et hydriques mis en jeu à l’interface entre la chaussée et la neige. Ainsi, afin de simuler la tenue ou non de la neige sur une chaussée, la première étape nécessaire est de combler le manque de connaissances physiques sur les mécanismes d’évolution d’une précipitation neigeuse entrant en contact avec une surface routière. Au niveau du contexte de prévision, aucun outil opérationnel ne permet d’effectuer une prévision n’utilisant que les données météorologiques comme entrée.

Le projet Gelcro, en France, a eu pour objet de combler les lacunes dans notre connaissance sur la tenue de la neige sur une chaussée, à la fois du point de vue expérimental et du point de vue modélisation. Ce projet est décrit dans le paragraphe suivant.

2.5 Le projet Gelcro

Le projet Gelcro a été lancé en France en 1995. Il associe les compétences respectives du Centre d’Etude de la Neige (CEN/Météo-France), du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), des Centres d’Etudes Technique de l’Equipement (CETE) de l’Est et de Lyon, du Service d’Etudes Techniques des Routes et Autoroutes et de la Direction Départementale de l’Equipement de l’Isère (DDE38).

2.5.1 Les objectifs

Le projet Gelcro comporte deux axes de recherches. Le premier est d'améliorer les connaissances physiques sur les mécanismes d'évolution d'une précipitation neigeuse entrant en contact avec une surface routière, dans un premier temps en condition expérimentale (hors trafic et sans traitement des chaussées) et ensuite en conditions s'approchant des conditions réelles. Le second axe de recherche est relatif à la modélisation, et doit intégrer les résultats théoriques acquis expérimentalement. Le but est le développement d'un modèle permettant l'élaboration de prévisions destinées à améliorer l'exploitation hivernale des chaussées en présence de neige.

De plus, le modèle opérationnel envisagé dans ce projet a pour intérêt de n'utiliser rien d'autre que les prévisions météorologiques. Cette absence d'utilisation de données de stations météoroutières ou d'expertise humaine dégrade la précision du modèle mais limite les coûts de production. De même, il doit différer des autres outils opérationnels par son applicabilité, il ne doit pas se limiter à un itinéraire routier, mais sa résolution spatiale doit être celle de la France, avec une résolution de 8km. Ainsi, son but n'est pas une utilisation uniquement par les utilisateurs et exploitants des réseaux principaux (autoroutes) mais également par tout utilisateur ou gestionnaire d'un réseau secondaire.

Les objectifs devant résulter de ce projet sont les suivants :

- Une optimisation des interventions préventives et curatives, associée à une réduction conséquente des quantités de fondants répandus
- Une meilleure maîtrise de l'information délivrée à l'usager (durée du phénomène, importance, état attendu du réseau en fonction du temps...)
- La mise au point d'un ensemble de nouvelles techniques et technologies de traitement et d'aide à la décision.

2.5.2 Le site expérimental

Une connaissance précise de l'interface chaussée/ neige, ainsi que des transferts thermiques et hydriques associés, nécessite une campagne expérimentale importante. En effet, les multiples états associés au revêtement routier (température de surface positive ou négative, mouillé, gelé, sec) et de la même manière les multiples types de neige (humide à 0°C, saturée en eau liquide à

0°C, sèche et de température négative) nous montrent qu'il existe de nombreux types d'interface.

Pour représenter la totalité des types d'interface et en nombre suffisant afin d'obtenir des résultats expérimentaux représentatifs, le nombre d'épisodes de chute de neige sur chaussée se devait d'être significatif. Cette campagne devait donc se dérouler sur un site soumis à de fréquentes chutes de neige. Ainsi, la campagne a été menée sur le laboratoire expérimental de Météo-France utilisé pour l'étude du manteau neigeux, situé au Col de Porte (1320m, massif de la Chartreuse, Isère). Malgré une altitude modérée, les chutes de neige sont fréquentes, permettant ainsi une présence du manteau neigeux au cours la totalité de l'hiver (d'octobre à début mai en moyenne). De plus, ce site est doté de toute l'instrumentation météorologique classique, permettant la mesure de la température de l'air, de la vitesse du vent, de l'humidité, des précipitations solides et liquides, du rayonnement visible et infrarouge.

Afin de satisfaire les besoins spécifiques du projet, le site a été équipé de six chaussées (2m x 3m), représentatives du réseau routier français (des routes à faible trafic aux structures autoroutières). Différents revêtements constituent ces chaussées : enduit superficiel, béton bitumineux semi-grenus, béton bitumineux drainant ou encore béton bitumineux très mince. De la même manière, deux types de structure ont été utilisés, l'une constituée de grave ciment, l'autre de grave bitume. Les chaussées sont décrites en annexe A. Chacune de ces chaussées a été équipée de capteurs de hauteur de neige, de plusieurs sondes de températures en surface et à différentes profondeurs, jusqu'à la base de la chaussée (de 29cm à 60cm selon le type de chaussée). Afin de suivre avec précision l'enneigement et le déneigement des différentes chaussées, des caméras vidéo ont été installées. Le site est montré sur la figure 2.15.

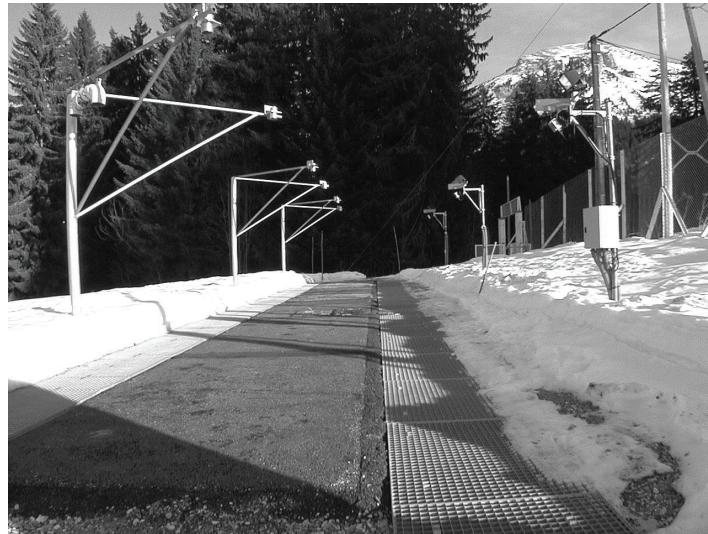


Figure 2.15 : Description de la partie du site expérimental du Col de Porte, dédiée au projet Gelcro. Les capteurs de neige infrarouge sont situés sur les mâts de gauche et les caméras vidéos sur les mâts de droite.

L’instrumentation installée sur chaque chaussée (capteur de hauteur de neige, sondes de température et caméra vidéo) a permis de suivre avec précision l’enneigement et l’évolution de température des chaussées. Le capteur de hauteur de neige est un capteur infrarouge de précision $\pm 1\text{cm}$. Les capteurs de températures sont des sondes platine de précision $\pm 0.1^\circ\text{C}$.

2.5.3 Le protocole de mesures en conditions naturelles – Classification de l’interface

La variété d’interface chaussée/neige possible nécessite plusieurs épisodes de chute de neige sur chaussée afin d’obtenir un échantillon représentatif des différents types d’interface. En plus de l’expérimentation destinée à l’acquisition des connaissances, les épisodes seront nécessaires à la validation du modèle. C’est pourquoi la campagne expérimentale du projet s’est déroulée sur plusieurs hivers et a nécessité une forte mobilisation de l’équipe Gelcro du Centre d’Etudes de la Neige.

Les hivers 1997/98, 1998/99 et 1999/2000 furent dédiés à l’étude du comportement d’une couche de neige se déposant sur une chaussée et plus spécifiquement à l’étude de l’interface chaussée/neige, en condition naturelle (en absence de fondants et de trafic) (Borel 2000, Muzet et al. 2000). Pendant les hivers 1999/2000, 2000/2001 et 2001/2002, des études dédiées aux

effets des fondants routiers et du compactage de la neige (du au trafic) ont été entreprises (Muzet et Livet 2000, Pitre et al. 2002, Pitre et al. 2003).

L’instrumentation installée sur chaque chaussée a permis de suivre avec précision l’enneigement et l’évolution de température des chaussées. Cependant, afin de connaître avec précision les caractéristiques de l’interface chaussée/neige, des mesures plus fines ont été nécessaires. Ainsi, des mesures manuelles ont complété les mesures automatiques. Ces mesures ont été les suivantes :

- mesure de la hauteur de neige sur chaque chaussée,
- mesure de la densité de la neige déposée,
- description de la configuration de l’interface chaussée/neige,
- mesure de la hauteur de neige saturée en eau liquide,
- mesure du profil de température du manteau neigeux.

En absence de fonte naturelle de la neige déposée sur les chaussées, des déneigements manuels ont été effectués quelques jours après la chute de neige, afin d’obtenir une chaussée sans neige pour l’épisode suivant. Cette expérimentation a permis la constitution d’une base de données conséquente comportant 60 épisodes (20 pour l’hiver 1997/98, 28 pour l’hiver 1998/99 et 12 pour l’hiver 1999/2000).

Les épisodes ont été classés selon l’état de surface de la chaussée et la température de l’air au début de la chute de neige (Borel 2000). Concernant la précipitation neigeuse, deux états ont été définis : une chute de neige sèche et une chute de neige humide. La chute a été considérée comme humide lorsque la température de l’air se situait aux alentours de 0°C et sèche lorsque la température était inférieure à -1.5°C. Entre -1.5°C et -0.5°C, la classification de la chute a été établie par analyse du type de grains de neige observé. De la même manière, la chaussée a été classifiée comme froide si sa température en surface était négative au début de la chute et comme chaude dans le cas contraire. De plus, la chaussée a été classifiée comme humide (ou gelée en cas de température négative) en présence d’eau liquide en surface, et sèche dans le cas contraire.

La distribution des différents types d’épisodes est récapitulée dans le tableau 2.6.

ETAT DE SURFACE DE LA CHAUSSEE

		chaude : $T_s \geq 0^\circ C$		froide : $T_s < 0^\circ C$	
		sèche	humide	sèche	gelée
ETAT DE LA NEIGE	neige sèche	10 cas	2 cas	15 cas	0 cas
	Neige humide	4 cas	29 cas	0 cas	0 cas

Tableau 2.6 : Classification des épisodes neigeux survenus au cours des 3 hivers de l’expérimentation.

Certains types d’épisodes n’ont jamais été observés durant la campagne, comme une chute de neige sur une chaussée gelée, ou une chute de neige humide sur une chaussée sèche. En effet, ce dernier cas se produit très rarement au Col de Porte, où les chutes de neige humide sont souvent précédées de pluie.

Le principal objectif de recherche était l’amélioration des connaissances relatives aux transferts thermiques et hydriques à l’interface chaussée/neige. L’interface possède une faible épaisseur (quelques millimètres) où l’on ne peut pas distinguer la chaussée et la neige, c’est à dire la partie où les grains de neige sont présents dans les macro-rugosités de la chaussée (figure 2.16).

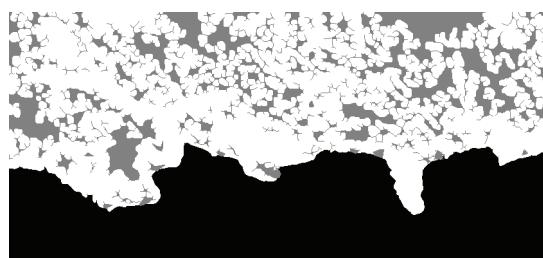


Figure 2.16 : Interface reconstituée après traitement d’image, d’après Borel 2000. La chaussée, la glace et l’air apparaissent respectivement en noir, gris et blanc. L’échelle verticale est d’environ 2cm.

L'étude sur site a été complétée par une étude de laboratoire dans le cadre de la thèse de Borel (2000) effectuée au Centre d'Etudes de la Neige. Pour les différents types d'épisodes, des échantillons composites neige/chaussée ont été prélevés afin de caractériser les propriétés de l'interface. Afin de ne pas modifier la microstructure de la neige, une technique de coupe a été développée au cours du projet (Borel et Brzoska 2000). L'analyse de ces échantillons expérimentaux, reconstitués grâce à une méthode de traitement d'image (figure 2.16, Borel 2000), a permis de distinguer différents types d'interface chaussée/neige. Cette étude s'est également intéressée au problème de la remontée d'eau par capillarité dans une couche de neige déposée sur une chaussée.

2.5.4 Les résultats expérimentaux en conditions naturelles

Borel (2000) a distingué 3 types d'interface :

- Type I : la couche de neige est caractérisée par la présence d'une couche saturée en eau liquide à sa base, formée par remontée capillaire de l'eau, initialement présente en surface du revêtement ou produite par fonte de la neige.
- Type II : l'interface résulte d'une chute de neige humide sur une chaussée froide et sèche. La capillarité conduit à établir un contact parfait entre la chaussée et la couche de neige.
- Type III : l'interface résulte d'une chute neige sèche sur une chaussée froide. On se trouve en présence d'une zone très peu dense entre la neige et la chaussée.

Il a résulté de ces études sur les interfaces chaussée/neige que la présence d'eau liquide pour les interfaces de type I ou II assurait un contact parfait entre la chaussée et la neige, ne limitant ainsi pas les transferts thermiques. Par contre, dans le cas de l'interface de type III, la neige ne remplit pas les macrorugosités de la chaussée et il existe peu de connections entre la chaussée et la neige, ainsi les transferts thermiques sont limités. Borel (2000), propose ainsi une résistance thermique d'interface pour cette configuration, dépendante du type de revêtement. Ces résultats ont été intégrés dans le modèle, et sont détaillés en section 3.4.2.4.

Les travaux de Borel (2000) se sont également intéressés au problème de l'ascension capillaire dans une couche de neige déposée sur une chaussée. Comme il a été observé par Coléou et Lesaffre (1998) et Coléou et al. (1999), il peut se former, à la base du manteau neigeux, sous certaines conditions, (température de surface de la chaussée positive, chaussée humide, mélange de pluie et de neige, fonte...) une couche de neige totalement saturée en eau liquide,

pouvant atteindre quelques centimètres. En effet, l'eau s'intègre dans les pores de la neige par capillarité.

Les forces de capillarité étant dépendantes de la porosité et de la forme microscopique du matériau, elles diffèrent selon le type de grains de neige. Ainsi, la hauteur de cette couche de neige saturée en eau liquide va dépendre du type de neige. Une expression empirique de la hauteur de couche saturée en fonction du type de neige a été établie dans Coléou et Lesaffre (1998) et Coléou et al. (1999). En viabilité hivernale, cette couche de neige saturée en eau liquide est très importante. En effet, celle-ci modifie fortement les échanges thermiques neige/chaussée, ainsi que les propriétés mécaniques. De plus, cette couche de neige saturée est susceptible de regeler et de former une couche de glace, rendant encore plus difficiles les conditions de conduite et de déneigement. C'est pourquoi dans le cadre du projet Gelcro, Borel (2000) a étudié l'influence du revêtement sur la hauteur de saturation. En effet, un revêtement routier étant rugueux en surface, les grains de neige pénètrent dans les macro-rugosités de la chaussée. Les forces de capillarité induites vont permettre à l'eau liquide présente en surface de la chaussée de remonter au sein du manteau neigeux. Ainsi, Borel (2000) a complété la corrélation établie par Coléou et Lesaffre (1998) et Coléou et al. (1999) par la dépendance au type de revêtement. Cette formulation a été introduite dans le modèle, et est décrite en section 3.4.3.2.

En conditions réelles, le comportement d'une couche de neige déposée sur une chaussée diffère du comportement naturel. En effet, les conséquences sur la neige du trafic et des traitements par les fondants sont importantes et restent méconnues. C'est pourquoi le projet Gelcro s'est intéressé à l'étude de la contribution du trafic et des fondants routiers.

2.5.5 La prise en compte des fondants routiers et du trafic

2.5.5.1 Modification de la couche de neige par action du trafic

Au cours des hivers 1999/2000 et 2000/2001, des mesures ont été destinées à l'étude de l'effet du compactage de la neige par un "pseudo trafic" (Muzet et Livet 2000, Pitre et al. 2002). Le but de cette étude était de connaître les effets thermiques et mécaniques du compactage de la neige. Pour cela, au cours de 9 épisodes neigeux, un compactage effectué grâce à un rouleau lesté était effectué sur une demi-planche expérimentale. Des mesures manuelles (hauteur de neige, profil de température, densité de la neige, cisaillement et mesure de la hauteur de couche

saturée) étaient ensuite effectuées dans et hors de la zone compactée afin d’apprécier l’effet du compactage. Les mesures de cisaillement étaient effectuées avec un scissomètre soit à l’interface chaussée/neige, afin de caractériser l’adhérence de la neige sur la chaussée, soit dans le manteau neigeux, afin de caractériser la cohésion de la neige.

Les travaux de Muzet et Livet 2000, Pitre et al. 2002 ont permis de caractériser l’influence mécanique du compactage de la neige. En effet, le compactage augmente la densité de la neige (d’un facteur variant de 1.9 à 4.4 pour de la neige sèche, et d’un facteur variant de 1.65 à 3 pour de la neige humide). De même, comme on peut le voir sur la figure 2.17, le compactage augmente l’adhérence de la neige sur la chaussée et la cohésion de la neige.

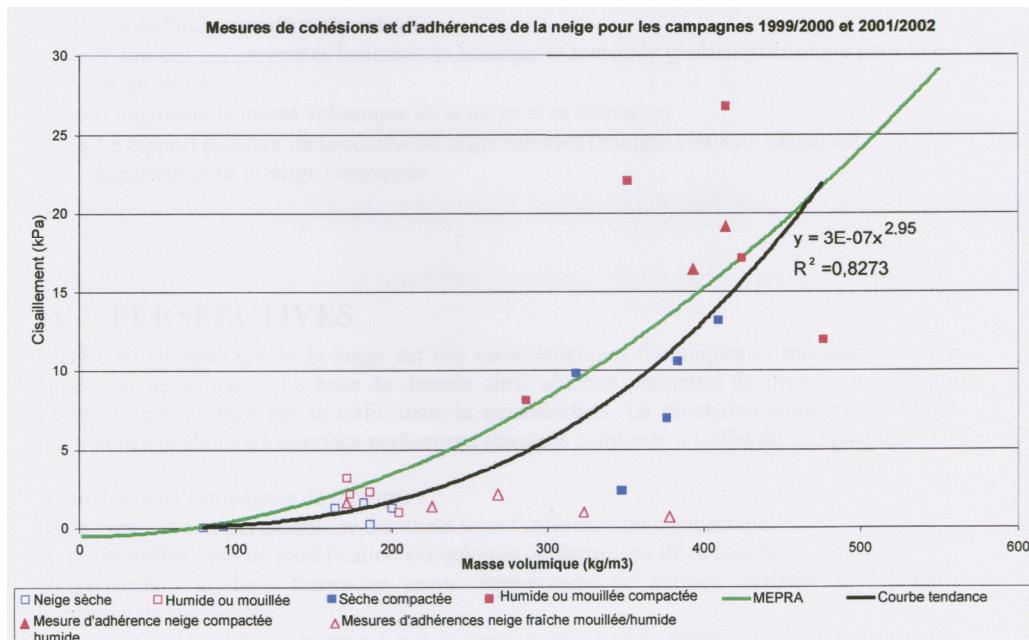


Figure 2.17 : Comparaison des mesures de cisaillement et de densité sur des revêtements expérimentaux, entre les parties non traitées et les parties avec trafic simulé, d’après Pitre et al. 2002.

Les conséquences mécaniques du compactage entraînent également des effets thermiques et hydriques sur la couche de neige et l’interface. L’augmentation de densité diminue les propriétés isolantes de la neige (cas de la neige sèche) du fait de l’augmentation du volume de glace par rapport au volume d’air (donc une augmentation de la conductivité thermique) et augmente la hauteur de la couche saturée en eau liquide (cas de la neige humide) du fait de la diminution de la porosité. Ces études ont permis d’observer des conséquences qualitatives de l’effet du compactage, mais ces résultats se sont avérés trop limités pour prendre en compte de

manière précise l’effet du trafic dans un modèle opérationnel (peu d’épisodes, variabilité des résultats, trafic simulé par compactage éloigné de la réalité).

Les effets du compactage par le trafic ne sont pas négligeables, ils doivent donc être pris en compte dans un modèle opérationnel, et ceci nécessite une étude plus approfondie de l’effet du compactage, avec si possible une étude avec un compactage réel par passages de véhicules.

2.5.5.2 Prise en compte des fondants routiers

Au cours de l’hiver 2001/2002, l’influence des fondants et en particulier celui du chlorure de sodium (NaCl) a été étudiée sans et avec trafic simulé (obtenu par compactage de la neige) (Pitre et al. 2003). L’objectif de cette étude était de mieux comprendre les mécanismes physico-chimiques se développant dans la pellicule de neige mise en présence de fondants, et ceci en fonction du type de neige. Au cours de 5 épisodes, un salage était effectué préalablement à la chute de neige, sur une demi-planche expérimentale. Dans un premier temps, des mesures (hauteur de neige, type de neige, densité, cohésion, hauteur de couche saturée) étaient effectuées sur les parties non salées et salées, afin de caractériser les différences de comportement. Ensuite la partie traitée aux fondants était compactée afin de simuler l’effet du trafic.

Les résultats issus de cette campagne sont que le traitement au chlorure de sodium (appliqué en préventif ou en curatif) :

- Abaisse la température du revêtement (au moment de la chute de neige pour une application préventive). Cette diminution (parfois quelques degrés) est fonction de la température et de la quantité de neige.
- Augmente la densité de la neige fraîche (environ 16% en moyenne pour la neige fraîche et 10% pour la neige compactée).
- Augmente la hauteur de la couche saturée à l’interface
- Abaisse la cohésion de la neige (sèche ou humide)
- Retarde l’adhésion de la neige au revêtement

De même, le traitement par un fondant entraîne le développement d’une couche de neige saturée en eau liquide à l’interface, facilitant son décollement (sauf en cas de regel). Cependant, le faible nombre d’épisodes et les limites de l’expérimentation (le compactage manuel ne reproduit pas le brassage de la neige par le trafic) n’ont pas permis d’établir une

paramétrisation utile pour la modélisation et ont montré la nécessité de poursuivre des expérimentations dans le domaine.

2.5.6 Le modèle initial Gelcro

Un modèle avait été envisagé à l’initiation du projet Gelcro. Il devait résulter du couplage du modèle de sol du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées : GEL1D (Frémont et Williams 1979) et du modèle de neige de Météo-France : CROCUS (Brun et al. 1989, 1992), donnant ainsi le nom de Gelcro au projet. Le modèle GEL1D (Frémont et Williams 1979) est un modèle de sol permettant de calculer la progression du front de gel, mais ne gérant pas les flux d’eau. Le modèle CROCUS (Brun et al. 1989, 1992) est décrit en section 3.2.2.

Ainsi, un premier modèle a été élaboré par Lassoued (2000), à partir du couplage des deux modèles précédents. Le couplage a été réalisé à partir d’un schéma de résolution explicite, et un réservoir de surface (eau ou glace) a été intégré au modèle GEL1D. La résolution explicite du calcul du flux de conduction fut source d’importantes instabilités numériques et les simulations à long terme étaient impossibles. Une amélioration de ce modèle a été effectuée en introduisant un schéma de résolution implicite (Bouilloud 2003) mais il s’avéra toujours limité pour une simulation précise des phénomènes à l’interface. En effet, l’absence d’hydrologie dans le modèle GEL1D ne permettait pas une estimation précise des transferts turbulents en surface, donc la gestion du réservoir de surface ajouté au modèle était relativement imprécise. De plus, certains revêtements, comme les BBDR (Béton Bitumineux Drainant) ou les BBTM (Béton Bitumineux Très Mince), nécessitent une modélisation des transferts hydriques dans la chaussée. En dernier point, la discrétisation importante de la chaussée (plusieurs centaines de nœuds) rendait le temps de calcul trop élevé pour une éventuelle application opérationnelle.

2.6 Conclusion du chapitre

Les conditions de surface d’une chaussée ne sont pas influencées uniquement par les conditions météorologiques mais également par des facteurs extérieurs : trafic routier, opérations de maintenance (déneigements et traitement aux fondants routiers). De plus, ces facteurs sont associés à des incertitudes très fortes et difficilement intégrables dans un modèle physique. Ainsi la simulation de l’état de surface d’une route est un problème difficile. Afin de tenter de pallier ce problème, la majorité des pays soumis à des conditions climatiques sévères

multiplient les stations météoroutières afin de mieux prévoir la température de surface et le risque de gel et favorisent la prévision à courte échéance (quelques heures).

Les systèmes de prévision développés sont des systèmes complexes utilisant des stations météoroutières, des expertises humaines, des mesures en temps réel, des caméras vidéo, des images satellites... et tendent à se complexifier encore afin de décrire les réseaux routiers avec une précision très fine (jusqu'à une résolution de 30 m, Adams et al. 2004), intégrant la topographie et les effets météorologiques locaux. Le coût de ces systèmes automatiques de prévision est extrêmement élevé et nécessite une coopération étroite des services de prévision météorologique et des services d'exploitation routière, c'est pourquoi les prévisions se limitent aux itinéraires routiers les plus importants.

Concernant la caractérisation de l'état de surface, l'utilisation de systèmes experts est répandue. En effet, les multiples sources de verglas en surface d'une route, donc les multiples causes, ne peuvent pas être intégrées à un modèle physique simple. C'est pourquoi les modèles physiques sont essentiellement axés sur la modélisation de température de surface, et sur une l'estimation de présence de glace en surface, due au gel de l'eau liquide en surface. De la même manière, la prévision de la neige au sol est basée sur des systèmes experts utilisant la prévision de précipitation neigeuse, et les observations. Les modèles n'intègrent pas la neige se déposant sur la chaussée. Cependant, le devenir d'une couche de neige déposée sur la chaussée (fonte ou tenue) va être fortement dépendant du flux de conduction provenant de la chaussée.

Le projet Gelcro a été lancé afin de développer un système de prévision d'état des routes permettant de combler ces manques actuels, c'est à dire de développer un outil d'aide à la prévision non plus réservé aux gros itinéraires routiers mais dédié à l'intégralité de la France (avec une résolution de 8km), n'utilisant que les prévisions météorologiques, et permettant de simuler explicitement le devenir d'une couche de neige déposée sur la chaussée. Cet outil pourrait évidemment s'avérer moins précis qu'un système complexe, mais l'absence d'utilisation de données supplémentaires aux prévisions météorologiques réduit le coût de production.

La campagne expérimentale du projet Gelcro a permis d'obtenir des données très précises sur l'évolution de la neige sur les chaussées expérimentales du Col de Porte, les transferts thermiques et les caractéristiques de l'interface. Ces données ont servi de base au

développement (chapitre 3) et à la validation (chapitre 4) du modèle couplé neige/route ISBA-Route/CROCUS.

Chapitre 3

La modélisation

La modélisation

3.1 Introduction

L'évolution d'un manteau neigeux dépend des conditions météorologiques auxquelles il est soumis. Cependant, l'étude du manteau neigeux se déposant sur une chaussée diffère de l'étude du comportement d'un manteau neigeux présent dans des zones naturelles. En effet, on ne s'intéresse pas ici à l'évolution d'un manteau neigeux saisonnier d'épaisseur relativement importante, mais à un manteau neigeux de faible épaisseur et dont la durée de vie n'est que de quelques heures. Dans ce contexte, les conditions initiales sont primordiales, notamment le flux de conduction entre la chaussée et la couche de neige, lorsque celle-ci se dépose. Ce flux va être déterminant sur le devenir de cette couche de neige. Ainsi, une simulation précise de l'occurrence de neige sur une route nécessite une simulation précise du flux de conduction entre la chaussée et la neige. La simulation de l'évolution d'une couche de neige se déposant sur une route nécessite donc l'utilisation d'un modèle permettant de simuler l'évolution simultanée de la route et de la neige lorsqu'elle est présente. La solution retenue dans cette étude est le couplage d'un modèle de sol et d'un modèle de neige.

De plus, grâce à l'expérimentation du projet Gelcro, des connaissances théoriques sur les transferts thermiques et hydriques à l'interface chaussée/neige ont pu être établies. L'expérimentation a prouvé que la configuration de l'interface était primordiale dans le transfert thermique entre la chaussée et la couche de neige déposée sur la chaussée, mais également que cette interface était une zone relativement complexe. En effet, la configuration de l'interface dépend fortement des transferts thermiques et hydriques entre la chaussée et la neige, ceux-ci étant fonction du type de revêtement de surface et du type de neige présent à l'interface. Afin de pouvoir intégrer les résultats expérimentaux (propriétés thermiques de l'interface, transferts hydriques à l'interface) dans un modèle, et reproduire avec le plus de précision possible le comportement des revêtements, l'utilisation d'un modèle de sol détaillé, avec hydrologie, a également été nécessaire. C'est pourquoi le premier modèle (Lassoued 2000) développé parallèlement à la campagne expérimentale à partir du modèle de sol GEL1D (Frémont et Williams 1979) a été abandonné (voir section 2.5.6) et remplacé par un modèle hydrologique : ISBA (Noilhan et Planton 1989). Ce modèle est le modèle de sol de Météo-

France, utilisé pour des études hydrologiques de sols naturels, et pour la prévision numérique du temps et du climat. De la même manière, l'utilisation du modèle de neige CROCUS (Brun et al. 1989, 1992) a été nécessaire afin de simuler avec précision le type de neige et les processus à l'interface.

L'application envisagée étant un peu différente de leur utilisation habituelle, les modèles ISBA (Noilhan et Planton 1989) et CROCUS (Brun et al. 1989, 1992) ont nécessité une adaptation préalable. Les caractéristiques physiques des routes ont dû être introduites dans le modèle ISBA. De même, des adaptations du modèle CROCUS ont été nécessaires. Certaines ont un caractère numérique afin de prendre en compte la variabilité du flux de conduction entre la chaussée et la neige, alors que d'autres sont physiques. La formation d'une couche de neige totalement saturée en eau liquide à la base du manteau neigeux (Coléou et Lesaffre 1998, Coléou et al. 1999) n'est pas primordiale pour l'étude du manteau neigeux saisonnier, mais elle l'est par contre dans une problématique de viabilité hivernale (risque de regel et donc augmentation du risque d'accident et difficulté à déneiger la route).

Les modèles doivent être couplés de manière à prendre en compte l'évolution simultanée de la chaussée et de la neige. Ainsi, les transferts thermiques et hydriques à l'interface doivent être décrits de manière fine dans le couplage. De plus, le modèle couplé doit également permettre la simulation de tous les types d'interface déterminés expérimentalement (Borel 2000). La perspective d'utilisation opérationnelle du modèle est également à prendre en compte au cours du développement. Ainsi, le modèle développé doit être numériquement stable pour permettre des simulations à long terme.

Dans ce chapitre, les versions originelles des modèles ISBA (Noilhan et Planton 1989) et CROCUS (Brun et al. 1989, 1992) sont présentées. Ensuite, les adaptations apportées à ces modèles afin d'être utilisables dans un contexte de viabilité hivernale sont décrites. La dernière partie de ce chapitre aborde le principe de couplage avec la prise en compte du type d'interface et les transferts associés, ainsi que les principes de résolution numérique.

3.2 Les éléments du modèle couplé

Dans cette section sont présentées les versions originelles des modèles qui seront utilisés pour développer un modèle permettant de simuler le comportement d'une couche de neige déposée sur une chaussée.

3.2.1 Le modèle de sol ISBA

Le schéma de surface ISBA (Noilhan et Planton 1989, Noilhan et Mahfouf 1996) a été développé pour décrire les échanges énergétiques et hydriques entre la basse couche de l'atmosphère, le sol et la végétation dans les modèles atmosphériques. Les nombreux coefficients intervenant dans la diffusion de la chaleur et de l'eau sont déterminés à partir des caractéristiques du sol (texture du sol, type de végétation, profondeur racinaire...). Les processus de surface sont décrits sur la figure 3.1.

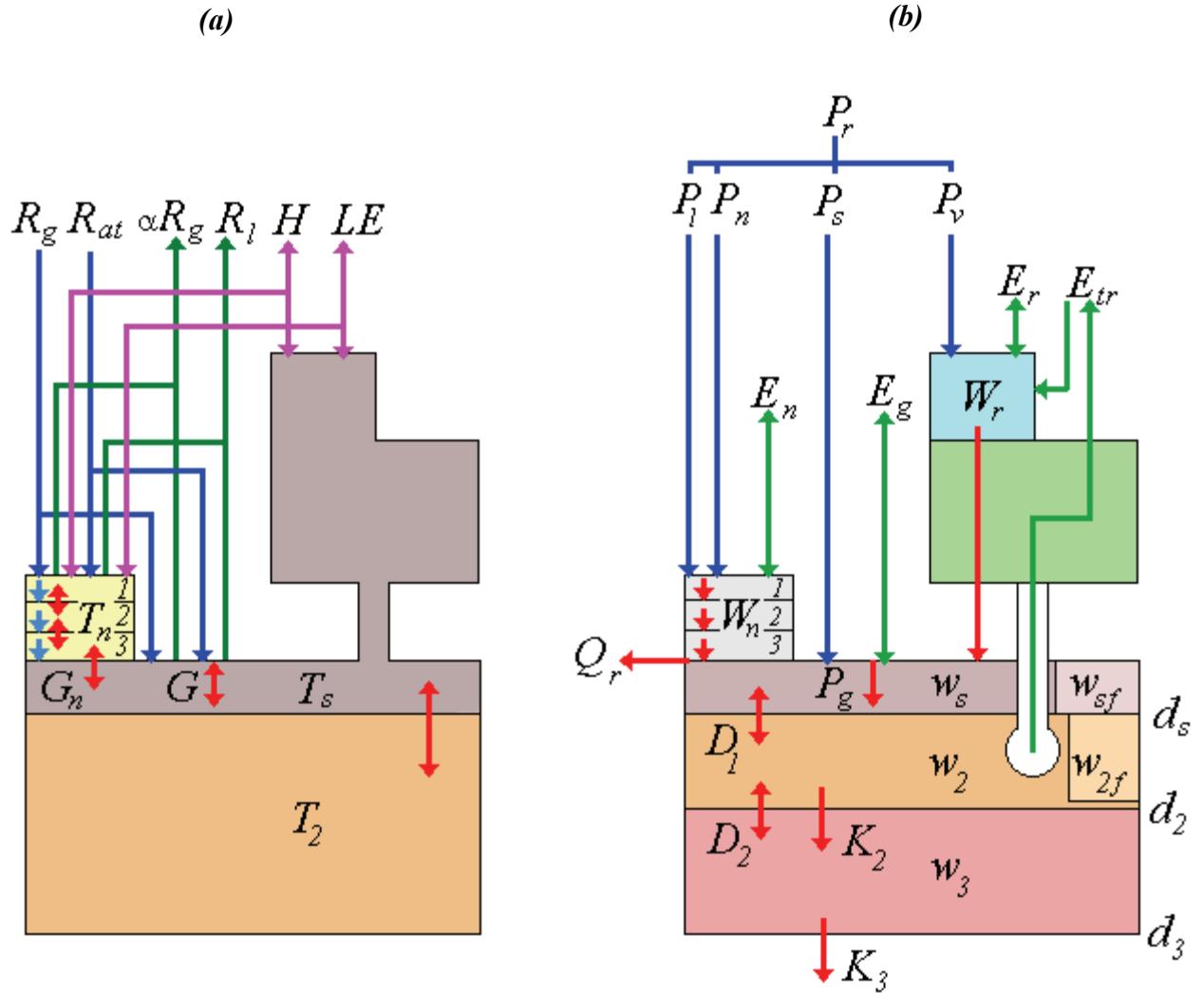


Figure 3.1 : Transferts a) thermiques et b) hydriques entre la surface (neige : partie gauche du schéma, sol nu : partie centrale du schéma, végétation : partie droite du schéma) et l'atmosphère dans le modèle ISBA. R_g et R_{at} sont respectivement le flux solaire et infrarouge incident, αR_g est le flux solaire réfléchi, R_l est le flux infrarouge émis, H et LE sont respectivement les flux de chaleur sensible et latente. P_r est la précipitation totale, P_l et P_n sont respectivement la précipitation liquide et neigeuse sur la partie enneigée, P_s est la précipitation sur le sol nu, P_v est la précipitation interceptée par la végétation, P_g est l'infiltration. E_n est la sublimation de la neige, E_g est l'évaporation du sol nu, E_r est l'évaporation du réservoir intercepté W_r , E_{tr} est l'évapotranspiration et Q_r est le ruissellement de surface. T_s , w_s et w_{sf} représentent respectivement la température et les teneurs volumiques en eau et glace de la couche de surface. T_n et W_n représentent respectivement les températures et les équivalents en eau des différentes couches de neige, T et w et w_f représentent respectivement les températures et les teneurs volumiques en eau et glace des couches subsurface. D et K représentent respectivement la diffusion et le drainage gravitationnel de l'eau liquide entre les différentes couches de sol. G_n et G sont respectivement les flux de conduction neige/sol et dans le sol. d représente la profondeur des couches.

Plusieurs versions du modèle ISBA ont été développées afin de couvrir les différents besoins. Une version simple, basée sur l'approche ‘Force-Restore’ développée par Deardoff (1977, 1978), permettant de satisfaire les besoins opérationnels ne comprenant que deux (ISBA-2L) ou trois (ISBA-3L) couches de sol et une version plus détaillé (ISBA-DF) (Boone et al. 2000) qui est un modèle multi-couches des mécanismes de diffusion (transferts thermiques et hydriques). Cette dernière version utilise un schéma de résolution multicouche des transferts de chaleur et de masse dans un milieu poreux. Les transferts thermiques et hydriques des différentes versions du modèle sont représentés sur la figure 3.2. De la même manière, deux schémas de neige sont intégrés à ISBA : un schéma à couche unique (Douville et al. 1995) et un schéma à 3 couches (Boone et Etchevers 2001).

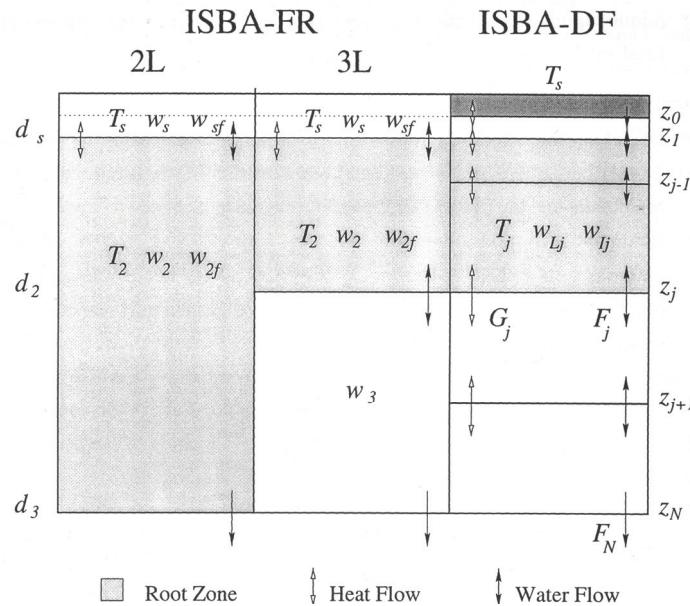


Figure 3.2 : Schéma des transferts thermiques (G est le flux de conduction et T est la température) et hydriques (F est le flux d'eau liquide, w_L et w_I sont respectivement les teneurs en eau liquide et glace) dans le sol pour les versions ISBA-2L, ISBA-3L et ISBA-DF, d'après Boone 2000.

ISBA est un modèle qui a été très largement utilisé pour la modélisation en hydrologie, ainsi les modèles de neige associés ont été développés pour cette utilisation, et ils s'avèrent trop limités pour décrire précisément l'interface et la qualité de la neige en contact avec la route. La description des flux et de la surface de la route nécessitant un calcul thermique et hydrologique, la version d'ISBA à partir de laquelle le modèle a été développé est la version ISBA-DF, avec diffusion explicite dans le sol. Cette version est décrite dans cette section.

3.2.1.1 Equations

Le modèle ISBA-DF est un modèle unidimensionnel, ainsi seuls les transferts verticaux sont considérés. Les coefficients thermiques du sol dépendent des contenus en eau liquide et solide. L'équation pour les transferts de chaleur est :

$$c_T \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \Phi \quad (3.1)$$

Les variation d'eau liquide et de glace peuvent être écrites :

$$\frac{\partial w_l}{\partial t} = - \frac{\partial F}{\partial z} - \frac{\Phi}{L_f \rho_w} - \frac{S_l}{\rho_w} \quad (w_{min} \leq w_l \leq w_{sat} - w_i) \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial w_i}{\partial t} = \frac{\Phi}{L_f \rho_w} - \frac{S_i}{\rho_w} \quad (0 \leq w_i \leq w_{sat} - w_{min}) \quad (3.3)$$

$$w = w_l + w_i \quad (3.4)$$

où pour la couche considérée :

c_T est la capacité calorifique du matériau constitutif de la couche ($\text{J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$)

T est la température (K)

λ est la conductivité thermique ($\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

F est le flux vertical d'eau liquide (m s^{-1})

Φ est un terme source/puit de chaleur associé au changement de phase de l'eau ($\text{J m}^{-3} \text{ s}^{-1}$)

z est la profondeur, positive vers le bas (m)

w , w_l et w_i représentent respectivement les contenus volumétriques en eau total, en eau liquide et en glace ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$).

S_l (flux lateral d'eau liquide) et S_i (sublimation) représentent respectivement des termes sources/puits externes ($\text{kg m}^{-3} \text{ s}^{-1}$) des contenus en eau liquide et glace

L_f est la chaleur latente de fusion ($3.337 \times 10^5 \text{ J kg}^{-1}$)

ρ_w est la densité de l'eau liquide (1000 kg m^{-3})

w_{sat} est la porosité de la couche considérée ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)

w_{min} est la valeur minimum du contenu en eau liquide ($0.001 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

L'équation de continuité pour la teneur volumétrique en eau peut être obtenue à partir des équations (3.2), (3.3) et (3.4) et elle s'écrit sous la forme :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{\partial F}{\partial z} - \frac{1}{\rho_w} (S_i + S_l) \quad (w_{min} \leq w \leq w_{sat}) \quad (3.5)$$

3.2.1.2 Propriétés thermiques du sol

Les propriétés thermiques du sol (conductivité et capacité calorifique) sont calculées à partir de la texture du sol, et du contenu en eau et en glace, à partir de la formulation de Peters-Lidard et al (1998).

Capacité calorifique d'une couche de sol c_{Tj}

$$c_{Tj} = (1 - w_{sat,j}) Cs \rho_{soil,j} + w_{lj} c_w + w_{ij} c_i \quad (3.6)$$

où c_w et c_i sont respectivement les capacités calorifiques volumiques de l'eau liquide et de la glace ($\text{J K}^{-1} \text{m}^{-3}$) et Cs est la capacité calorifique massique du sol sec ($\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$). ρ_{soil} est la masse volumique sèche de la couche (kg m^{-3}) et w_{sat} est la porosité de la couche ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

Peters-Lidard et al. (1998) proposent une valeur de la capacité calorifique moyenne des sols naturels de $733 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$. La masse volumique sèche du sol d'une couche peut être estimée à partir de la porosité du sol selon l'expression :

$$\rho_{soil} = (1 - w_{sat}) \rho_{solids} \quad (3.7)$$

où ρ_{solids} est la masse volumique des particules de sol (2700 kg m^{-3}). La capacité calorifique de l'air présent dans le sol est négligée.

En surface, l'inertie thermique due à la végétation est prise en compte. Ainsi, pour la couche de surface, la capacité calorifique vaut :

$$c_{T1} = I / (C_T \Delta z_1) \quad (3.8)$$

où Δz_1 est l'épaisseur de la couche de surface et C_T est l'inertie thermique de surface ($\text{K m}^{-2} \text{ J}^{-1}$) qui vaut :

$$C_T = \frac{1}{veg/C_V + (1-veg)/C_G} \quad (3.9)$$

où veg représente la fraction végétalisée de la maille, C_v est l'inertie thermique de la végétation (dépendante du type de végétation) et C_G est l'inertie thermique du sol, définie par Noilhan et Planton (1989) selon l'expression :

$$C_G = 2 \cdot \left(\frac{\pi}{\lambda_{CTI} \tau} \right)^{1/2} \quad (3.10)$$

où λ_I et c_{TI} sont respectivement la conductivité thermique et la capacité calorifique de la couche de surface et τ est une constante de temps correspondante à un jour (86400 s).

Conductivité thermique effective d'une couche de sol λ

Suivant les travaux de Peters-Lidard et al. (1998) et Johansen (1975), la conductivité thermique est la somme pondérée des conductivités de sol sec et saturé :

$$\lambda = K_e \lambda_{sat} + (1 - K_e) \lambda_{dry} \quad (3.11)$$

où K_e est le nombre adimensionnel de Kersten.

La conductivité thermique sèche est définie dans le cas général par :

$$\lambda_{dry} = \frac{0.135 \rho_{soil} + 64.7}{\rho_{solids} - 0.947 \rho_{soil}} \quad (3.12)$$

et pour le cas particulier de roche écrasée :

$$\lambda_{dry} = 0.039 w_{sat}^{-2.2} \quad (3.13)$$

La conductivité thermique saturée est donnée par :

$$\lambda_{sat} = \lambda_{soil}^{(1-w_{sat})} \lambda_i^{w_{sat}(1-w/w)} \lambda_w^{w_{sat}(w/w)} \quad (3.14)$$

où λ_i et λ_w représentent respectivement les conductivités thermiques de la glace ($2.2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) et de l'eau liquide ($0.57 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$). λ_{soil} est la conductivité thermique des particules solides, définie par :

$$\lambda_{soil} = \lambda_q^q \lambda_o^{1-q} \quad (3.15)$$

où q est le contenu relatif en quartz ($0 \leq q \leq 1$). Cette quantité est exprimée comme une fonction linéaire dépendante du contenu en sable, à partir des résultats de Peters-Lidard et al. (1998).

$$q = 0.038 + 0.0095 X_{sand} \quad (3.16)$$

où X_{sand} représente la fraction de sable dans le sol (%).

La conductivité thermique du quartz est prise égale à λ_q ($7.7 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) et celle des autres minéraux est :

$$\lambda_o = \begin{cases} 2.0 & q > 0.2 \\ 3.0 & q \leq 0.2 \end{cases} \quad (3.17)$$

Le nombre de Kersten Ke dépend des teneurs en eau et glace et de la porosité, et il est donné par :

$$Ke = (w_i / w) (\log_{10} \frac{w - w_i}{w_{sat} - w_i} + 1) + (w_i / w) \frac{w - w_i}{w_{sat} - w_i} \quad (3.18)$$

3.2.1.3 Transfert de chaleur dans le sol

La température moyenne de chaque couche est obtenue en intégrant l'équation (3.1) pour les N couches de sol :

$$\int_{-z_j}^{-z_{j-1}} c_r \frac{\partial T}{\partial t} dz = \int_{-z_j}^{-z_{j-1}} \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) dz + \int_{-z_j}^{-z_{j-1}} \Phi dz \quad (3.19)$$

où

$$T_j = \frac{1}{\Delta z_j} \int_{-z_j}^{-z_{j-1}} T dz \quad (3.20)$$

T_j est la température moyenne de la couche j considérée, l'indice j croît vers le bas et $\Delta z_j = z_j - z_{j-1}$.

Les équations (3.19) et (3.20) conduisent à :

$$\Delta z_j C_{T_j} \frac{\partial T_j}{\partial t} = G_{j-1} - G_j + \Delta z_j \Phi_j \quad (3.21)$$

G_j est le flux de conduction entre la couche $j+1$ et la couche j défini par :

$$G_j = \bar{\lambda}_j \frac{(T_j - T_{j+1})}{(\Delta z_j + \Delta z_{j+1})/2} \quad (3.22)$$

$\bar{\lambda}_j$ est la conductivité thermique interfaciale entre la couche $j+1$ et la couche j , définie par :

$$\bar{\lambda}_j = \frac{\Delta z_j + \Delta z_{j+1}}{(\Delta z_{j+1}/\lambda_{j+1}) + (\Delta z_j/\lambda_j)} \quad (3.23)$$

Condition limite supérieure

Pour la couche de surface, l'équation (3.21) peut être écrite sous la forme :

$$\Delta z_1 C_{T1} \frac{\partial T_j}{\partial t} = G_0 - G_1 + \Delta z_1 \Phi_1 \quad (3.24)$$

G_0 représente le flux énergétique entre la surface et l'atmosphère, et il s'écrit :

$$G_0 = R_{sol} + R_{IR} - H - LE \quad (3.25)$$

où R_{sol} , R_{IR} , H , LE sont respectivement les flux (W m^{-2}) solaire net, infrarouge net, de chaleur sensible et latente entre la surface du sol et l'atmosphère, dont les expressions sont les suivantes :

$$R_{sol} = R_G (1 - \alpha_s) \quad (3.26)$$

$$R_{IR} = R_A - \varepsilon_S \sigma T_S^4 \quad (3.27)$$

où R_G et R_A représentent les flux radiatifs incidents visible et infrarouge, σ est la constante de Boltzmann, α_s et ε_S sont l'albédo et l'émissivité de la surface du sol et T_S est la température de surface du sol.

$$H = \rho_a C_a C_h u_a (T_a - T_s) \quad (3.28)$$

$$LE = Lv((1 - veg)\rho_a C_h u_a (h_u q_{sat}(T_s) - q_a) + veg.Ev) \quad (3.29)$$

où :

ρ_a est la densité de l'air

C_a est la capacité calorifique de l'air

u_a est la vitesse de l'air

T_a et T_s sont les températures respectivement de l'air et de la surface du sol

L_v est la chaleur latente de vaporisation

E_v est la composante du flux de chaleur latente provenant de la végétation, explicitée dans Boone (2000)

h_u est l'humidité relative de surface exprimée en fonction du contenu en eau de surface (Mahfouf et Noilhan, 1991)

$q_{sat}(Ts)$ est l'humidité spécifique à saturation pour la température T_s

q_a est l'humidité spécifique de l'air

C_h est le coefficient d'échange déterminé selon la formulation de Louis (1979), en fonction de la stabilité des basses couches atmosphériques.

Condition limite inférieure

Une condition de flux nul est prescrite à la base du sol, ce qui est valable pour des épaisseurs de sol suffisamment importantes. La pénétration de l'onde thermique annuelle est de l'ordre de quelques mètres, ainsi l'épaisseur de sol discrétisée doit être supérieure, afin de modéliser correctement le cycle thermique annuel. On néglige le flux géothermique, dont la valeur est faible par rapport aux flux modélisés, à la base du sol. Ainsi, l'équation (3.21) peut s'écrire pour la couche N :

$$\Delta z_N C_{T_N} \frac{\partial T_N}{\partial t} = -G_{N-1} + \Delta z_N \Phi_N \quad (3.30)$$

Une méthode alternative est proposée afin de limiter l'épaisseur de sol, celle de prescrire une température moyenne annuelle (constante ou variable) au nœud de calcul situé à la base du sol, et de discréteriser le sol sur l'épaisseur correspondant à la pénétration de l'onde thermique annuelle. Cette profondeur est estimée à partir de l'équation (3.10) en remplaçant la constante de temps τ par la valeur correspondant à une année, et les propriétés thermiques de la couche de surface par des valeurs moyennes du sol. L'inconvénient de cette méthode est que la température moyenne annuelle et la profondeur de pénétration de l'onde annuelle ne sont pas connues à priori.

3.2.1.4 Transferts hydriques dans le sol

Les transferts hydriques dans le sol sont basés sur la loi de Darcy, au sein de laquelle le flux vertical d'eau liquide est proportionnel au produit du gradient du potentiel matriciel ψ et de la conductivité hydraulique k . Le potentiel matriciel et la conductivité hydraulique sont reliés au contenu volumique en eau à partir des relations de Brooks et Corey (1966), discutées dans Clapp et Hornberger (1978) :

$$k = k_{sat} S_w^{2b+3} \quad (3.31)$$

$$\psi = \psi_{sat} S_w^{-b} \quad (3.32)$$

où b est la pente de la courbe de rétention à l'eau, k_{sat} (m s^{-1}) est la conductivité hydraulique à saturation, ψ_{sat} (m) est le potentiel hydrique à saturation, et S_w le degré de saturation du sol défini par :

$$S_w = \frac{w - w_i}{w_{sat} - w_i} \quad (3.33)$$

Dans l'équation (3.5), le flux d'eau liquide dans le sol s'exprime par

$$F = -k \frac{\partial}{\partial z} (\psi + z) - \frac{D_{v\psi}}{\rho_w} \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (3.34)$$

Un terme additionnel (faible) de drainage linéaire (m s^{-1}) peut être ajouté à l'équation (3.34). Le premier terme du membre de droite de l'équation représente la loi de Darcy pour le transfert de l'eau liquide. Le second terme représente le flux d'eau sous forme vapeur. La conductivité vapeur $D_{v\psi}$ ($\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) est une fonction de la texture du sol, du contenu en eau et de la température, selon Braud et al. (1993).

Le flux vertical d'eau peut être exprimé sous forme plus compacte par :

$$F = -\eta \frac{\partial \psi}{\partial z} - k \quad (3.35)$$

avec :

$$\eta = \varphi(k + D_{v\psi}) \quad (3.36)$$

Le coefficient φ est le coefficient d'impédance de la glace. Il permet de prendre en compte la diminution des conductivités hydraulique et vapeur en présence de glace, et ainsi de limiter le flux d'eau liquide vers les couches de sol gelées. Il s'annule lorsque tous les pores sont occupés par de la glace. Il est calculé à partir de l'expression proposée par Johnsson et Lundin (1991) :

$$\varphi_j = 10^{-a_\varphi w_l / w} \quad (3.37)$$

avec $a_\varphi = 6$ (Lundin 1990).

Les valeurs des paramètres hydriques (b , ψ_{sat} , w_{sat} et k_{sat}) ont été estimées par Clapp et Hornberger (1978) pour les différentes classes de sol.

Comme pour la résolution de l'équation de la chaleur, l'équation (3.2) est intégrée pour chaque couche de sol j :

$$\int_{-z_j}^{-z_{j+1}} \frac{\partial w_l}{\partial t} dz = \int_{-z_j}^{-z_{j+1}} \frac{\partial F}{\partial z} dz + \int_{-z_j}^{-z_{j+1}} \left(S_l - \frac{\Phi}{L_f \rho_w} \right) dz \quad (3.38)$$

avec

$$w_{lj} = \frac{1}{\Delta z_j} \int_{-z_j}^{-z_{j+1}} w_l dz \quad (3.39)$$

et

$$F_j = -\tilde{\eta}_j \left[\frac{\psi_j - \psi_{j+1}}{(\Delta z_j + \Delta z_{j+1})/2} \right] - \tilde{k}_j \quad (3.40)$$

F_j représente le flux hydrique vertical entre la couche j et la couche $j+1$, avec :

$$\tilde{\eta}_j = \varphi_j (\tilde{k}_j + \tilde{D}_{v\psi}) \quad (3.41)$$

Dans les équations (3.40) et (3.41), \tilde{k} et $\tilde{D}_{v\psi}$ représentent les valeurs de la conductivité et de la diffusivité vapeur à l'interface, obtenues en interpolant le potentiel matriciel. Ainsi,

$$\tilde{k}_j = \frac{\Delta z_j k_j(\tilde{\psi}_j) + \Delta z_{j+1} k_{j+1}(\tilde{\psi}_j)}{\Delta z_j + \Delta z_{j+1}} \quad (3.42)$$

avec

$$\tilde{\psi}_j = \delta_{\psi_j} \psi_j + (1 - \delta_{\psi_j}) [\psi_{j+1} - (\Delta z_j + \Delta z_{j+1})/4] \quad (3.43)$$

où la fonction δ_{ψ_j} est définie par :

$$\delta_{\psi_j} = \begin{cases} 0 & \psi_j \geq \psi_{j+1} - (\Delta z_j + \Delta z_{j+1})/4 \\ 1 & \psi_j < \psi_{j+1} - (\Delta z_j + \Delta z_{j+1})/4 \end{cases} \quad (3.44)$$

La même méthode est utilisée pour la diffusivité vapeur $\tilde{D}_{v\psi}$.

Condition limite inférieure

La condition limite inférieure représente une condition de drainage gravitationnel à la base du sol. Elle s'exprime par :

$$F_N = -\varphi_N k_N \quad (3.45)$$

La diffusion verticale à la base du sol (c'est à dire les remontées capillaires) n'est plus négligeable en cas de présence d'une nappe à la base. Ainsi, une option permet de prescrire la présence d'une nappe (Boone 2000).

Condition limite supérieure

La condition limite supérieure représente l'infiltration. Elle s'écrit sous la forme :

$$I = -F_0 = \min(R_t - Q_r, -F_{max\ 0}) \quad (3.46)$$

où I est l'infiltration (m s^{-1}), R_t (m s^{-1}) est le taux d'eau liquide atteignant la surface (somme de la précipitation, de la fonte de neige et du ruissellement de la canopée).

$F_{max\ 0}$ représente le flux maximal pouvant s'infiltrer dans la couche de surface et il s'écrit :

$$F_{max\ 0} = k_{sat} \quad (3.47)$$

Q_r est le ruissellement sous-maille, il est considéré comme nul à l'échelle locale, cependant il peut devenir significatif à plus grande échelle et une paramétrisation sous-maille du ruissellement a été introduite dans le modèle pour cette application (Habets et al. 1999).

Termes puits/sources de l'eau S_l

Le terme puit/source de l'eau S_l est composé des pertes/gains dus à l'évapotranspiration/condensation et aux gains dus à des flux latéraux. L'évaporation du sol nu n'affecte que le réservoir de la couche de surface, par contre, l'évapotranspiration se produit sur la profondeur racinaire. Les détails sont donnés dans Boone (2000).

3.2.1.5 Résolution numérique

Les équations sont discrétisées grâce à un schéma aux différences finies de Crank-Nicholson, aboutissant à la résolution d'un système matriciel tri-diagonal.

La résolution numérique est explicitée dans Boone (2000).

3.2.1.6 Présence de neige en surface

En présence de neige en surface, le modèle ISBA permet de distinguer sur la maille, les parties enneigées des parties déneigées. Ainsi, les fractions de neige sur le sol nu p_{ng} , sur la végétation p_{nv} et la fraction de neige totale sur la maille p_n évoluent suivant :

$$p_{ng} = W_n / (W_n + W_{crn}) \quad (3.48)$$

$$p_{nv} = h_n / (h_n + 5 z_o) \quad (3.49)$$

$$p_n = veg p_{nv} + (1 - veg) p_{ng} \quad (3.50)$$

où W_n est l'équivalent en eau du manteau neigeux (kg m^{-2}), W_{crn} est un équivalent en eau critique du manteau neigeux (10 kg m^{-2}). La formulation de p_{nv} a été proposée par Pitman et al. (1991), où h_n représente la hauteur de neige et z_o est la rugosité de la maille.

La fraction enneigée n'est jamais égale à 1 afin de mieux simuler les effets sous-maille induits par les arbres et la répartition irrégulière de la neige due à la topographie locale.

En présence de neige, le coefficient d'inertie thermique de surface s'écrit :

$$C_T = 1 / \left[\frac{(1 - veg_a)(1 - p_{nc})}{C_G} + \frac{(1 - veg_a) p_{nc}}{C_n} + \frac{veg_a}{C_v} \right] \quad (3.51)$$

où C_n , C_v et C_G sont respectivement les coefficients d'inertie thermique de la neige, de la végétation et du sol nu.

veg_a est la fraction de végétation effective, elle est estimée à partir de la partie déneigée de la végétation, elle est définie par :

$$veg_a = veg (1 - p_{nv}) \quad (3.52)$$

Deux schémas de neige sont intégrés au modèle ISBA, un schéma à une seule couche (Douville et al. 1995) et un schéma à 3 couches (Boone et Etchevers 2001). Le modèle ISBA-DF utilise uniquement le schéma à 3 couches. Cependant, afin d'éviter les problèmes numériques, le modèle à 3 couches n'est activé qu'à partir d'une épaisseur de neige d'au moins 10cm. En dessous de ce seuil, le modèle à 1 couche est utilisé.

Principe du schéma à 1 couche (Douville et al., 1995)

Le schéma à 1 couche est basé sur le calcul de 3 variables pronostiques : l'équivalent en eau du manteau neigeux, la masse volumique moyenne et l'albédo. Pour une utilisation du modèle ISBA avec ce schéma, le bilan énergétique de surface est résolu pour une unique température de surface T_s , représentant la température du continuum sol-végétation-neige. Ainsi, aucun couplage n'est nécessaire.

Principe du schéma à 3 couches (Boone et Etchevers 2001)

Le schéma à 3 couches est quant à lui basé sur le calcul de 4 variables pronostiques : l'enthalpie spécifique, la densité et l'épaisseur de chaque couche, ainsi que l'albédo. Contrairement au modèle à 1 couche, le modèle 3 couches différencie la température de surface du manteau neigeux de celle du continuum sol-végétation, donc un couplage à partir d'un calcul du flux de conduction sol/neige est effectué. Ainsi, en présence de neige, l'équation du bilan énergétique de surface pour le sol et la végétation s'écrit :

$$\frac{1}{C_T} \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1 - p_n) [R_G (1 - \alpha_t) + \epsilon_t (R_A - \sigma T_s^4) - H - LE] + p_n [G_{SN} + R_{GSN} + Q_p] - F_s \quad (3.53)$$

où T_s est la température de surface du continuum sol-végétation. α_t et ϵ_t sont respectivement l'albédo et l'émissivité de la partie déneigée de la maille. G_{SN} est le flux de conduction sol/neige, R_{GSN} est le flux solaire atteignant la surface et Q_p est le flux de chaleur apporté par les précipitations, F_s est le flux de conduction vers la couche inférieure.

Paramétrisation des schémas de neige

L’albédo dépend des propriétés optiques de la neige, donc du type de grains. Les deux schémas ne décrivant pas la stratigraphie du manteau neigeux, une paramétrisation simple a dû être adoptée, et elle est identique pour les deux schémas. Une décroissance linéaire est utilisée pour la neige sèche (Baker et al. 1990), et une décroissance exponentielle est utilisée pour une neige humide (Verseghy 1991). En cas de chute de neige, la croissance de l’albédo est proportionnelle à la quantité de précipitation. Les constantes de paramétrisation , c’est à dire les constantes temporelles et les valeurs extrêmes d’albédo sont issues de Douville et al (1995).

Comme pour la surface du sol, les flux turbulents en surface de la neige sont déterminés à partir de la formulation de Louis (1979), dans les deux schémas. Cependant, pour le schéma 1 couche, il existe une unique température de surface (représentant le continuum sol-végétation-neige), ainsi la rugosité utilisée pour le calcul des flux turbulents est une rugosité effective du continuum sol-végétation-neige.

Les détails de ces schémas sont donnés dans Douville et al (1995) pour le schéma à 1 couche et dans Boone et Etchevers (2001) pour le schéma à 3 couches. La figure 3.3 montre les principales caractéristiques des deux schémas, ainsi que celles du modèle de neige détaillé CROCUS (Brun et al., 1989, 1992).

Parameterization	ISBA-FR	ISBA-ES	CROCUS
C_H (turbulent transfer)	Louis (1979): $f(R_i)$	Louis (1979): $f(R_i)$	$f(R_i > 0) = 1$ or fixed
z_0 (snow roughness)	Effective	Effective	10^{-3} – 10^{-2} m
Λ_s (thermal conductivity)	Yen (1981)	Anderson (1976), Sun et al. (1999)	Modified Yen (1981): $\geq 0.13 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
ρ_{new} (snowfall density)	Constant	$f(T_a, V_d)$	$f(T_a, V_d)$
Explicit metamorphism	No	No	Yes
Settling	Time constant	Anderson (1976): $f(\sigma_s, T_s, \rho_s)$	Brun et al. (1989): $f(\sigma_s, T_s, \rho_s)$
D_{s1} (surface thickness)	$0.03 \leq 0.05 \text{ m}$	$0.0025 \leq 0.05 \text{ m}$	$\geq 0.005 \text{ m}$
α_n (snow albedo)	Time constants	Time constants	Grain size, density
No. of layers	1	3	≤ 50
W_{max} (liquid capacity)	0	3%–10% mass	5% pore volume
Ripening	No	Yes	Yes
R_g transmission	No	Single spectral band	Multiple bands
Snow–soil heat flux	Implicit: none when $p_n = 1$	Explicit	Explicit
P_t (rain heat flux)	No	Yes	Yes
CPU ratio (to ISBA-FR)	1	2	5

Figure 3.3 : Principales caractéristiques des modèles de neige : ISBA-FR (modèle 1 couche, Douville et al. 1995), ISBA-ES (schéma à 3 couches Boone et Etchevers, 2001) et CROCUS (Brun et al., 1989, 1992), d’après Boone et Etchevers, 2001. T_a et V_a sont respectivement la température de l’air, T_s et ρ_s sont respectivement la température et la densité de la couche de neige et σ_s est la pression exercée par les couches supérieures.

3.2.1.7 Conclusion

Le modèle multicouches ISBA-DF permet de décrire avec précision les transferts thermiques et hydriques dans le sol ainsi que les échanges avec l'atmosphère. Cependant, les modèles de neige intégrés dans le modèle restent simples (peu de couches et peu de variables) et ne permettent pas de décrire avec précision le manteau neigeux. S'ils sont appropriés pour des études hydrologiques, ils sont trop limités pour décrire avec précision l'interface chaussée/neige et les transferts associés. L'utilisation d'un modèle de neige plus complexe, comme CROCUS (Brun et al., 1989, 1992), est nécessaire pour simuler le comportement d'une couche de neige déposée sur une chaussée.

3.2.2 Le modèle de neige CROCUS

Le modèle CROCUS (Brun et al., 1989, 1992) est un modèle unidimensionnel multicouches permettant de simuler l'évolution du manteau neigeux à partir d'un état initial donné et de l'évolution des paramètres météorologiques. Il est utilisé par Météo-France pour la prévision du risque d'avalanche (Durand et al. 1999). CROCUS est un modèle détaillé permettant de simuler l'évolution énergétique et massique du manteau neigeux. Son originalité réside dans sa capacité à simuler la métamorphose des grains. Ainsi, chaque couche de neige est caractérisée par les variables suivantes : épaisseur, température, densité, teneur en eau liquide et type de grains. Les processus et les différentes variables du modèle sont représentés sur la figure 3.4.

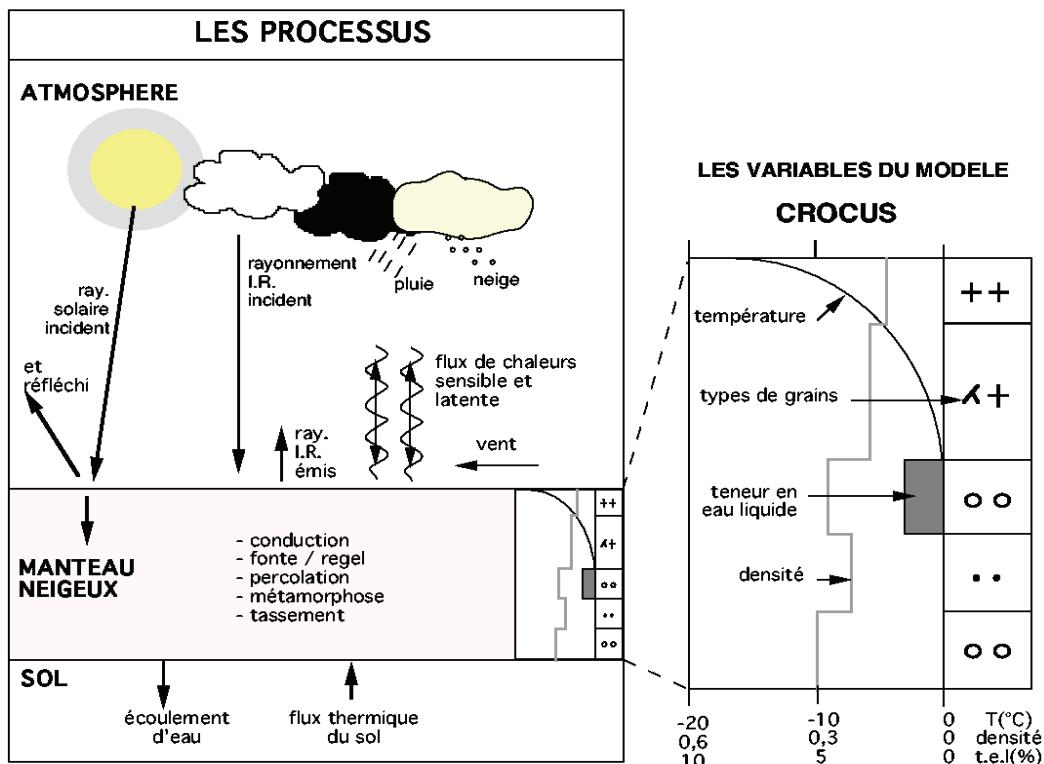


Figure 3.4 : Processus physiques et variables du modèles CROCUS

Les résultats expérimentaux du projet Gelcro (Borel, 2000), décrits en section 2.5.4, ont montré l'importance du type de neige à l'interface chaussée/neige dans les transferts thermiques et hydriques associés. Ainsi la capacité du modèle CROCUS (Brun et al., 1989, 1992) à simuler le type de grains a conduit à son utilisation dans un contexte de viabilité hivernale, plutôt que les modèles plus simples intégrés à ISBA (Douville et al. 1995, Boone et Etchevers 2001).

3.2.2.1 Transferts thermiques dans le manteau neigeux

Comme pour le modèle ISBA-DF, le transfert thermique au sein du manteau neigeux est évalué par résolution de l'équation de la chaleur (3.1). Cependant, les équations (3.25) et (3.26) diffèrent quelque peu de celles écrites pour le sol. En effet, les propriétés optiques de la neige ne permettent pas de considérer un albédo constant, celui-ci étant dépendant du type et de l'âge de la neige, ainsi que de la longueur d'onde (Brun et al. 1992, Sergent et al. 1993). Donc, le rayonnement visible n'est pas calculé de la même manière. Il est également nécessaire de tenir compte de l'énergie apportée par les précipitations dans le bilan de surface.

De même, pour les couches internes, le terme source n'est pas associé uniquement aux changements de phases. En effet, à la différence du sol, le rayonnement solaire visible peut pénétrer au sein du manteau neigeux, bien qu'il soit rapidement absorbé après quelques centimètres. Dans un problème de viabilité hivernale (où l'ordre de grandeur du manteau neigeux ne dépasse que rarement les quelques centimètres) le rayonnement solaire visible peut atteindre le sol. Il sera donc nécessaire d'en tenir compte dans le couplage avec un modèle de sol.

Condition limite supérieure

L'équation (3.25) devient :

$$G_0 = R_{sol} + R_{IR} - H - LE + F_{precip} \quad (3.54)$$

où R_{sol} , R_{IR} , H , LE et F_{precip} sont respectivement les flux de rayonnement visible net en surface du manteau neigeux, de rayonnement infrarouge net, de chaleur sensible et de chaleur latente entre la surface du manteau neigeux et l'atmosphère, et le flux de chaleur apporté par les précipitations.

Dans le modèle CROCUS, le flux solaire incident est calculé en divisant le spectre en 3 bandes spectrales : 0.3-0.8 μm, 0.8-1.5 μm et 1.5-2.8 μm (Brun et al. 1992 et Sergent et al. 1993, tableau 3.1).

Bandes spectrales	0.3-0.8 μm	0.8-1.5 μm	1.5-2.8 μm
albédo	$0.96 - 1.58\sqrt{d} - 0.2 \frac{\text{âge}}{60}$	$0.95 - 15.4\sqrt{d}$	$346d - 32.31\sqrt{d} + 0.88$
Coefficient d'extinction	$0.0192\rho \frac{1}{\sqrt{d}}$	$0.1098\rho \frac{1}{\sqrt{d}}$	∞

Tableau 3.1 : Paramétrisation de l'albédo et du coefficient d'extinction de la neige β (cm⁻¹) en fonction du diamètre optique des grains d (m), de l'âge (jours) et de la densité ρ (kg m⁻³) de la neige (d'après Brun et al., 1992 et Sergent et al., 1993)

Donc le flux de rayonnement visible en surface du manteau neigeux vaut :

$$R_{sol} = \sum_{i=1}^3 (1 - \alpha_i) R_{Gi} \quad (3.55)$$

où R_{Gi} est le flux solaire incident, α_i est l'albédo de la bande spectrale considérée.

Le flux infrarouge net en surface du manteau neigeux vaut quant à lui :

$$R_{IR} = R_A - \varepsilon_N \sigma T_N^4 \quad (3.56)$$

où R_A est le flux infrarouge incident, ε_N est l'émissivité de la surface du manteau neigeux et T_N est la température de surface du manteau neigeux.

Les flux turbulents sont calculés de manière analogue à ISBA, à partir de la théorie de Monin-Obukhov, selon la formulation de Deardorff (1968), avec les propriétés de surface du manteau neigeux. La paramétrisation des coefficients d'échange à la surface du manteau neigeux a été proposée par Martin et Lejeune (1998).

Les précipitations liquides sont supposées tomber à la température de l'air. Le flux fourni à la couche de surface par les précipitations F_{precip} vaut :

$$F_{precip} = \frac{m_l C_w (T_a - T_0)}{\Delta t} \quad (3.57)$$

où m_l est la masse d'eau liquide, C_w est la capacité calorifique de l'eau liquide, T_a et T_0 sont respectivement la température de l'air et la température de fusion (0°C) et Δt est le pas de temps.

Equation de la chaleur pour une couche interne j

Le rayonnement solaire pénétrant à l'intérieur du manteau neigeux, l'équation (3.21) devient :

$$\Delta z_j C_{Tj} \frac{\partial T_j}{\partial t} = G_{j-1} - G_j + \Delta z_j \Phi_j + R_{sol,j} \quad (3.58)$$

où $R_{sol,j}$ est le flux de rayonnement visible atteignant la couche j qui vaut :

$$R_{sol,j} = \sum_{i=1}^3 (1 - \alpha_i) R_{Gi} \left(e^{-\left(\sum_{k=j+1}^N \beta_i(k) \cdot \Delta z(k) \right)} \cdot (1 - e^{-\beta_i(j) \cdot \Delta z(j)}) \right) \quad (3.59)$$

où β_i est le coefficient d'extinction de la bande spectrale i considérée et de la couche j considérée, Δz est l'épaisseur de la couche considérée et N est le nombre total de couches de neige.

Le coefficient d'extinction est fonction du diamètre optique des grains, de la densité de la neige et de la longueur d'onde (tableau 3.1).

Dans le calcul des termes de conduction G , la conductivité thermique de la couche de neige considérée est calculée avec la formule empirique de Yen (1981). Cette conductivité est une conductivité effective λ_e tenant compte des échanges de vapeur d'eau à l'intérieur du manteau. Elle est définie par :

$$\lambda_e = \lambda_i \left(\frac{\rho_n}{\rho_w} \right)^{1.88} \quad (3.60)$$

où λ_i est la conductivité thermique de la glace et ρ_n et ρ_w sont respectivement les densités de la neige et de l'eau liquide.

Cette formulation conduit à des conductivités trop faibles pour de la neige à faible densité. Une modification de cette formulation est apportée pour les couches de neige de densités faibles (inférieures à 280 kg m^{-3}).

Condition limite inférieure

Le modèle CROCUS ne gère pas le sol sous-jacent, ainsi le flux de chaleur à la base est imposé. Il vaut quelques W/m^2 , et il dépend de la date, de l'exposition et de l'altitude. Cette approximation se justifie pour l'utilisation de CROCUS pour la prévision du risque d'avalanche (manteaux neigeux pérennes et épais). Dans un problème de viabilité hivernale, la chute de neige se produit sur des chaussées sans neige, dont la température peut atteindre plusieurs degrés. Ainsi, le flux engendré peut atteindre plusieurs centaines de W/m^2 . Le flux de conduction à la base va donc être en grande partie responsable de la tenue ou non de la neige sur la chaussée. C'est donc à partir de ce flux de conduction que sera réalisé le couplage avec le modèle ISBA-Route.

3.2.2.2 Transferts hydriques dans le manteau neigeux

Les forces de capillarité permettent à chaque couche de neige de retenir une certaine quantité d'eau, jusqu'à un maximum appelé valeur de rétention (Colbeck 1973). Cette valeur de rétention dépend du type de neige. Ainsi, la teneur (volumique) de rétention en eau liquide a été fixée dans le modèle à une valeur de 5% du volume des pores de la couche considérée (Denoth et al. 1979, Brun 1989).

Colbeck (1973) propose un calcul dynamique de l'écoulement basé sur les propriétés dynamiques de l'eau (viscosité) et la perméabilité de la couche de neige. Le flux d'eau à la base de la couche est nul tant que la teneur en eau de rétention n'est pas dépassée. Au-delà, le flux d'eau liquide est calculé en fonction de la densité et de la viscosité de l'eau, de l'accélération de la pesanteur et de la perméabilité de la neige. Cette formulation n'a pas été retenue dans CROCUS, car elle est source d'instabilités numériques.

La méthode adoptée dans CROCUS est un système de réservoirs. Chaque couche est caractérisée par sa teneur en eau liquide de rétention. Lorsque celle-ci est atteinte, l'excès se déverse avec une vitesse de percolation infinie dans la couche sous-jacente. Lorsque la valeur de rétention de la couche située à la base du manteau neigeux est dépassée, l'excédent s'écoule alors latéralement à la base du manteau.

Cependant, comme ont montré les travaux de Coléou et Lesaffre (1998) et Coléou et al. (1999), une couche de neige totalement saturée en eau liquide peut se former à la base du manteau neigeux par ascension capillaire. La formation de cette couche saturée en eau liquide n'est pas décrite dans la version initiale de CROCUS. Or, la présence d'eau liquide à l'interface va modifier les propriétés thermiques de l'interface, donc les transferts thermiques.

De plus, pour un problème de viabilité hivernale, où les manteaux neigeux déposés sur une route sont de faible épaisseur, cette couche saturée en eau liquide sera susceptible de geler. Cette éventuelle couche de glace sera source de conditions de circulation routières difficiles et dangereuses, mais également source de difficulté pour le déneigement par les services d'exploitation. La gestion d'une couche de neige totalement saturée en eau liquide a dû être introduite dans le modèle couplé ISBA-Route/CROCUS, et est explicitée en section 3.3.2.

3.2.2.3 Métamorphoses des grains de neige et tassemement mécanique

Le modèle CROCUS permet de simuler la métamorphose des grains de neige, d'après le formalisme introduit par Brun et al. (1992), permettant de décrire tous les types de grains à partir de 3 variables caractéristiques : la dendricité, la sphéricité et la taille, ainsi que d'une variable historique. Ces variables évoluent en fonction de la température, du gradient de température et de la teneur en eau liquide.

Le modèle CROCUS permet également de prendre en compte le tassemement des couches de neige sous l'effet des couches supérieures. L'épaisseur décroît de manière exponentielle au cours du temps, selon la formulation proposée par Navarre (1975).

3.2.2.4 Conclusion

Le modèle CROCUS (Brun et al., 1989, 1992) est un modèle détaillé qui permet de décrire avec précision le manteau neigeux. Il permet de suivre avec précision l'état énergétique et massique du manteau neigeux, ainsi que la stratigraphie du manteau. Si la stratigraphie est essentielle dans la prévision du risque d'avalanche, elle l'est également pour un problème de viabilité hivernale. En effet, la complexité des transferts thermiques et hydriques à l'interface entre la chaussée et la neige nécessite la modélisation du type de grains de neige à l'interface. Pour cette raison, le modèle CROCUS a été envisagé pour le développement d'un modèle couplé permettant de simuler le comportement d'une couche de neige déposée sur une chaussée.

3.3 L'adaptation des modèles ISBA-DF et CROCUS à la problématique des routes

Les modèles ISBA-DF (Boone et al. 2000) et CROCUS (Brun et al., 1989, 1992) sont des modèles détaillés permettant de décrire avec précision les transferts thermiques et hydriques dans un sol ou l'évolution d'un manteau neigeux. Cependant, la route est un sol différent des sols naturels (matériaux denses et imperméables) et le manteau neigeux déposé sur une chaussée diffère d'un manteau neigeux déposé sur un sol naturel (manteau de faible épaisseur, importance du flux de conduction du sol). Ainsi, l'étude d'un manteau neigeux déposé sur une chaussée est un contexte sensiblement différent de ceux pour lesquels les modèles sont utilisés originellement (hydrologie des sols naturels et prévision du risque d'avalanche). C'est pourquoi certaines adaptations de ces modèles ont été nécessaires pour pouvoir envisager leur utilisation dans un contexte de viabilité hivernale. Ces adaptations sont décrites dans cette section.

3.3.1 Adaptation du modèle ISBA-DF : ISBA-Route

Tous les processus dus à la végétation ont été supprimés, ainsi la fraction de végétation a été fixée à une valeur nulle :

$$veg = 0 \quad (3.61)$$

Transferts thermiques du sol

Le modèle ISBA-Route étant une adaptation du modèle ISBA-DF à la problématique des routes, les équations de transferts thermiques (et les conditions limites associées) restent inchangées, seules les propriétés thermiques des différentes couches ont été modifiées. A la différence du modèle initial ISBA-DF, la végétation ainsi que tous ses effets ont été supprimés à la surface du sol, et les propriétés thermiques ne sont plus calculées à partir des caractéristiques du sol, mais affectées directement à chaque couche de sol. Ainsi pour chaque couche de sol, les propriétés suivantes sont affectées :

- ρ_{dry} : masse volumique de la couche sèche (kg m⁻³)
- λ_{dry} : conductivité thermique de la couche sèche (W m⁻¹ K⁻¹)
- w_{sat} : porosité de la couche (m³ m⁻³)

La capacité calorifique sèche C_s (J kg⁻¹ K⁻¹) est considérée comme constante pour tous les types de sol (routes ou sol naturel), et vaut 836 J kg⁻¹ K⁻¹. Cette valeur est une valeur moyenne issue des recherches menées au LCPC et elle est utilisée dans les modèles de sol du LCPC, tel que GEL1D (Frémont et al 1979). De plus, l'inertie due à la végétation a été supprimée, ainsi pour la couche de surface, la capacité calorifique s'exprime à partir de la même expression que pour les autres nœuds (équation 3.6).

Ainsi, grâce à ces propriétés affectées à chaque couche, le modèle calcule les différentes propriétés thermiques, en fonction de la teneur en eau liquide et en glace des différentes couches, d'après les formulations de Peters-Lidard et al. (1998) .

Cependant, il est important de noter que le modèle ISBA-Route ne différencie pas la conductivité thermique sèche λ_{dry} de la conductivité thermique des particules solides λ_{soil} , ainsi le calcul de la conductivité thermique saturée λ_{sat} devient :

$$\lambda_{sat} = \lambda_{dry}^{(1-w_{sat})} \lambda_i^{w_{sat}(1-w_l/w)} \lambda_w^{w_{sat}(w_l/w)} \quad (3.62)$$

Transferts hydriques dans le sol

A la différence d'un sol naturel, les routes sont quasiment imperméables au-dessous du revêtement de surface. Ainsi, à partir de l'épaisseur correspondant au revêtement de surface, les

transferts hydriques ont été supprimés. L'épaisseur permettant les transferts hydriques dépend donc du type de revêtement. En dessous du revêtement de surface, les transferts hydriques sont négligés au sein des différents matériaux constituant la route et au sein du sol naturel. La teneur en eau est considérée comme constante dans ces couches, donc seuls les changements de phases interviennent.

Pour la modélisation, deux types de revêtements sont à distinguer, les revêtements non drainants et les revêtements drainants. Pour les revêtements non drainants, la porosité est fermée, ainsi seuls les transferts hydriques verticaux sont possibles, sur une hauteur correspondante à la hauteur de rugosité du revêtement, et le terme puit de l'eau est du uniquement à l'évaporation de l'eau liquide ou à la sublimation de la glace. Par contre, pour les revêtements drainants, la porosité est ouverte, permettant le drainage latéral de l'eau liquide à la base du revêtement. Cette surface est appelée base de ruissellement et elle permet d'évacuer l'eau liquide contenue dans le revêtement vers l'extérieur grâce à la pente. Les transferts hydriques pour les 2 types de revêtements sont représentés sur la figure 3.5.

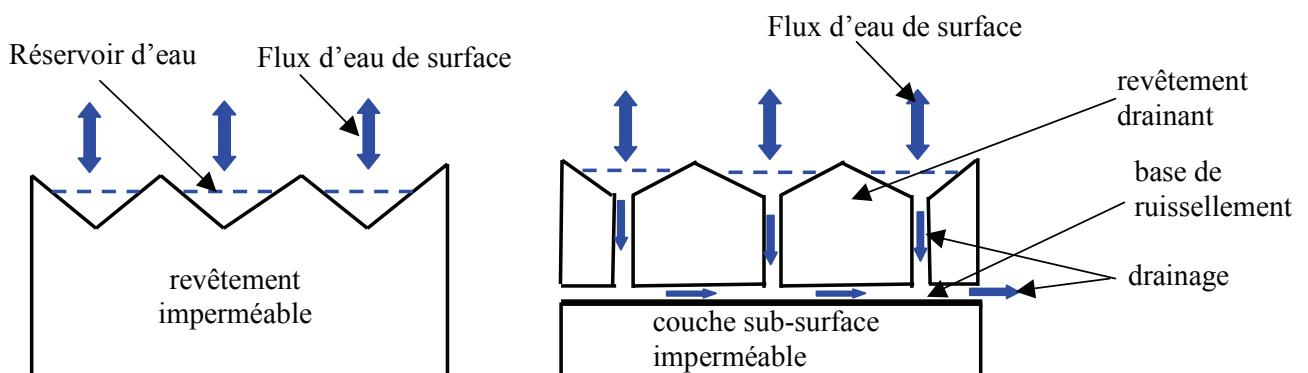


Figure 3.5 : Représentation des transferts hydriques en surface d'un revêtement non drainant et dans un revêtement drainant.

Afin de prendre en compte les propriétés hydriques spécifiques des routes, la condition limite inférieure des équations de transferts hydriques a été modifiée.

Ainsi tous les transferts d'eau liquide sont supprimés entre le dernier nœud compris dans les aspérités du revêtement de surface et les nœuds situés au-dessous. On donne l'indice k à ce dernier nœud. De la même manière, on néglige les transferts hydriques entre les couches situées au-dessous du revêtement de surface.

La condition limite inférieure est donc appliquée pour le nœud k et on peut donc écrire :

$$F_j = 0 \text{ si } j \geq k \quad (3.63)$$

Pour un revêtement non drainant, les transferts latéraux d'eau liquide n'existent pas, ainsi le terme S_l de l'équation 3.2 est nul pour toutes les couches.

Par contre, pour un revêtement drainant, l'écoulement latéral sur la surface de ruissellement est un terme puit latéral d'eau liquide.

Ainsi la condition limite inférieure s'écrit pour un revêtement drainant :

$$F_j = 0 \text{ si } j \geq k \quad (3.64)$$

et

$$S_{l,k} = -\frac{(2b_k+3)k_k}{w_k} \quad (3.65)$$

La condition (3.65) représente une condition de drainage libre, c'est à dire qu'on néglige les effets du gradient de potentiel. La condition utilisée ici est celle utilisée par Boone (2000) pour le drainage libre vertical, elle résulte de la linéarisation de la conductivité hydraulique pour la condition limite (équation 3.45).

Comme pour les propriétés thermiques du sol, les propriétés hydriques k_{sat} , b et ψ_{sat} sont affectées aux nœuds, et non plus calculées en fonction du type de sol. Les transferts hydriques ayant lieu uniquement au sein du revêtement de surface, celui-ci est considéré comme étant homogène. Ainsi les propriétés affectées sont identiques pour tous les nœuds de calcul. De la même manière, pour un revêtement drainant, les propriétés hydriques pour le flux latéral sur la surface de ruissellement sont les mêmes que pour les flux verticaux. Une paramétrisation des propriétés hydriques est proposée en section 4.4.2.

Présence de neige en surface

Une modification a été apportée par rapport au couplage initial d'ISBA-DF avec les schémas de neige, où la surface du sol est considérée inhomogène : présence de différents types de végétation, topographie complexe. Ainsi, afin de prendre en compte les effets sous-maille, la

couverture neigeuse est inhomogène et non totale. La partie de maille enneigée est représentée par le coefficient p_n (section 3.2.1.6).

Le modèle ISBA-Route étant un modèle où il n'y a plus de végétation et où la surface est plate et homogène, on considère que toute la maille est enneigée, c'est pourquoi le coefficient p_n est forcé à 1.

Ainsi, dans le modèle ISBA-Route, la température de surface T_s représente la température de surface de la route et non plus du continuum sol-végétation.

A contrario, dans ISBA-Route, on va tenir compte du fait que la neige peut fondre au cours du pas de temps, à cause des importants flux de conduction chaussée/neige au moment de la chute. Pour cette raison le coefficient temporel p_t a été introduit.

En présence de neige, l'équation du bilan énergétique de surface est la suivante :

$$c_T \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1-p_t)[R_N - H - LE] + p_t[F_{cond} + F_{adv} + F_{sol}] - G_1 \quad (3.66)$$

où :

c_T est la capacité calorifique de la couche de surface de la chaussée

T_s est la température de surface

p_t représente la proportion temporelle de présence de neige au cours du pas de temps

R_N est le rayonnement net sur la chaussée

H et LE sont respectivement les flux de chaleur sensible et latente sur la chaussée

G_1 est le flux de conduction vers la couche inférieure

F_{cond} est le flux de conduction sol/neige

F_{adv} est le flux d'advection dû à l'écoulement sur la chaussée de l'eau provenant du manteau neigeux

F_{sol} est le flux solaire traversant le manteau neigeux.

3.3.2 Les modifications apportées au modèle CROCUS

3.3.2.1 Problèmes numériques

La modélisation de la tenue de la neige sur une route diffère d'un problème d'hydrologie ou de prévision de risque d'avalanche. En effet, sur les routes, on s'intéresse à des manteaux neigeux

de faibles épaisseurs et à des chutes de neige se produisant sur une chaussée sans neige, dont la température peut atteindre plusieurs degrés. Contrairement à l'utilisation originelle de CROCUS, le flux de conduction à la base du manteau neigeux est en grande partie responsable de la tenue ou non de la neige sur la chaussée. Ainsi les valeurs de flux atteintes sont largement supérieures aux valeurs faibles utilisées dans CROCUS (quelques W/m²). Pour une chute de neige sur une chaussée, le flux de conduction à la base du manteau neigeux est extrêmement variable et peut atteindre plusieurs centaines de W/m².

Les propriétés des matériaux sont très différents de part et d'autre de la surface. Sous la surface, les matériaux constituant la chaussée (béton, ciment...) sont des matériaux denses et dont les propriétés physiques et thermiques (densité, conductivité et capacité calorifique) ont une plage de variation très faible (selon la porosité et la teneur en eau/glace). Par contre, en surface, on se trouve en présence du matériau neige, qui est très différent des matériaux constituant la chaussée. Il s'agit d'un matériau poreux, qui est un mélange de trois constituants : glace, air et parfois eau liquide. La quantité de chacun des constituants est très variable, et la variation peut être très rapide, selon les conditions météorologiques. Les propriétés physiques et thermiques (densité, conductivité et capacité calorifique) de la neige étant fonction de sa constitution, ils ont donc également une plage de variation très grande. Par exemple, la densité de la neige peut varier d'environ 115 kg/m³ pour une neige fraîche très froide à 917 kg/m³ pour une neige saturée en eau totalement regelée. La capacité calorifique et la conductivité étant fonction de la densité, on s'aperçoit ainsi que la neige peut avoir des propriétés thermiques très différentes, variant sur plus d'un ordre de grandeur. Par exemple, une neige de faible densité sera isolante alors qu'une neige dense ou humide sera beaucoup plus conductrice de la chaleur. Ces variations sont donc sources d'instabilités pour le calcul du flux de conduction entre la chaussée et la neige, essentiellement au cours du choc thermique lorsque la neige se dépose sur la chaussée.

Ces instabilités sont accentuées par la discrétisation évolutive du modèle. En effet, chaque couche est soumise à des modifications de densité, du tassemement, de la fonte, entraînant une variation d'épaisseur à chaque pas de temps. Par conséquent, afin d'éviter des couches d'épaisseur infinitésimales ou trop grandes, les différentes couches de neige s'agrègent entre elles ou se dédoublent. Pour cette raison, le nœud de la couche de neige situé au sol ne se trouve pas, d'un pas de temps à l'autre, à la même distance du nœud de surface de chaussée entraînant des instabilités numériques pour le calcul du flux de conduction. Dans le cas d'une

neige sèche, dont la température est négative, l'instabilité n'existe que sur quelques pas de temps. En effet, la variation trop rapide d'épaisseur sur un pas de temps peut engendrer une variation très rapide de la résistance thermique équivalente et de la température de la couche de neige. Dans ce cas, l'instabilité va être amortie sur quelques pas de temps. Il est important de noter que cette instabilité est purement numérique, car la variation de résistance thermique est proportionnelle à la variation du gradient de température du nœud de la couche de neige. Donc dans le cas de l'agrégation ou du dédoublement d'une couche de neige sèche, le flux de conduction ne sera pas calculé au même endroit, mais du point de vue énergétique il sera équivalent. Par contre, le cas de la neige humide est différent. En effet, une couche de neige humide est isotherme à 0°C. Donc la variation d'épaisseur de la couche de neige au sol engendrera une variation de la résistance thermique équivalente, alors que la température de la couche de neige située au sol sera toujours de 0°C. Ainsi, le flux de conduction calculé sera différent du point de vue énergétique. Donc, dans ce cas, l'instabilité n'est pas uniquement numérique, elle est également physique. Pour s'affranchir de ce problème, le traitement de la couche de neige au sol a été modifié lors de la réorganisation du profil dans CROCUS (effectué à la fin du pas de temps). Les critères d'agrégation où de dédoublement de la couche de sol ont été modifiés de manière à garder une épaisseur constante (égale à 2,5 mm) pour la couche de neige située en surface du revêtement.

3.3.2.2 Modification des phénomènes physiques

Les précipitations neigeuses

Les données atmosphériques d'entrée du modèle étant disponibles à un pas de temps horaire, il se pose le problème de la répartition des précipitations sur le pas de temps, fixé dans cette étude à 5 minutes. Afin d'être le plus représentatif possible de la réalité et représenter avec autant de réalisme possible une chute de neige continue, la précipitation horaire est répartie équitablement sur tous les pas de temps de l'heure, tout en évitant les précipitations insignifiantes, qui sont sources de problèmes numériques. La limite fixée est une hauteur de neige minimale de 1mm. Si la répartition par pas de temps est supérieure à cette valeur, la précipitation horaire est répartie équitablement sur chaque pas de temps. Dans le cas contraire, la précipitation par pas de temps sera cumulée, et au pas de temps où l'on dépasse 1mm, une précipitation correspondant à 1mm de neige (environ 0.1mm de hauteur d'eau) est apportée au modèle. L'excès est ajouté à la précipitation du pas de temps suivant. On a ainsi une précipitation répartie équitablement dans l'heure, indépendamment du pas de temps.

Saturation en eau liquide du manteau neigeux

Suivant les travaux de Coléou et Lesaffre 1998, et de Coléou et al. 1999 menés sur la formation d'une couche de neige saturée en eau liquide à la base du manteau neigeux et considérant l'importance de cette couche saturée dans un problème de viabilité hivernale, la formation d'une couche saturée en eau liquide a été introduite dans le modèle CROCUS. La formation d'une couche saturée en eau liquide est possible lorsque la valeur de rétention de la couche de neige au sol est dépassée, donc soit lorsqu'une fonte est provoquée à la base par l'énergie restituée par la route, ou lorsque l'eau liquide provenant de la surface (pluie ou fonte causée par les flux superficiels) est parvenue à percoler jusqu'à la base du manteau neigeux. Ainsi, le contenu du réservoir d'eau liquide susceptible de former une couche saturée en eau liquide est la quantité d'eau liquide parvenant à la base du manteau neigeux après la percolation.

Ainsi, pour chaque couche de neige i , à partir de la couche de neige située à la base, on calculera :

- le volume des pores $V_{pores(i)}$:

$$V_{pores(i)} = \left[\Delta z(i) - \left(\rho_s(i) / \rho_g \right) \cdot \Delta z(i) - \left(W(i) / \rho_e \right) \right] \cdot \sigma \quad (3.67)$$

où $\Delta z(i)$ est l'épaisseur de la couche considérée, $\rho_s(i)$ est la densité sèche de la couche considérée, ρ_g et ρ_e sont les densités respectivement de la glace et de l'eau, $W(i)$ est la masse d'eau liquide présente initialement dans la couche considérée et σ est une surface unitaire.

- la hauteur maximale de saturation h_{max} (exprimée en m)

$$h_{max} = C \cdot \frac{1 - P(i)}{P(i)} \cdot \frac{1}{r_m(i)} \quad (3.68)$$

où $P(i)$ est la porosité de la couche considérée, $r_m(i)$ est le rayon convexe moyen (exprimé en m) de la couche considérée, et C est un coefficient qui vaut 10^{-5} m^2 .

Cette formulation dépend du type de grains de neige de la couche considérée, d'après la formule empirique établie par Coléou et Lesaffre 1998 et Coléou et al. 1999, et complétée lors du projet Gelcro (Borel 2000) par une dépendance au type de revêtement (section 3.4.3.2). Ensuite, l'air de la couche est remplacé par de l'eau liquide, jusqu'à épuisement du réservoir

disponible ou dépassement de la hauteur maximale de saturation. En cas de dépassement de la hauteur maximale de saturation, l'excédent s'écoule alors latéralement à la base du manteau neigeux.

3.4 Le modèle couplé ISBA-Route/CROCUS

La simulation du comportement d'une couche de neige déposée sur une chaussée nécessite de connaître l'évolution simultanée du système chaussée/neige. Ainsi, un modèle a été développé à partir du couplage des adaptations à la problématique de la route des modèles ISBA et CROCUS décrites dans la section 3.2. Le principe de couplage est décrit dans ce paragraphe.

3.4.1 Principe

Une simulation précise de l'état de surface de la route passe par une description précise de l'interface chaussée/neige, et donc des transferts thermiques et hydriques associés. Concernant les transferts hydriques, il a été nécessaire de paramétriser les remontées capillaires du réservoir de surface de la chaussée vers le manteau neigeux. En effet, même si la quantité d'eau liquide en surface de la chaussée est faible, la remontée d'eau liquide de la surface de la chaussée dans une couche de neige sèche va modifier l'interface et donc les transferts thermiques.

Le modèle développé résulte du couplage des modèles CROCUS et ISBA-Route. Le couplage a été effectué de manière à modifier le moins possible les modèles ISBA-Route et CROCUS. Ainsi, le modèle CROCUS est appelé par le modèle ISBA-Route en place des modèles de neige inclus initialement dans ISBA (Douville et al. 1995, Boone et Etchevers 2001). Afin d'être homogène au modèle ISBA-Route, la précipitation neigeuse est ajoutée dans CROCUS à la fin du pas de temps.

Le couplage d'ISBA-Route et de CROCUS est développé à but opérationnel pour la modélisation de l'état de surface des routes en condition hivernale, ainsi le pas de temps utilisé doit être raisonnable pour ne pas entraîner un coût de calcul trop élevé. Le modèle ISBA est utilisé opérationnellement en hydrologie, ainsi il a été décidé d'adopter le même pas de temps (5 minutes) pour le modèle couplé, ce qui est un bon compromis entre l'optimisation du temps de calcul et de la stabilité numérique. Tous les problèmes numériques ont été traités avec ce pas de temps.

La figure 3.6 représente un schéma du modèle couplé.

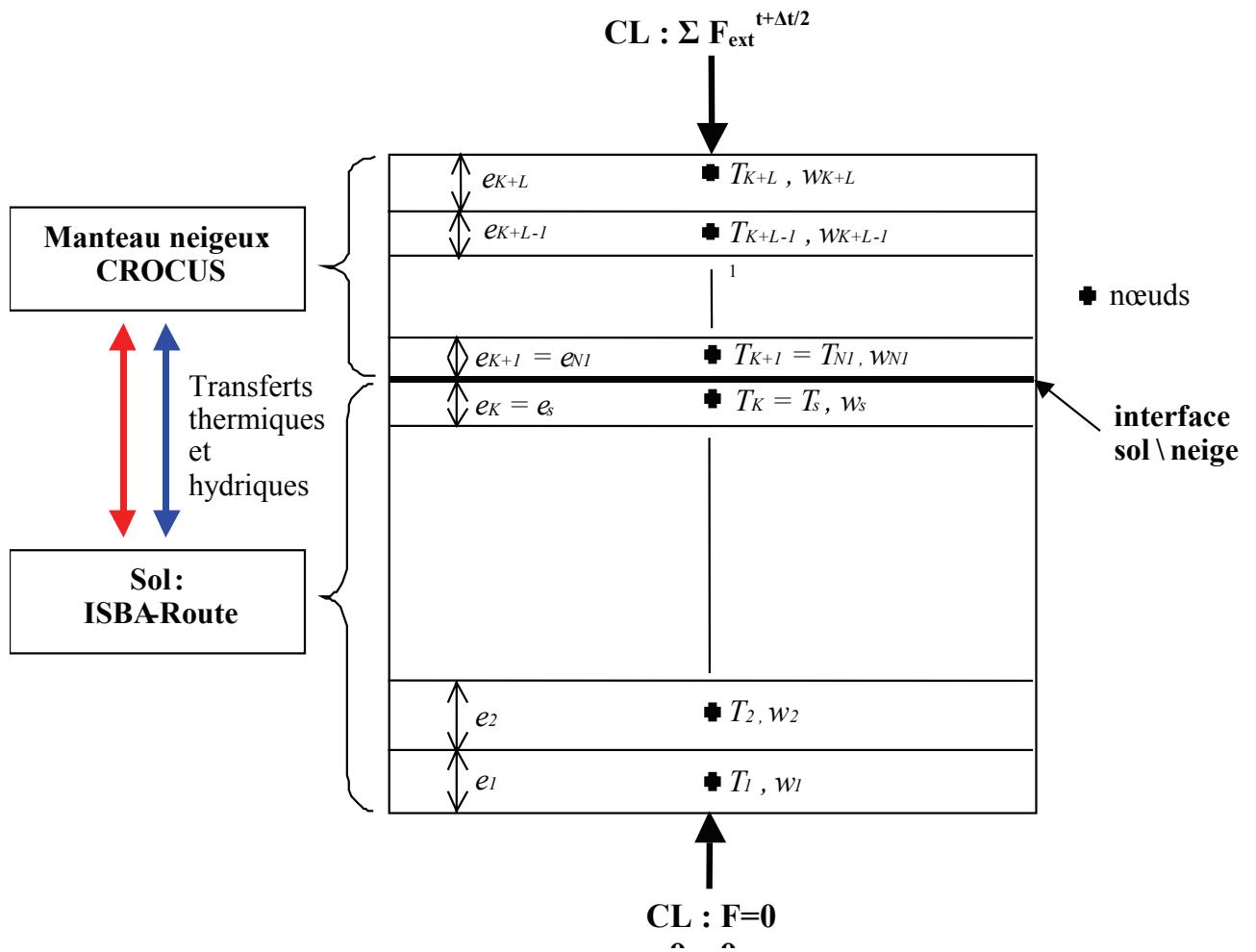


Figure 3.6 : Schéma du modèle couplé ISBA-Route/CROCUS, où e représente l'épaisseur de la couche considérée, T et w représentent respectivement la température et la teneur en eau de la couche considérée

3.4.2 Transferts thermiques entre la route et le manteau neigeux

En présence de neige, le bilan de surface du modèle ISBA-Route (équation 3.66) nécessite le calcul du flux de chaleur dû à l'écoulement d'eau liquide à la base du manteau neigeux, du flux solaire (visible) parvenant à la base du manteau neigeux, et du flux de conduction neige/chaussée.

3.4.2.1- Flux d'écoulement

Le flux thermique dû à l'écoulement à la base du manteau neigeux est calculé au sein d'ISBA-Route de la manière suivante :

$$F_{adv} = c_w \cdot t_{ec} \cdot (T_{N1} - T_S) \quad (3.69)$$

où c_w est la capacité calorifique de l'eau liquide, t_{ec} est le taux d'écoulement d'eau à la base du manteau neigeux, fourni par CROCUS, T_{N1} est la température du nœud de la couche de neige située sur la chaussée.

3.4.2.2 Flux solaire

Ce flux représente le flux solaire qui traverse le manteau neigeux. Le rayonnement solaire peut pénétrer le manteau neigeux sur quelques centimètres. Or, dans un problème de viabilité hivernale, on s'intéresse dans la plupart des cas à des manteaux neigeux de faible épaisseur, car la chaussée sera rapidement déneigée. Donc ce flux ne peut pas être négligé comme il l'est pour des problèmes d'hydrologie, où l'on se trouve en présence de manteaux neigeux épais.

Le flux solaire atteignant la surface de la chaussée est intégré dans le terme du flux de conduction entre la chaussée et la route (section 3.4.4.1).

3.4.2.3 – Flux de conduction

Le flux de conduction est calculé de manière semi-implicite à $t+\Delta t/2$ au sein du couplage, et il va servir de condition limite aux deux modèles : ISBA-Route et CROCUS.

$F_{cond\ ch/n}$ est le flux de conduction de la chaussée vers la neige, et $F_{cond\ n/ch}$ est le flux de conduction de la neige vers la chaussée. Ces deux flux ont la même norme et un signe opposé. Dans le couplage, il sont calculés d'après les formules suivantes :

$$F_{cond\ ch/n} = \frac{T_s^{t+\Delta t/2} - T_{N1}^{t+\Delta t/2}}{R_{th}^{t+\Delta t/2}} \quad (3.70)$$

$$F_{cond\ n/ch} = \frac{T_{N1}^{t+\Delta t/2} - T_s^{t+\Delta t/2}}{R_{th}^{t+\Delta t/2}} \quad (3.71)$$

où T_{NI} est la température du nœud de la couche de neige située sur la chaussée, T_s est la température du nœud de la couche de chaussée en surface, R_{th} est la résistance thermique équivalente entre les 2 nœuds.

3.4.2.4 Résistance thermique à l'interface

L'interface représente la partie où l'on ne peut pas distinguer la chaussée et la neige, c'est à dire la partie où de la neige se trouve dans les macro-rugosités de la chaussée (figure 2.16). Une résistance thermique équivalente entre le nœud de calcul de la couche de surface de chaussée et le nœud de calcul de la couche de neige au sol a été définie. Cette résistance thermique équivalente prend en compte les propriétés physiques de l'interface route/neige, établies lors de l'expérimentation du projet Gelcro. Pour cela, la classification de l'interface établie lors des expériences menées dans le cadre de ce projet a été utilisée (tableau 2.6).

La résistance thermique équivalente R_{th} est fonction de :

- la résistance thermique de la couche de chaussée (entre le nœud et la surface) : \mathbf{Rs}

$$Rs = e_s / (2 \cdot \lambda_s) \quad (3.72)$$

- la résistance thermique de la couche de neige (entre le nœud et la surface) : \mathbf{R}_{NI}

$$R_{NI} = e_{NI} / (2 \cdot \lambda_{NI}) \quad (3.73)$$

- la résistance thermique d'interface : \mathbf{Rint}

où λ_s et λ_{NI} sont respectivement les conductivités thermiques de la couche de surface de la chaussée et de la couche de neige au sol et où e_s et e_{NI} sont respectivement l'épaisseur de la couche de surface de chaussée et de la couche de neige au sol.

La résistance thermique d'interface R_{int} est une résistance sans épaisseur introduite dans la résistance R_{th} afin de prendre en compte la configuration de l'interface. Elle permet de prendre en compte la limitation des échanges thermiques dus à la configuration physique de l'interface. Elle est dépendante du type de revêtement et du type de neige. Cependant, cette résistance est due à la présence d'une grande quantité d'air dans le continuum des pores de la chaussée et de la neige à l'interface, donc elle n'existe que dans le cas d'une neige sèche sur une chaussée sèche. En effet, en présence d'eau liquide, les forces de capillarités assurent un contact parfait entre les grains de neige et le revêtement.

Ainsi, la résistance thermique équivalente, qui permet de prendre en compte les propriétés physiques des différentes configurations de l'interface route/neige établies par Borel(2000), sont définies en fonction de l'état de la couche de surface de la route et de l'état de la couche de neige au sol. Ainsi pour définir l'état de l'interface, on adopte les définitions suivantes :

- Neige humide : $T_{NI} = 0^\circ\text{C}$ et $W_{NI} > 0$
- Neige sèche : $T_{NI} < 0^\circ\text{C}$ et $W_{NI} = 0$
- Chaussée sèche : $W_s \leq W_{ret}$
- Chaussée humide : $W_s > W_{ret}$

où T_{NI} et W_{NI} sont respectivement la température et la teneur en eau liquide de la couche de neige au sol, et W_s et W_{ret} sont respectivement la teneur massique en eau liquide et la teneur massique en eau de rétention de la couche de chaussée de surface (voir section 3.4.3).

A partir des définitions précédentes, on peut définir la résistance thermique équivalente, selon la configuration de l'interface :

Cas d'une neige humide

On se trouve dans le cas d'une présence continue d'eau liquide dans la couche de neige, d'où une couche isotherme à 0°C . Ainsi la conductivité thermique est infinie au sein de la couche de neige. De même, la présence d'eau liquide à l'interface assurant un contact parfait (par capillarité) entre la chaussée et la neige, la résistance thermique d'interface est nulle. Ainsi, la résistance thermique totale vaut :

$$Rth = Rs \quad (3.74)$$

Cas d'une neige humide regelée par le bas

Dans ce cas, la présence de glace au bas de la couche de neige supprime l'isothermie de la couche. Ainsi la résistance thermique totale vaut :

$$Rth = Rs + R_{NI} \quad (3.75)$$

La couche de neige au sol étant définie par un unique nœud de calcul, la présence d'eau liquide entraîne une température du nœud à 0°C . Il est ainsi impossible de distinguer une couche de neige humide d'une couche de neige humide regelée par le bas. Pour remédier à ce problème et distinguer ces 2 cas, une variable historique de l'interface a été introduite.

Cas d'une neige sèche sur une chaussée sèche

La présence d'air dans les rugosités de la chaussée va limiter fortement les échanges thermiques à l'interface, donc dans ce cas il existe une résistance thermique d'interface, qui est dépendante du revêtement. La résistance thermique totale vaut :

$$Rth = Rs + R_{NI} + Rint \quad (3.76)$$

La résistance thermique d'interface est dépendante du type de revêtement (Borel 2000). Pour cela il est nécessaire de distinguer deux types de revêtements :

- les revêtements non drainants ou à porosité fermée (béton bitumineux semi-grenus, enduit superficiel, béton bitumineux très mince), qui sont imperméables.
- les revêtements drainants ou à porosité ouverte permettant l'évacuation à la base du revêtement de l'eau liquide infiltrée dans les pores.

Les modèles ISBA-Route et CROCUS étant unidimensionnels et distincts, il est impossible d'avoir un nœud de calcul constitué de chaussée et de neige. C'est pourquoi l'interface chaussée\neige a été divisée en 2 parties : l'une dans la chaussée et l'autre dans la neige, chacune ayant ses caractéristiques spécifiques (figure 3.7).

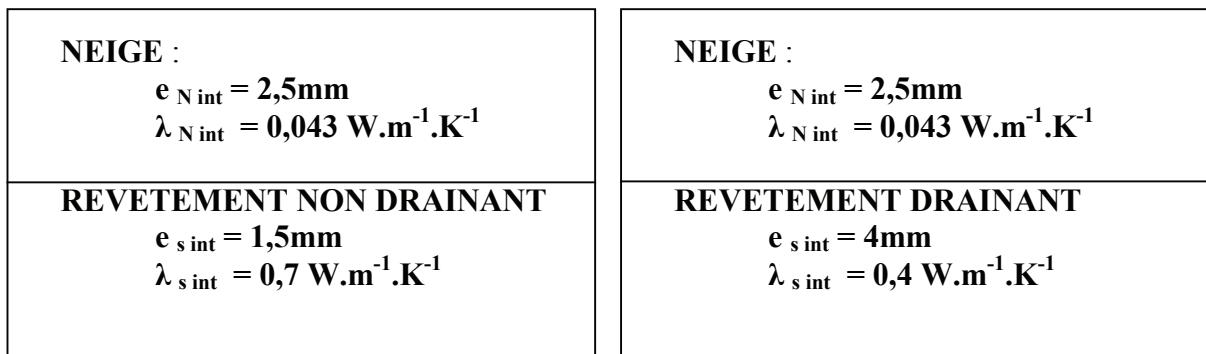


Figure 3.7 : schéma de l'interface route/neige

Ainsi, le calcul de la résistance thermique d'interface se définit de la manière suivante :

$$Rint = \frac{e_{N \text{ int}}}{\lambda_{N \text{ int}}} + \frac{e_{s \text{ int}}}{\lambda_{s \text{ int}}} - R_{S \text{ eq}} - R_{N \text{ eq}} \quad (3.77)$$

où :

- $R_{S\ eq}$ et $R_{N\ eq}$ représentent les résistances thermiques dans la neige et dans la chaussée correspondantes aux épaisseurs dont a été définie l'interface.
- $e_{N\ int}$ et $\lambda_{N\ int}$ sont l'épaisseur et la conductivité de l'interface dans la partie neige
- $e_{s\ int}$ et $\lambda_{s\ int}$ sont l'épaisseur et la conductivité de l'interface dans la partie chaussée

Cas d'une neige sèche, résultant d'un regel, sur une chaussée sèche

La présence antérieure d'eau liquide a supprimé l'effet de la résistance thermique d'interface. En effet, on ne retrouve pas dans ce cas de figure la zone à forte présence d'air limitant les échanges thermiques. Cet état est défini grâce à l'introduction de la variable historique de l'interface. Ainsi la résistance totale vaut :

$$Rth = R_s + R_{NI} \quad (3.78)$$

Cas d'une neige sèche sur une chaussée humide

Cette configuration est impossible. En effet, les remontées capillaires (voir section 3.4.4.3) ont été introduites dans le couplage. On se retrouve ainsi dans un cas de neige humide (regelée ou non).

Les différents cas de configuration de l'interface sont récapitulés dans le tableau 3.2.

		Etat de la neige			
		sèche	humide	sèche(résultante d'un regel total de neige humide)	humide (regelée par le bas)
Etat de la route	sèche	$R_s + R_{NI} + R_{int}$	R_s	$R_s + R_{NI}$	$R_s + R_{NI}$
	humide	(impossible)	R_s	$R_s + R_{NI}$	$R_s + R_{NI}$

Tableau 3.2 : Résistance thermique équivalente, Rth , à l'interface route/neige, dans le modèle Gelcro. R_s représente la résistance thermique de la couche de surface de la route (entre le noeud et la surface de la route), R_{NI} est la résistance thermique de la couche de neige au sol (entre le noeud et la surface de la route) et R_{int} est la résistance thermique de l'interface.

3.4.3 Transferts hydriques entre la route et le manteau neigeux

Comme il a été expliqué en section 3.4.2.4, la configuration de l'interface dépend essentiellement de la présence ou non d'eau liquide dans la neige à l'interface. C'est pourquoi la prise en compte des transferts hydriques à l'interface est essentielle pour modéliser avec précision les transferts thermiques. Les forces de capillarité (c'est à dire les phénomènes induits par la tension superficielle) sont responsables de la rétention d'eau liquide au sein du manteau neigeux et de la formation d'une couche de neige saturée en eau liquide à la base du manteau neigeux. De la même manière, ces forces de capillarité sont responsables de l'ascension au sein du manteau neigeux d'une partie de l'eau liquide présente en surface du revêtement. On distingue ici la rétention dans le revêtement de surface de la chaussée (donc dans le modèle ISBA-Route) et l'ascension capillaire qui va permettre la formation d'une couche de neige saturée en eau liquide dans le manteau neigeux (donc dans le modèle CROCUS).

3.4.3.1 Conditions pour les remontées capillaires

La présence de neige au sein des macro-rugosités de surface va permettre à de l'eau liquide présente à l'interface route/neige de remonter au sein du manteau neigeux par capillarité. La forme et l'échelle des macro-rugosités de surface est dépendante du type de matériau, mais également de sa mise en œuvre. Ainsi, la forme des macro-rugosités de surface est extrêmement variable entre les différents revêtements, mais également au sein du même revêtement. Une des conséquences de cette variabilité est l'impossibilité, à partir des images obtenues par tomographie au rayon X (Borel et Brzoska 2000), de séparer à l'interface la "couche de surface de la route" et la "couche de neige au sol" (figure 2.16). De plus, les phénomènes de capillarité appartiennent au domaine de la microphysique et ainsi se produisent à une échelle très inférieure à celle du modèle. Les forces de capillarité dépendent de l'arrangement tri-dimensionnel des grains de neige dans les macro-rugosités du revêtement et sont très difficilement intégrables dans un modèle unidimensionnel. C'est pourquoi, dans le modèle, il a été adopté une paramétrisation très simple de la rétention en surface de la chaussée.

Le volume de rétention en surface de la chaussée est défini par :

$$V_{ret} = C_{ret} \times (V_{pores} - V_{gla s}) \quad (3.79)$$

où $V_{pore,s}$ est le volume des pores de la couche de surface de la chaussée, $V_{gla,s}$ est le volume de glace présent dans les pores de la couche de surface de la chaussée et C_{ret} est un coefficient adimensionnel caractérisant la rétention et dépendant du type de revêtement.

Revêtement non drainant

Pour un revêtement non drainant, le coefficient C_{ret} a été fixé à une valeur de 0.2. Ce coefficient est une estimation arbitraire, du fait de la forte dépendance à la géométrie des rugosités, de la rétention en surface de la chaussée. De plus, le modèle est peu sensible à la quantité d'eau liquide qui remonte par capillarité dans la neige. La sensibilité du modèle aux remontées capillaires existe uniquement dans un cas de chute de neige sèche sur une chaussée humide. En effet, la remontée d'eau liquide dans la couche de neige par capillarité va modifier l'interface, et l'on va ainsi se retrouver dans un cas de calcul de résistance équivalente avec une neige humide, indépendamment de la quantité d'eau liquide présente dans la couche de neige. De la même manière, en cas de regel postérieur par le bas, la quantité d'eau liquide qui remonte n'a également pas d'influence, car la résistance thermique équivalente est identique en cas de regel total ou partiel. La seule sensibilité réside dans le cas d'un regel total par le haut, qui se produira d'autant plus rapidement que la teneur en eau liquide à l'interface sera faible. Cependant, dans le cadre du projet Gelcro, on s'intéresse principalement à la tenue ou non de la neige sur la route, donc essentiellement à l'état initial. Un test de sensibilité à ce coefficient de rétention a été effectué en section 4.2.4.5.

Revêtement drainant

Le coefficient de rétention des revêtements drainants est moins élevé car ils sont beaucoup plus poreux (15 à 25 %, Bäckstrom et al. 2000, Isenring et al. 1990) que les revêtements à porosité fermée (6%). En première approximation, le coefficient C_{ret} a été fixé à une valeur de 0.05, de manière à avoir approximativement la même quantité d'eau qui reste en surface par rétention, pour tous les types de revêtements. Cependant, concernant les enrobés à porosité ouverte, le modèle est sensible au paramètre C_{ret} , à cause de l'écoulement vertical dans le revêtement et de la porosité. C'est pourquoi le coefficient de rétention doit respecter les propriétés hydriques (porosité W_{sat} , conductivité hydraulique à saturation k_{sat} , coefficient de rétention b affectées au revêtement). Une paramétrisation des propriétés hydriques, de même qu'une étude de la sensibilité du modèle à ces propriétés a été effectuée en section 4.4.2.

3.4.3.2 Couche saturée en eau liquide selon le type de revêtement

Les travaux expérimentaux du projet Gelcro ont permis de compléter les travaux de Coléou et Lesaffre 1998, et de Coléou et al. 1999, en étudiant l'influence du type de revêtement de surface de la chaussée sur la hauteur maximale de saturation. Ainsi, Borel (2000) a proposé une paramétrisation de la hauteur maximale de saturation dépendante du type de revêtement. Pour l'utilisation de CROCUS avec le modèle ISBA-Route, le coefficient C de l'équation (3.68) est modifié selon le type de revêtement. Il prend la valeur suivante :

- $0.643 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ pour un revêtement drainant
- $1.09 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ pour un revêtement non drainant
- 10^{-5} m^2 dans le cas particulier de présence de glace en surface du revêtement (on se retrouve dans ce cas avec l'équation initiale, sans dépendance au type de revêtement).

De plus, la présence d'eau liquide en surface du revêtement va également modifier le réservoir d'eau liquide disponible pour la saturation du manteau neigeux.

En absence d'eau liquide percolant à la base du manteau neigeux, les remontées capillaires de l'eau liquide présente en surface de la chaussée peuvent être responsables de la formation d'une couche saturée. Cependant, cette quantité d'eau liquide est faible et ne permet que la formation d'une couche saturée en eau liquide de très faible épaisseur (de l'ordre du millimètre).

En cas de chaussée sèche (c'est à dire si la teneur en eau à la surface du revêtement est inférieure à la valeur de rétention) et d'eau liquide disponible à la base du manteau, la surface de la chaussée va s'humidifier jusqu'à la teneur de rétention et ensuite le reste du réservoir disponible va pouvoir saturer la base du manteau neigeux. Ce cas est extrêmement rare et permet de supprimer les problèmes numériques dus à une teneur en eau infinitésimale en surface de la chaussée.

Dans le cas général, le réservoir d'eau liquide susceptible de former une couche saturée en eau liquide est l'eau liquide en excès (par rapport à la rétention) en surface de la chaussée auquel s'ajoute l'eau liquide parvenant à la base du manteau neigeux après la percolation. En cas de dépassement de la hauteur maximale de saturation, l'excédent s'écoule en surface de la chaussée. Après saturation de la chaussée, l'excédent ruisselle alors latéralement (figure 3.8).

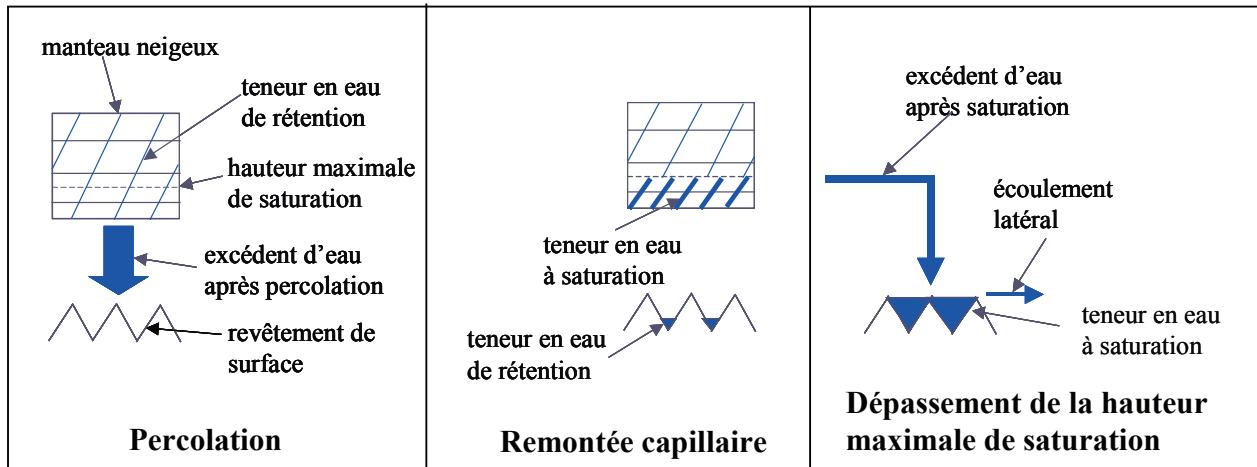


Figure 3.8 : schéma de la formation d'une couche saturée en eau liquide dans le modèle couplé ISBA-Route/CROCUS

3.4.4 Résolution numérique

3.4.4.1 Principe de couplage

Dans le modèle couplé ISBA-Route/CROCUS, deux cas sont à distinguer.

En absence de neige, ni sur la route ni dans les précipitations, seul le modèle ISBA-Route est activé. Cependant, pour des raisons pratiques au niveau du couplage, les données météorologiques du pas de temps sont calculées par la routine METEO du modèle CROCUS. En effet, le modèle CROCUS utilise une variable météorologique de plus (la nébulosité) que le modèle ISBA-Route. C'est pourquoi, afin d'avoir toutes les variables nécessaires en présence de neige, les variables météorologiques proviennent du modèle CROCUS.

En présence de neige, le flux de conduction entre la chaussée et le manteau neigeux est calculé préalablement à l'appel des deux modèles. Les modèles CROCUS et ISBA-Route sont ensuite activés successivement. Les conditions limites pour l'appel des deux modèles sont dépendantes de la configuration de l'interface.

L'algorithme de couplage peut être représenté comme sur la figure 3.9. Les notations suivantes sont adoptées :

- *METEO* : appel de la routine METEO du modèle CROCUS afin de calculer les variables météorologiques d'entrée pour le pas de temps considéré
- *ROUTE^t* et *ROUTE^{t+Δt}* : état de la chaussée au début et à la fin du pas de temps
- *NEIGE^t* et *NEIGE^{t+Δt}* : état du manteau neigeux au début et à la fin du pas de temps

- ISBA-Route : appel du modèle ISBA-Route
- CROCUS : appel du modèle CROCUS

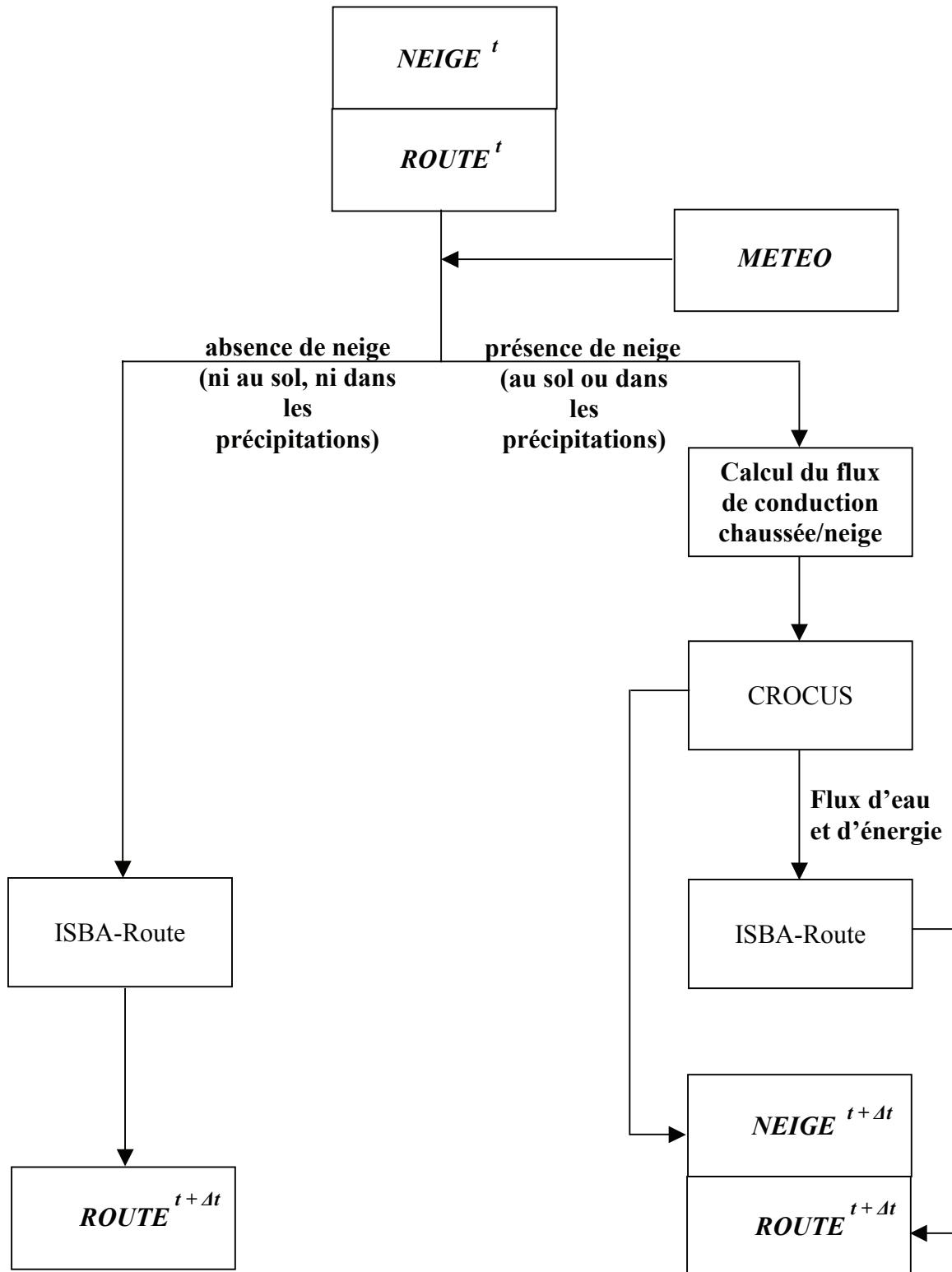


Figure 3.9 : Algorithme de couplage des modèles ISBA-Route et CROCUS.

3.4.4.2 Calcul du flux de conduction chaussée/neige

Le calcul du flux de conduction entre la chaussée et la neige se fait à partir de la résolution semi-implicite de l'évolution de température du système chaussée+neige . Le profil de température est déterminé en résolvant l'équation de la chaleur unidimensionnelle grâce au schéma numérique de Crank-Nicholson. Ce schéma est le schéma de résolution utilisé dans ISBA-Route et dans CROCUS. Il s'agit d'un schéma aux différences finies, dont la discrétisation spatiale et temporelle des équations pour une couche i et au temps t se fait en employant les expressions suivantes :

$$\frac{\partial f_i^{t+\Delta t/2}}{\partial t} = \frac{f_i^{t+\Delta t} - f_i^t}{\Delta t} \quad (3.80)$$

$$\frac{\partial^2 f_i^{t+\Delta t/2}}{\partial z^2} = \frac{(f_{i-1} - 2f_i + f_{i+1})^{t+\Delta t/2}}{\Delta z^2} \quad (3.81)$$

$$f^{t+\Delta t/2} = \frac{f^t + f^{t+\Delta t}}{2} \quad (3.82)$$

La résolution de l'équation de la chaleur appliquée et discrétisée pour chacune des couches aboutit à la résolution d'un système linéaire par rapport aux températures de chaque couche à l'instant $t+\Delta t$, reliant les températures des couches i , $i+1$ et $i-1$. La résolution de ce système permet d'obtenir le nouveau profil de température au temps $t+\Delta t$.

Dans le couplage, le profil de température va être résolu totalement pour l'ensemble des nœuds du système sol/neige, en tenant compte des propriétés de l'interface sol/neige.

Le problème peut être schématisé comme sur la figure 3.6, pour un système composé de K nœuds de calcul dans le sol et de L nœuds de calcul dans le manteau neigeux (où L varie en fonction de l'épaisseur totale du manteau neigeux). Les nœuds sont numérotés de 1 pour la couche de sol la plus profonde, à K+L pour le nœud de la couche de neige située en surface. On utilisera les notations définies lors de la définition de la résistance thermique équivalente R_{th} (3.4.2.4). On utilise les notations suivantes :

- s est l'indice de la couche de chaussée située en surface
- $N1$ est l'indice de la couche de neige située en surface de la chaussée
- T représente la température du nœud

- e représente l'épaisseur de la couche
- λ représente la conductivité thermique de la couche
- R_{th} représente la résistance thermique équivalente entre le nœud superficiel de chaussée et le nœud de la première couche de neige.

Le flux de conduction est donné dans les équations (3.70 et 3.71), et il nécessite de déterminer :

$$T_{N1}^{t+\Delta t/2} = (T_{N1}^t + T_{N1}^{t+\Delta t}) / 2 \quad (3.83)$$

$$T_s^{t+\Delta t/2} = (T_s^t + T_s^{t+\Delta t}) / 2 \quad (3.84)$$

$$Rth^{t+\Delta t/2} = (Rth^t + Rth^{t+\Delta t}) / 2 \quad (3.85)$$

Conditions aux limites

Les conditions aux limites inférieure et supérieure ont été décrites dans les parties relatives aux modèles (section 3.2). A l'extrémité inférieure de la chaussée est prise une condition de flux nul. A la surface du manteau neigeux (ou à la surface de la route en absence de neige), la condition limite est la somme des flux extérieurs (rayonnement visible et infrarouge, flux de chaleur sensible et latente, flux induit par les précipitations), calculés semi-implicitement au milieu du pas de temps.

Résolution du système :

L'équation de la chaleur discrétisée s'écrit pour un nœud i sous la forme :

$$\Delta U(i) = Qcond_{i+1} - Qcond_{i-1} + Qsol_i \quad (3.86)$$

avec :

$$Qsol_i = 0 \text{ si } i < k \quad (3.87)$$

$\Delta U(i)$ est la variation d'énergie interne de la couche i .

$$\Delta U(i) = \rho(i).e(i).Cp(i).(T_i^{t+\Delta t} - T_i^t) \quad (3.88)$$

où $\rho(i)$, $e(i)$, $Cp(i)$ sont respectivement la densité, l'épaisseur et la capacité calorifique de la couche considérée

$Qcond_{i+1}$ est le flux de conduction entre la couche supérieure et la couche considérée.

$$Qcond_{i+1} = \frac{1}{\frac{e(i)}{\lambda(i)} + \frac{e(i+1)}{\lambda(i+1)}} \cdot (T'_{i+1} + T'^{t+\Delta t}_{i+1} - T'_i - T'^{t+\Delta t}_i) \quad (3.89)$$

$Qcond_{i-1}$ est le flux de conduction entre la couche inférieure et la couche considérée.

$$Qcond_{i-1} = \frac{1}{\frac{e(i)}{\lambda(i)} + \frac{e(i-1)}{\lambda(i-1)}} \cdot (T'_i + T'^{t+\Delta t}_i - T'_{i-1} - T'^{t+\Delta t}_{i-1}) \quad (3.90)$$

$Qsol_i$ est le flux solaire traversant jusqu'à la couche i . Ce flux parvenant à la chaussée est en général faible car la majeure partie est absorbée par le manteau neigeux, mais il ne peut pas être négligé. Ainsi on considère que la proportion du rayonnement solaire traversant le manteau neigeux est absorbée intégralement par la surface de la chaussée, donc pour les nœuds de chaussée en dessous de la surface, le terme $Qsol$ est nul. Le flux solaire traversant la neige étant ainsi intégrée dans la matrice de résolution, le flux de conduction calculé prend en compte ce flux.

Pour la couche superficielle de chaussée et pour la couche de neige au sol, il est nécessaire de tenir compte des propriétés thermiques de l'interface sol neige. Pour cela, il faut modifier les coefficients suivants :

$\frac{e_{N1}}{\lambda_{N1}} + \frac{e_s}{\lambda_s} = 2.Rth$ dans le terme $Qcond_{i-1}$ de la couche de neige au sol et dans le terme $Qcond_{i+1}$

de la couche de chaussée de surface.

La condition limite pour la couche superficielle du manteau neigeux (notée K+L) permet d'écrire l'équation de la chaleur pour cette couche de la manière suivante :

$$\Delta U(K+L) = -Qcond_{(K+L)-1} + R_{sol} + R_{IR} - H - LE + F_{precip} \quad (3.91)$$

où, de manière analogue au flux de conduction, les flux extérieurs sont calculés semi-implicitement à $t+\Delta t/2$.

De même, la condition limite de flux nul pour la couche inférieure de la chaussée (notée 1) conduit à :

$$\Delta U(1) = Q_{cond} \quad (3.92)$$

Le bilan sur chaque couche nous permet d'écrire le système matriciel tridiagonal suivant :

$$\begin{bmatrix} b_1 & c_1 & & & \\ a_2 & b_2 & c_2 & & \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \\ & a_s & b_s & c_s & \\ & & a_{N1} & b_{N1} & c_{N1} \\ & & \cdots & \cdots & \cdots \\ & & a_{K+L} & b_{K+L} & \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_1^{t+\Delta t} \\ T_2^{t+\Delta t} \\ \cdots \\ T_s^{t+\Delta t} \\ \cdots \\ T_{N1}^{t+\Delta t} \\ \cdots \\ T_{K+L}^{t+\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \cdots \\ d_s \\ \cdots \\ d_{N1} \\ \cdots \\ d_{K+L} \end{bmatrix} \quad (3.93)$$

Les valeurs des coefficients de la matrice sont données en annexe B.

La résolution de ce système nous permet d'obtenir le nouveau profil de température du système chaussée/neige au temps $t+\Delta t$. On peut ainsi calculer les températures nécessaires pour le calcul du flux de conduction : $T_s^{t+\Delta t/2}$ et $T_{N1}^{t+\Delta t/2}$. Les coefficients de la matrice ne prennent pas en compte les termes puits/sources de chaleur dus aux phénomènes hydriques (ruissellement, rétention). Cependant, ces termes sont pris en compte dans la résolution ultérieure du profil de température dans le sol dans le modèle ISBA-Route.

Les différences de propriétés thermiques entre la neige (faible inertie, propriétés isolantes de la neige sèche) et la route (inertie importante, propriétés conductrices), les changements de phase, ainsi que les rapides modifications de l'interface ont compliqué la résolution numérique du profil de température du système route+neige. Pour l'intégration temporelle, il a été nécessaire de distinguer plusieurs cas dépendants de la température et de la teneur en eau liquide de la première couche de neige au début du pas de temps, et des possibles changements de phase dans cette couche au cours du pas de temps.

Par exemple, si la température de la première couche de neige est initialement sèche (température inférieure à 0°C), une première résolution du profil de température est effectuée. Si la nouvelle température ($T_{N1}^{t+\Delta t}$) reste inférieure à 0°C, il n'y a pas de modification de l'interface au cours du pas de temps. Dans ce cas, le profil de température du manteau neigeux est sauvégarde dans CROCUS, et ISBA-Route est appelé avec le flux de conduction F_{cond} , déduit du profil de température calculé.

Par contre, si la nouvelle température ($T_{NI}^{t+\Delta t}$) est égale ou supérieure à 0°C, une seconde résolution du profil de température est effectuée pour le système composé de la route et de la première couche de sol, avec pour condition limite supérieure $T_{NI}^{t+\Delta t} = 0^\circ\text{C}$ et avec une résistance thermique équivalente $R_{th}^{t+\Delta t}$ correspondant à une interface "neige humide". Les nouveaux profils de température de la chaussée et du manteau neigeux sont alors calculés à partir des flux de conduction F_{cond} et $-F_{cond}$ déduits de ce second calcul. Lorsque la première couche de neige est initialement humide, plusieurs calculs antérieurs à l'avancée temporelle de ISBA-Route et CROCUS peuvent être effectués, afin de déterminer la température de la première couche de neige et les caractéristiques de l'interface.

Dans certains cas, il a été nécessaire d'introduire un flux numérique (F_r) afin de prendre en compte le flux de froid nécessaire pour régler intégralement l'eau liquide présente dans la première couche de neige, ceci pour éviter les instabilités numériques.

L'algorithme complet des différents cas de calcul est résumé sur la figure 3.10.

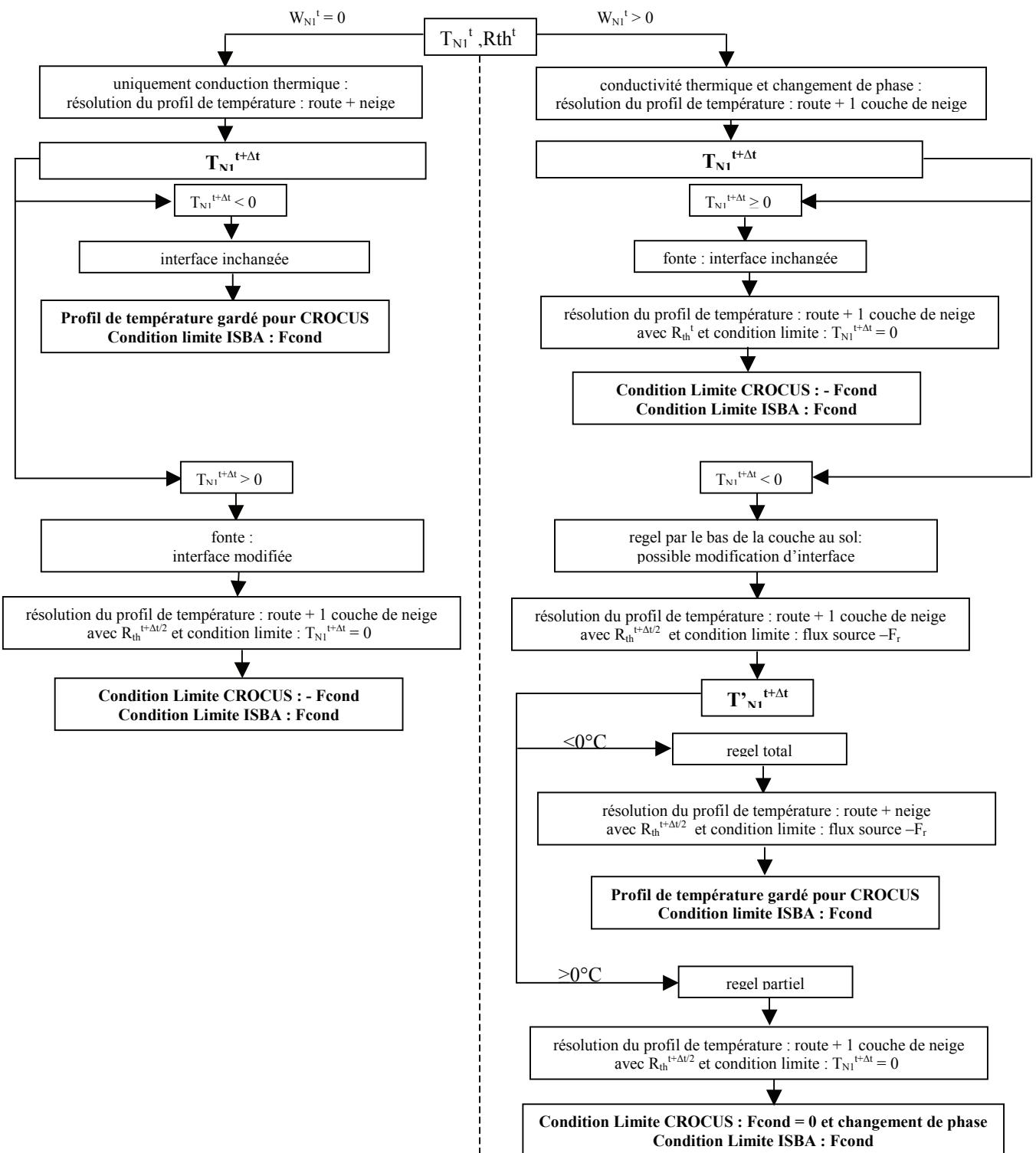


Figure 3.10 : Organigramme des différents cas de résolution numérique du calcul du flux de conduction entre la chaussée et la neige au sein du couplage des modèles ISBA-Route et CROCUS (T_{NI}^t, W_{NI}^t sont respectivement la température et la teneur en eau liquide de la première couche de neige au début du pas de temps; R_{th}^t et $R_{th}^{t+\Delta t/2}$ sont les résistances thermiques équivalentes entre les nœuds de la couche de surface de la chaussée et de la première couche de neige, respectivement au début du pas de temps et calculée implicitement afin de prendre en compte la modification de l'interface durant le pas de temps; F_r est un flux source correspondant à l'opposé du flux nécessaire pour régler l'intégralité de l'eau liquide contenue dans la première couche de neige)

Le schéma de résolution (Crank-Nicholson) est un schéma stable et convergent, mais peu précis. Il peut conduire à une oscillation autour de la solution sur quelques pas de temps avant de converger. Ces oscillations sont de faible ampleur et ne posent aucun problème dans la résolution du profil de température dans la chaussée dans ISBA-Route, ou encore du profil de neige dans CROCUS. Par contre, pour le calcul du flux de conduction F_{cond} , ces oscillations peuvent être importantes et entraîner une instabilité numérique sur quelques pas de temps. Cette instabilité est présente dans le cas d'un choc thermique (cas de la chute de neige ou de l'arrivée d'eau liquide en bas du manteau neigeux (par percolation ou remontée capillaire). En effet, la forte différence d'inertie thermique entre les deux matériaux, combinée au fort gradient mis en jeu, est source d'instabilité numérique.

Pour résoudre ce problème sans diminuer le pas de temps des modèles ISBA-Route et CROCUS, la résolution du profil total de température se fait dans le cas de choc thermique en divisant le pas de temps en 10 sous-pas de temps. Ainsi l'instabilité est atténuée sur quelques sous-pas de temps et nous permet d'obtenir un profil de température stable à la fin du pas de temps.

3.4.4.3 Gestion des transferts hydriques entre la chaussée et la neige

Les transferts hydriques entre la chaussée et la neige sont effectués à la fin du pas de temps, après le calcul du flux de conduction. Cependant, afin d'éviter les problèmes d'instabilité numérique et les erreurs dans la détermination de la configuration de l'interface, les remontées capillaires sont gérées partiellement au début et à la fin du pas de temps.

Au début du pas de temps, le réservoir disponible en surface de la chaussée (quantité supérieure à la rétention) va pouvoir remonter par capillarité dans la première couche de neige, jusqu'à saturation de cette dernière. En cas de saturation de cette couche, le contenu en eau liquide restant disponible en surface de la chaussée est ajouté au réservoir disponible à la base du manteau neigeux, pour la gestion de la couche saturée en eau liquide, à la fin du pas de temps.

3.4.5 Conclusion

Le modèle couplé ISBA-Route/CROCUS permet de suivre l'évolution thermique et hydrique d'un système composé d'une route et d'un manteau neigeux, quand il existe. Ce modèle permet de gérer l'évolution de l'interface entre la chaussée et la neige. Les multiples configurations de l'interface, la variabilité des flux à l'interface et le choc thermique entraîné par une couche de

neige se déposant sur une chaussée ont nécessité certaines adaptations numériques afin de rendre le modèle numériquement stable dans tous les cas de figure.

3.5 Conclusion du chapitre

Ce chapitre décrit le développement d'un modèle numérique permettant de simuler le comportement d'une couche de neige déposée sur une chaussée, réalisé à partir du couplage d'un modèle de sol et d'un modèle de neige.

La complexité des phénomènes à l'interface a conduit au développement d'un modèle issu du couplage de deux modèles détaillés : le modèle multicouches avec diffusion ISBA-DF pour le sol et le modèle multicouches CROCUS pour le manteau neigeux. Le modèle ISBA-DF a dans un premier temps été adapté à la route. Pour cela, les processus relatifs à la végétation ont été supprimés et les caractéristiques physiques des routes (propriétés thermiques, caractère imperméable) ont été intégrées dans le modèle. De la même manière, la formation d'une couche saturée en eau liquide à la base du manteau neigeux a été intégrée dans le modèle CROCUS.

Le couplage de ces adaptations de ISBA-DF et CROCUS a été réalisé de manière à prendre en compte les transferts thermiques et hydriques entre la chaussée et la neige. De plus, le modèle développé intègre les résultats expérimentaux du projet Gelcro et il prend ainsi en compte les multiples configurations de l'interface et son évolution. Les multiples configurations de l'interface, la variabilité du flux de conduction entre la chaussée et la neige ou encore le choc thermique entraîné par une couche de neige se déposant sur une chaussée ont nécessité certaines adaptations numériques, afin d'assurer une stabilité numérique au modèle. Le modèle résultant permet de simuler l'évolution énergétique et massique d'un système composé d'une route et d'un manteau neigeux, lorsqu'il existe. Sa stabilité numérique permet d'envisager une utilisation dans un contexte opérationnel en viabilité hivernale.

Avant d'envisager toute utilisation opérationnelle, un modèle doit d'abord être validé. Le modèle doit être capable de reproduire précisément des épisodes neigeux observés sur des sites expérimentaux. Les prochains chapitres s'intéressent à la validation du modèle tout d'abord en mode forcé avec les données météorologiques observées, puis dans un contexte de prévision.

Chapitre 4

Validation du modèle couplé

ISBA-Route/CROCUS

Validation du modèle couplé ISBA-Route/CROCUS

4.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats de simulations effectuées avec le modèle couplé ISBA-Route/CROCUS. Ces simulations ont été effectuées et comparées aux mesures pour deux sites expérimentaux : le site expérimental de Météo-France situé au Col de Porte (décris en section 2.5.2) et le site expérimental du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Nancy. Il s'agit dans ce chapitre d'évaluer la capacité du modèle à reproduire l'évolution de température de surface et les épisodes neigeux observés, à partir de données météorologiques mesurées sur les sites expérimentaux. Ces données ont été mesurées directement sur le site du Col de Porte et mesurées au Centre Départemental de la Météorologie de Nancy, situé à proximité du site du LRPC.

La première partie de ce chapitre s'intéresse à la validation relative au Col de Porte. La vaste base de données (60 épisodes de chute de neige sur chaussée au cours des hivers 1997/98, 1998/99 et 1999/2000) constituée au cours de l'expérimentation du projet Gelcro (Borel 2000, Muzet et al. 2000) permet une étude détaillée. Sont présentés ici les résultats pour trois épisodes typiques, puis pour des simulations longues (hiver entier), au cours des trois hivers de la campagne expérimentale.

La seconde partie de ce chapitre montre les résultats obtenus sur différents revêtements installés sur le site du LRPC de Nancy. On s'intéresse dans cette section essentiellement à la sensibilité du modèle au type de revêtement. Les revêtements et le site expérimental sont décrits dans cette section. Parmi les revêtements utilisés se trouvent des revêtements drainants. Ainsi, une paramétrisation des propriétés hydriques de ce type de revêtement est proposée.

4.2 Validation sur le site du Col de Porte

Les résultats expérimentaux de la campagne expérimentale du projet Gelcro ont été largement utilisés dans ce travail, pour le développement et la validation du modèle. La campagne de mesure et le site expérimental ont été décrits en détails en section 2.5.

4.2.1 Les conditions de simulation

4.2.1.1 La chaussée modélisée

La validation du modèle sur le site expérimental n'a été effectuée que pour un type de chaussée. En effet, l'expérimentation du projet Gelcro a montré que les revêtements utilisés étaient peu différents du point de vue de leurs propriétés thermiques. Seule une chaussée expérimentale possédait des propriétés (thermiques mais également hydriques) assez différentes des autres (chaussée n°4 en annexe A). Cette chaussée est divisée en 3 sections (figures A.5 à A.7) avec des revêtements de surface différents : un BBSG (Béton Bitumineux Semi-Grenus) recouvert de peinture rouge, un BBTM (Béton Bitumineux Très Mince) et un BBDR (Béton Bitumineux DRainant). Cependant, la présence d'un unique capteur de hauteur de neige pour l'intégralité de cette chaussée empêche de déceler une éventuelle différence de comportement à l'enneigement des 3 revêtements constituant la chaussée. De plus, l'observation des températures pour la section constituée du revêtement drainant a montré des anomalies. En effet, le comportement hivernal des enrobés drainants diffère des autres types de revêtement, il se refroidit plus vite et reste plus longtemps à une température négative. Or la mesure de température a montré le contraire. Cette anomalie est probablement due à l'absence d'isolation latérale entre les 3 sections de la chaussée expérimentale.

La chaussée utilisée dans le modèle pour la validation est de structure dense, elle correspond à une chaussée autoroutière. La structure de la chaussée est montrée en annexe A (chaussée n°6, figure A.9). La densité des différentes couches de la structure a été mesurée expérimentalement par rayonnement gamma au cours de l'expérimentation du projet Gelcro (Speth et Muzet, 2000). Les valeurs de la conductivité thermique et de la porosité moyenne des différents constituants sont issues de la littérature (Guide Technique LCPC/SETRA, 1994). La structure et les propriétés physiques du sol utilisées sont décrites dans le tableau 4.1.

Matériau	Δz (m)	ρ (kg m^{-3})	λ_{dry} ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	w_{sat} (%)	noeuds
Béton bitumineux semi-grenus	0.005	2000	2.1	6.35	1
Béton bitumineux semi-grenus	0.077	2000	2.1	2.35	2
Grave ciment	0.512	2400	2.0	7.2	4
Couche de forme	0.174	2200	2.0	8.8	1
Sol Naturel	8.5	1700	3.0	42.5	5

Tableau 4.1 : Discréétisation et propriétés physiques de la chaussée utilisée pour la validation du modèle. Δz est l'épaisseur, ρ est la densité, λ_{dry} est la conductivité thermique sèche, w_{sat} est la porosité volumique du matériau. *Nœuds* représente le nombre de nœuds pour chaque couche de matériau.

La discréétisation du sol a été obtenue après une optimisation de la discréétisation, depuis 39 nœuds de calculs jusqu'à 7. La discréétisation optimale respectant les contraintes de construction et ne détériorant pas la précision du calcul est de 13 nœuds pour la route utilisée. La discréétisation est décrite dans le tableau 4.1.

4.2.1.2 Les données météorologiques

Les données météorologiques (entrées du modèle) ont nécessité plusieurs traitements afin d'obtenir le forçage le plus précis possible pour le modèle, et ainsi limiter les incertitudes. Une correction du flux solaire visible a été appliquée pour chaque chaussée afin de prendre en compte les différences, dues aux masques solaires, entre le capteur et les chaussées. Les masques solaires ont été mesurés sur le capteur et sur les différentes chaussées et ainsi grâce à un modèle théorique simple, les rayonnements solaires directs et diffus ont été estimés pour chaque chaussée. Des corrections concernant les précipitations ont également été apportées. La quantité de précipitations a été corrigée en fonction de la vitesse du vent pour prendre en compte la sous-estimation de la mesure du pluviomètre en cas de fort vent. Une détermination manuelle du type de précipitation (pluie ou neige) a été nécessaire pour les cas de mélanges pluie/neige ou de pluie se transformant en neige.

4.2.1.3 Initialisation de la simulation

Pour toutes les simulations, le profil initial de température a été obtenu à partir des mesures de températures pour les nœuds constituant la route, et à partir d'un bouclage sur 10 ans avec le

forçage observé au Col de Porte pour les nœuds constituant le sol naturel (sur une profondeur variant de 1 m à 10 m). La figure 4.1 représente les profils de température dans le sol après les dix années de bouclage, le 1 janvier et le 1 juillet.

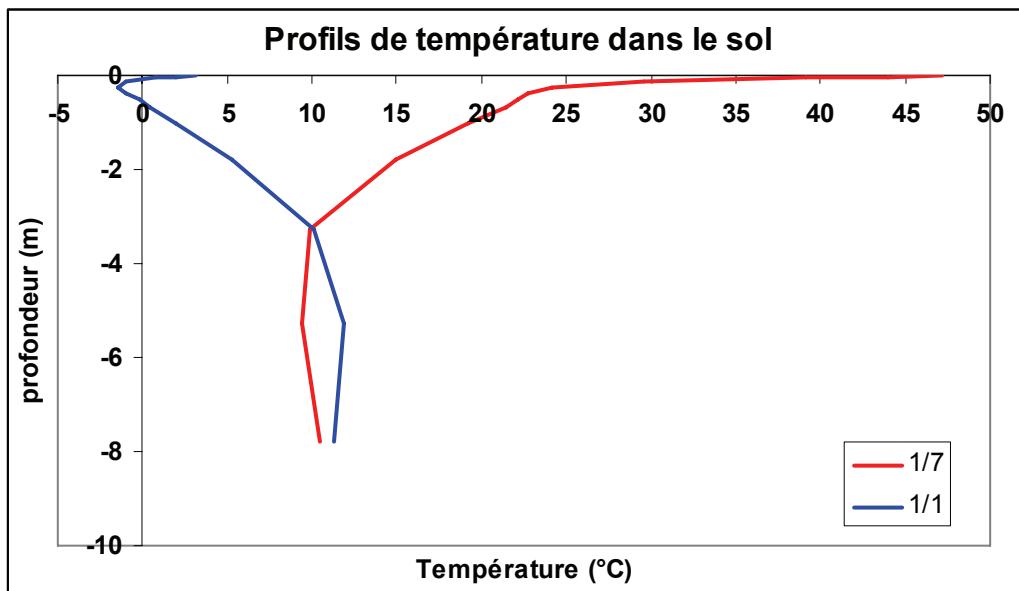


Figure 4.1 : Profils de température dans le sol du Col de Porte après 10 ans de simulation, le 1 juillet et le 1 janvier.

4.2.2 Tests de sensibilité du modèle

Afin de connaître la sensibilité du modèle aux différents paramètres, mais également afin d'estimer certains paramètres physiques de la chaussée non mesurés (conductivité thermique sèche, émissivité, albédo, capacité calorifique sèche et longueur de rugosité), une étude de sensibilité du modèle a été effectuée au cours de deux périodes sans chutes de neige. Une première (période 1), relativement froide (température moyenne de surface de la chaussée de 1.06°C), du 1 au 22 février 1998, et une seconde (période 2), relativement chaude (température moyenne de surface de la chaussée de 4.73°C), du 9 au 25 mars 2000.

La capacité calorifique des différents matériaux constituant la route est dans la majorité des cas non mesurée. Dans la littérature, des valeurs moyennes sont proposées pour une route en asphalte ($800 \text{ J} \cdot \text{kg} \cdot \text{K}^{-1}$) par Alexanderson et al. (1990) et pour un sol naturel (736 J kg K^{-1}) par Peters-Lidard et al. (1998). Frémont et al. (1979) ont utilisé une valeur de 836 J kg K^{-1} dans le modèle de sol GEL1D.

Il est important de noter que le modèle calcule des propriétés thermiques effectives, capacité calorifique et conductivité, tenant compte des teneurs en eau liquide et glace de la couche considérée. Ainsi, pour les matériaux constituant la route, pour lesquels la teneur en eau est faible, les valeurs des propriétés effectives sont proches des valeurs sèches. Par contre, pour le sol naturel, où la teneur en eau liquide peut atteindre des valeurs relativement importantes, les différences peuvent devenir significatives. Par exemple dans le cas présent, le sol naturel est considéré comme saturé avec une porosité de 42.5% (Guide Technique LCPC/SETRA, 1994), ainsi la conductivité thermique effective est de l'ordre de $1.5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ alors que la conductivité sèche vaut $3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. La conductivité thermique des matériaux constituant la chaussée a été fixée à $2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

D'après des données obtenues auprès du LCPC (Livet, J., communication personnelle), l'albédo d'un revêtement en Béton Bitumineux Semi-Grenus varie de 0.04 à 0.13. L'émissivité dépend du type de granulat et de l'âge du revêtement, et se situe dans un intervalle variant de 0.96 à 1. Les conductivités thermiques (prenant en compte la présence d'eau) se situent aux alentours de $1.9 \text{ W.m}^{-1}. \text{K}^{-1}$ pour les matériaux constituant la route, et aux alentours de $1.5 \text{ W.m}^{-1}. \text{K}^{-1}$ pour le sol naturel (Guide Technique LCPC/SETRA, 1994).

Plusieurs simulations ont été effectuées, en ne faisant varier qu'un seul paramètre à la fois dans un intervalle réaliste physiquement, et en affectant aux autres paramètres les valeurs initiales fixées. Ces valeurs initiales sont :

- albédo : 0.1
- émissivité : 1
- une capacité calorifique spécifique de $836 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- conductivité thermique sèche : $2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ pour les matériaux de la chaussée et $3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ pour le sol naturel.

Les résultats de ces tests de sensibilité sur la température de surface de la chaussée T_s et sur la température à 0.6m de profondeur $T_{0.6m}$, sont donnés dans le tableau 4.2, et ils sont exprimés à partir de l'erreur moyenne (ME) et de l'écart quadratique moyen de l'erreur ($RMSE$).

PROPRIETE THERMIQUE	PERIODE 1				PERIODE 2			
	Ts		T0.6m		Ts		T0.6m	
	ME	RMSE	ME	RMSE	ME	RMSE	ME	RMSE
Albedo								
0.04	-0.162	2.506	0.416	0.865	0.295	2.807	0.379	0.579
0.07	-0.405	2.570	0.313	0.924	0.062	2.828	0.252	0.484
0.09	-0.569	2.631	0.245	0.980	-0.095	2.860	0.166	0.430
0.10	-0.650	2.666	0.214	1.008	-0.173	2.881	0.124	0.409
0.11	-0.732	2.704	0.185	1.037	-0.252	2.906	0.081	0.392
0.13	-0.896	2.790	0.128	1.099	-0.412	2.967	-0.006	0.372
Emissivité								
1.00	-0.650	2.666	0.214	1.008	-0.173	2.881	0.124	0.409
0.98	-0.501	2.625	0.274	0.959	-0.075	2.875	0.177	0.436
0.96	-0.347	2.590	0.340	0.914	0.024	2.874	0.230	0.469
0.94	-0.191	2.564	0.407	0.881	0.123	2.876	0.284	0.506
0.92	-0.031	2.547	0.478	0.859	0.224	2.884	0.338	0.547
Longueur de rugosité (m)								
0.0001	-0.497	2.628	0.271	0.959	1.498	3.520	1.003	1.249
0.0005	-0.593	2.649	0.235	0.990	0.372	2.959	0.412	0.638
0.001	-0.650	2.666	0.214	1.008	-0.173	2.881	0.124	0.409
0.005	-0.815	2.732	0.156	1.065	-1.498	3.345	-0.564	0.654
0.01	-0.892	2.774	0.130	1.092	-1.993	3.770	-0.844	0.932
0.05	-1.012	2.891	0.091	1.133	-3.031	4.948	-1.398	1.523
Conductivité thermique de la route ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)								
0.80	-1.219	3.230	0.138	1.168	-0.456	2.779	-0.977	1.241
1.00	-1.063	2.935	0.108	1.174	-0.373	2.683	-0.705	0.988
1.30	-0.894	2.697	0.117	1.148	-0.283	2.653	-0.383	0.704
1.60	-0.776	2.619	0.148	1.096	-0.227	2.706	-0.141	0.517
1.90	-0.687	2.634	0.195	1.034	-0.192	2.802	0.058	0.423
2.20	-0.621	2.702	0.238	0.982	-0.165	2.917	0.227	0.421
2.50	-0.574	2.798	0.274	0.935	-0.147	3.039	0.365	0.476
Conductivité thermique du sol naturel ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)								
1.50	-0.680	2.681	0.063	1.172	-0.176	2.882	0.113	0.408
2.00	-0.670	2.677	0.112	1.120	-0.173	2.881	0.132	0.418
2.50	-0.661	2.672	0.161	1.064	-0.171	2.881	0.138	0.421
3.00	-0.650	2.666	0.214	1.008	-0.173	2.881	0.124	0.409
3.50	-0.641	2.660	0.255	0.969	-0.173	2.881	0.124	0.407
4.00	-0.630	2.653	0.305	0.926	-0.170	2.881	0.138	0.414
4.50	-0.619	2.646	0.349	0.895	-0.168	2.881	0.151	0.421
Capacité calorifique sèche ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)								
600	-0.300	2.437	0.705	0.860	-0.150	2.631	0.401	0.443
700	-0.281	2.403	0.703	0.855	-0.150	2.717	0.292	0.402
800	-0.271	2.397	0.697	0.850	-0.154	2.809	0.187	0.410
900	-0.266	2.412	0.692	0.845	-0.164	2.904	0.075	0.446
1000	-0.264	2.441	0.688	0.842	-0.178	2.998	-0.035	0.506

Tableau 4.2 : Résultats des tests de sensibilité des propriétés thermiques du sol, sur la température de surface de la chaussée et sur la température à 0.6m de profondeur, pour la période 1 (du 1 au 22 février 1998) et pour la période 2 (du 9 au 25 mars 2000). ME et RMSE représentent respectivement l'erreur moyenne et l'écart quadratique moyen de l'erreur.

Les meilleurs scores sont différents entre les deux périodes, et une amélioration du score sur la température de surface peut engendrer une détérioration du score sur la température en profondeur. Cependant, le but de ces tests de sensibilité n'était pas de trouver une valeur optimale des propriétés thermiques pour les simulations, mais de s'assurer que les valeurs proposées étaient raisonnables.

Les valeurs de l'albédo et de la longueur de rugosité utilisées dans le modèle sont respectivement 0.07 et 0.0005m. Elles ont été choisies dans le but de maximiser la simulation de la température de surface pour la simulation des deux périodes. L'émissivité a été fixée à 0.96. Il s'agit de la limite physique inférieure de l'émissivité, bien que les meilleurs scores aient été obtenus pour des valeurs plus faibles. Ces tests ont également permis de montrer que le modèle n'était pas très sensible à la capacité calorifique et que la valeur de $836 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ proposée par le LCPC était appropriée.

4.2.3 Résultats de simulations pour trois épisodes typiques

Sont ici présentés les résultats de trois épisodes typiques de chute de neige, afin d'estimer les performances du modèle sous différentes conditions météorologiques : un épisode hivernal de pluie se transformant en neige, un épisode hivernal de chute de neige sèche et une situation printanière.

4.2.3.1 Episode 1 : du 16 au 26 février 1998

Le premier épisode (épisode 1), du 16 au 26 février 1998, fût un épisode de pluie se transformant en neige. Cet épisode comprend un déneigement manuel le 24 février 1998. Les précipitations neigeuses correspondantes à l'épisode sont de 36 mm d'équivalent en eau. Les résultats des simulations comparés aux mesures sont montrés sur la figure 4.2.

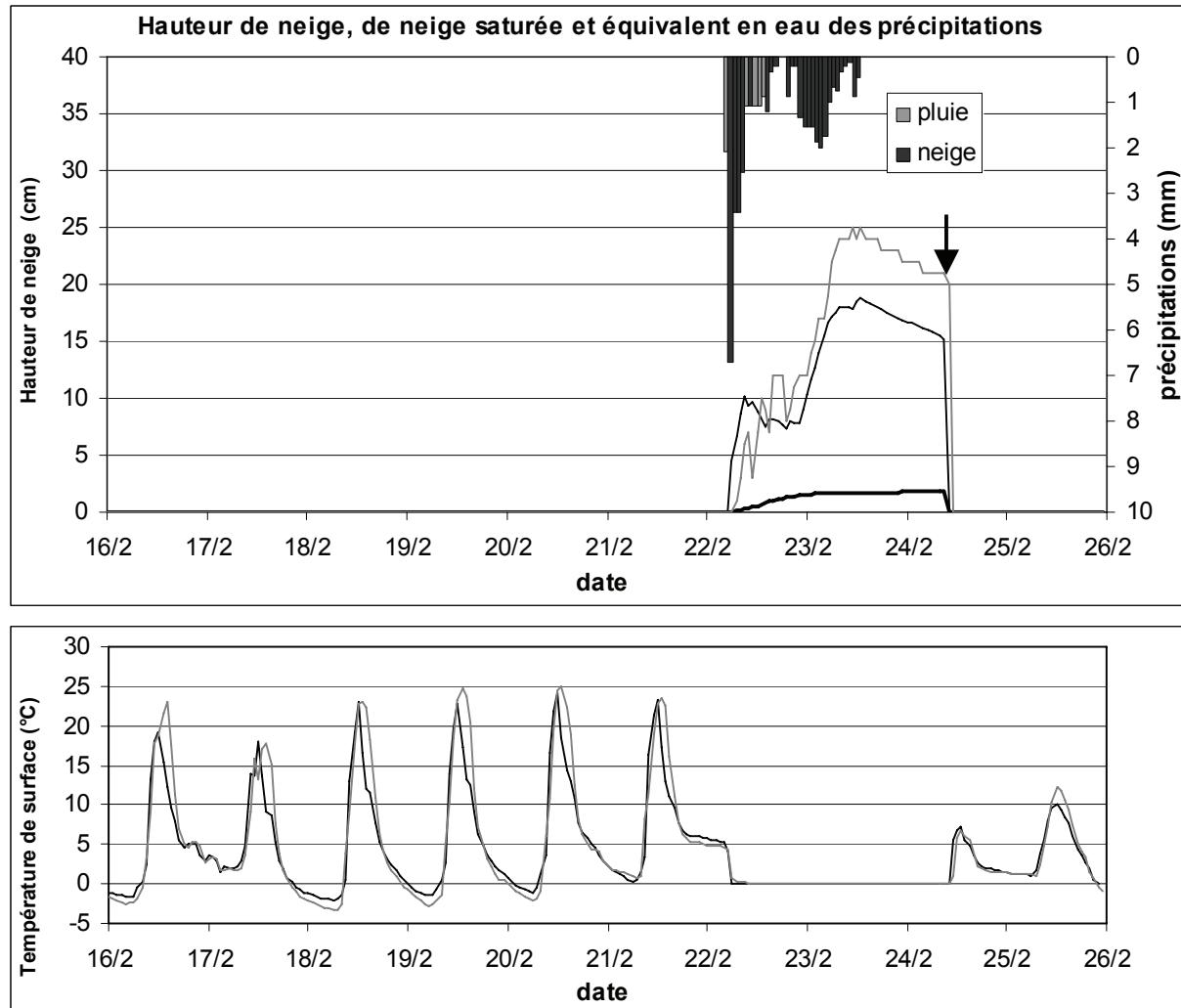


Figure 4.2 : Comparaison pour l'épisode 1 a) des hauteurs de neige simulées (trait foncé) et mesurées (trait clair), simulation de la hauteur de neige saturée en eau liquide (trait épais), précipitations (histogramme) et déneigement manuel (↓) b) des températures de surface simulées (trait foncé) et mesurées (trait clair).

Le modèle est capable de simuler les fluctuations de température dans le cas d'une chaussée sans neige, ainsi que l'abaissement de température au moment de la chute avec une bonne précision. Les différences aperçues vers 12h TU (correspondant au maximum des radiations solaires visibles) sont dues aux incertitudes relatives à la détermination des masques solaires.

Concernant la hauteur de neige, le modèle est capable de simuler l'occurrence de neige avec précision, cependant des différences significatives peuvent être observées concernant la hauteur de neige totale. Plusieurs causes peuvent expliquer ces différences. La première est relative au type d'épisode (pluie se transformant en neige humide). En effet, il est assez difficile d'estimer précisément la proportion pluie/neige dans une chute de pluie et neige mêlées. Ainsi, une sous

estimation de la quantité de précipitations neigeuses pourrait expliquer la plus faible hauteur de neige dans la simulation. Une autre explication possible pourrait être une différence entre les densités de neige simulée et observée. Le modèle est également capable de simuler la configuration de l'interface, avec la formation d'une couche de neige saturée en eau liquide. Le 22 février 98 à 11h, la hauteur de neige saturée mesurée était environ de 1cm, alors que celle simulée n'était que de 0.25cm. La différence est probablement due à l'incertitude sur la quantité de précipitation liquide expliquée précédemment ou encore à une présence initiale d'eau liquide en surface du revêtement.

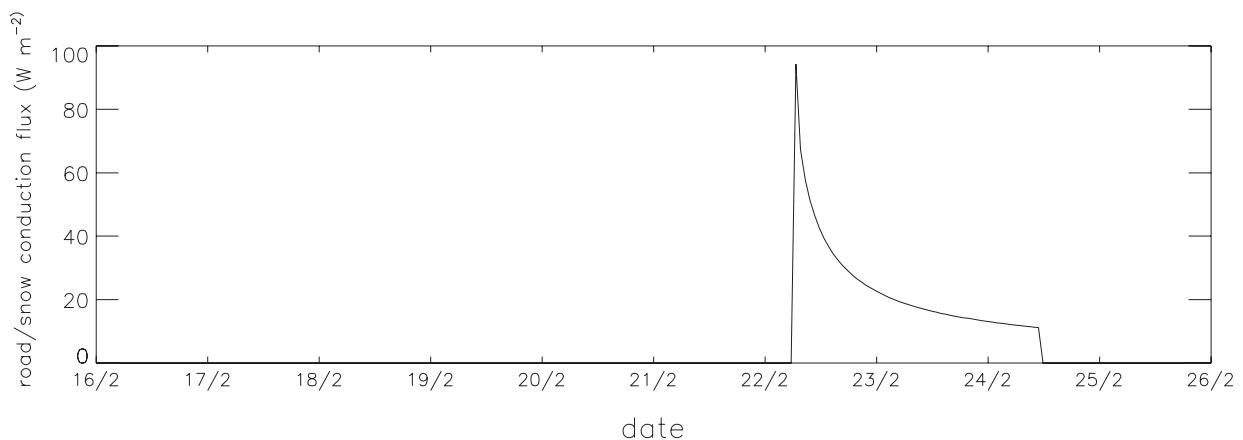


Figure 4.3 : Flux de conduction chaussée/neige simulé au cours de l'épisode 1

Le flux de conduction simulé (figure 4.3) atteint approximativement 100 W.m^{-2} au début de la chute de neige, et décroît rapidement avec le refroidissement de la chaussée. Il est important de noter que le flux de conduction chaussée/neige peut atteindre des valeurs relativement élevées : quasiment 100 W.m^{-2} dans ce cas, mais il peut être supérieur à 500 W.m^{-2} dans le cas d'une chaussée très chaude (c'est à dire environ 10°C).

4.2.3.2 Episode 2 :du 12 au 23 décembre 1998

Le second épisode, du 12 au 23 décembre 1998, fût un épisode de chute de neige sèche sur une chaussée sèche, avec un déneigement manuel le 22 décembre. Les précipitations neigeuses associées à l'épisode sont de 8.7 mm d'équivalent en eau. Les résultats sont montrés sur la figure 4.4.

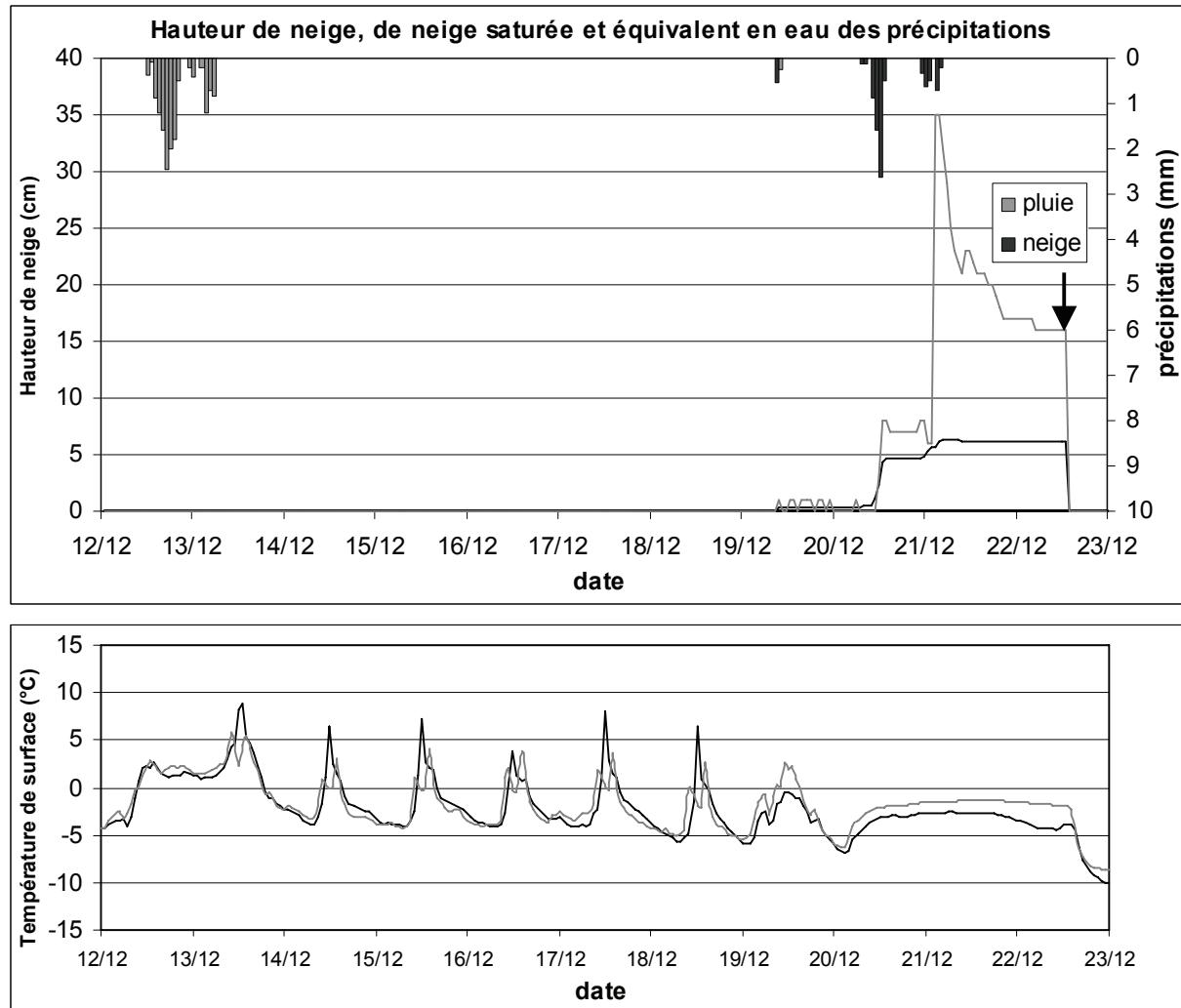


Figure 4.4 : Comparaison pour l'épisode 2 a) des hauteurs de neige simulées (trait foncé) et mesurées (trait clair), simulation de la hauteur de neige saturée en eau liquide (trait épais), précipitations (histogramme) et déneigement manuel (↓) b) des températures de surface simulées (trait foncé) et mesurées (trait clair).

Comme pour l'épisode précédent, la simulation de l'évolution de température de surface de la chaussée est relativement précise, malgré quelques différences dues à l'incertitude sur la détermination des masques solaires.

Par contre, la hauteur de neige simulée est très différente de celle mesurée. Le début de l'enneigement (à partir du 21 décembre) est simulé avec une précision satisfaisante, mais ensuite la hauteur de neige mesurée croît brusquement d'environ 30cm tandis que la hauteur de neige simulée reste constante. Cette différence est due au transport de neige par le vent, phénomène qui n'est pas simulé par le modèle. Au cours de la nuit du 21 au 22 décembre, la vitesse du vent était très élevée (jusqu'à 10 m s^{-1}) et ce vent fort fût responsable de la

formation de congères, qui ont pu être observées dans les enregistrements vidéos de l'épisode. Ce cas (environ 30 cm) est unique dans la base de données. En effet, dans la majorité des cas, l'erreur sur la hauteur de neige simulée causée par le transport de neige par le vent sur le site expérimental est de l'ordre de quelques centimètres.

Contrairement à l'épisode précédent, aucune couche de neige saturée en eau liquide n'a été simulée. En absence de mesure manuelle, ce résultat a pu être confirmé grâce à la mesure de température de surface qui reste négative.

4.2.3.3 Episode 3 : du 7 au 20 avril 2000

Le troisième épisode sélectionné, du 7 au 20 avril 2000, fût constitué d'une succession de trois chutes de neige : une chute de neige sur une chaussée chaude, puis par deux fois de la pluie se transformant en neige. Les précipitations neigeuses associées à chaque chute sont respectivement 3.3 mm, 10.3 mm et 21.7 mm d'équivalent en eau. Contrairement aux épisodes précédents, aucun déneigement manuel n'a été effectué. Les résultats sont montrés sur la figure 4.5.

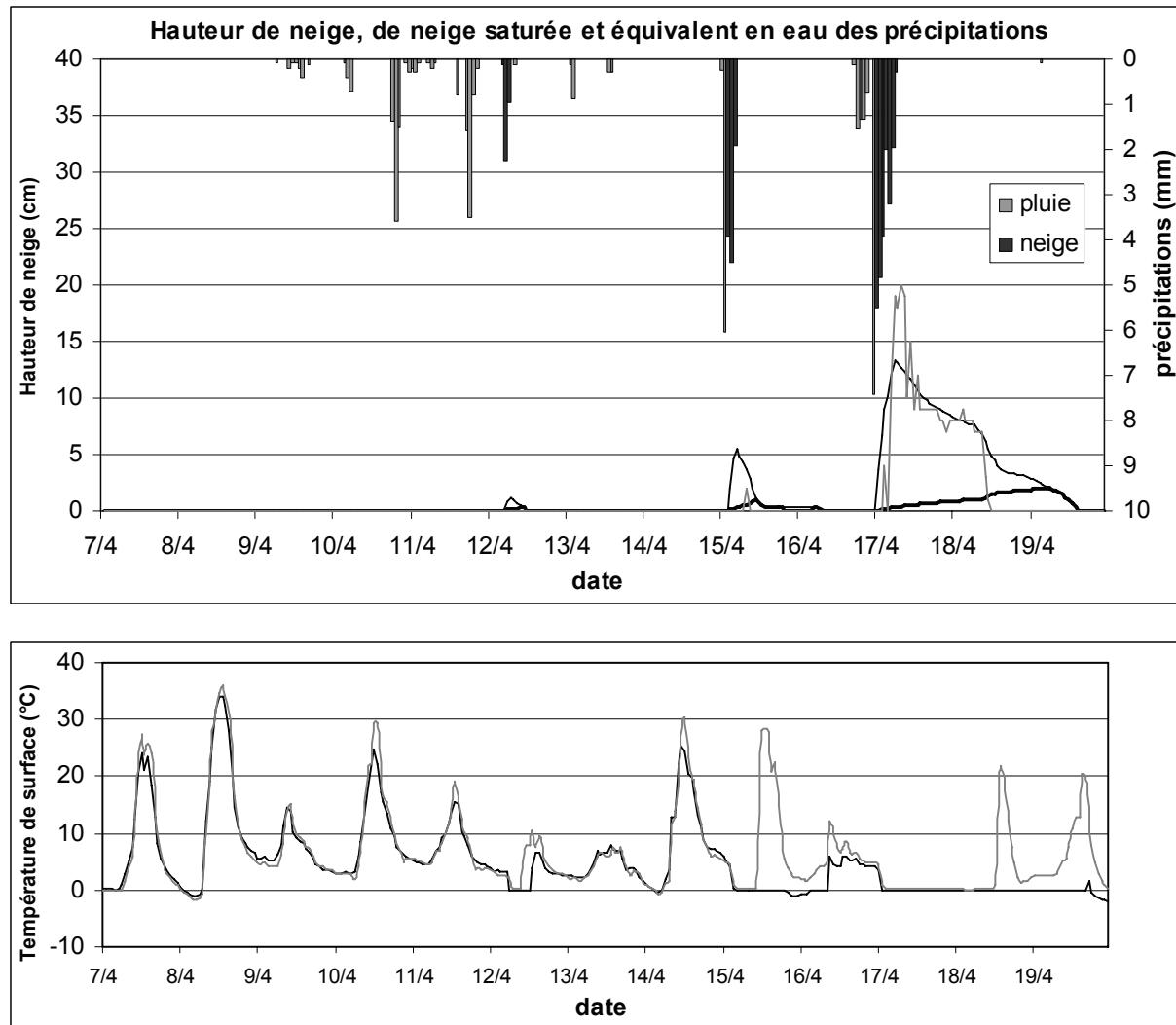


Figure 4.5 : Comparaison pour l'épisode 3 a) des hauteurs de neige simulées (trait foncé) et mesurées (trait clair), simulation de la hauteur de neige saturée en eau liquide (trait épais), précipitations (histogramme) et déneigement manuel (\downarrow) b) des températures de surface simulées (trait foncé) et mesurées (trait clair).

L'occurrence de neige sur la route est simulée avec précision, mais la fonte se produit plus tard dans la simulation que dans le cas réel. Ce problème est probablement dû à la quantité de précipitation. Cet épisode est un épisode se produisant en avril, donc soumis à des conditions météorologiques printanières. Comme il a été expliqué dans la présentation des différents types d'épisodes, au cours de cette période la majorité des épisodes sont des épisodes de pluie se transformant en neige humide et de mélanges pluie/neige. Ce type d'épisode est ainsi associé à une incertitude importante concernant la quantité de précipitations solides. En effet, il est assez difficile de connaître avec précision la transition entre la pluie et la neige, et la proportion entre la pluie et la neige au cours d'une chute mélangée.

Une autre cause expliquant cette différence est l'hétérogénéité spatiale de la fonte naturelle. Il a été observé sur les enregistrements vidéos que certaines parties de la chaussée pouvaient être totalement déneigées, alors que d'autres pouvaient être recouvertes d'encore plusieurs centimètres de neige, et ce sur des périodes allant jusqu'à plusieurs jours. Cette situation met en jeu des phénomènes de transferts thermiques latéraux, accélérant la fonte et non pris en compte dans le modèle.

4.2.3.4 Conclusion sur les simulations d'épisodes

Les trois épisodes présentés permettent d'observer la capacité du modèle à reproduire avec précision le comportement d'une couche de neige se déposant sur une chaussée. En absence de neige, le modèle est capable de reproduire avec précision l'évolution de température de surface du revêtement. De même, le modèle simule avec précision l'impact de la neige sur la température de surface au moment de la chute.

Certaines différences se sont révélées concernant la hauteur de neige présente sur le revêtement. Plusieurs causes peuvent en être la source : l'incertitude associée aux précipitations mixtes (mélange ou alternance de pluie et de neige), une densité différente entre la neige simulée et observée, ou encore des phénomènes non modélisés (transport de neige par le vent). Le modèle permet également de simuler avec précision le type de neige à l'interface, notamment la présence d'une couche de neige totalement saturée en eau liquide. Le troisième épisode présenté permet également de voir les limites du modèle. En effet, le modèle ne permet pas de reproduire avec précision le processus de fonte naturelle. L'hétérogénéité spatiale de la fonte naturelle fait intervenir des phénomènes de transferts thermiques latéraux, accélérant la fonte et non pris en compte dans le modèle.

Le but du modèle est de devenir un outil d'aide à la décision pour les services d'exploitation, donc l'intérêt principal est la prévision de l'occurrence de neige sur la chaussée plutôt que la hauteur totale ou la fonte naturelle. En effet, les services d'exploitation vont intervenir avec un déneigement dès la moindre présence de neige sur la chaussée. Ainsi, malgré quelques différences concernant la hauteur totale ou la fonte naturelle trop tardive, le modèle couplé ISBA-Route/CROCUS a prouvé sa capacité à décrire avec précision l'occurrence de la neige, au cours des trois épisodes.

On s'intéresse dans la suite de cette section non plus à des épisodes particuliers, mais à des simulations à long terme, sur les hivers de la campagne expérimentale.

4.2.4 Résultats de simulations pour les hivers entiers

Le modèle a ensuite été validé à partir de simulations sur l'intégralité de l'hiver, pour les trois hivers de la campagne expérimentale, sans réinitialisation (excepté les déneigements manuels qui ont été intégrés dans le modèle). L'hiver 1998/99 (du 1/11/98 au 30/04/99) est celui parmi les trois hivers de la campagne comportant le plus grand nombre d'épisodes neigeux (28 épisodes). Les figures en annexe C montrent les résultats du modèle, température de surface de la chaussée et hauteur de neige, pour l'intégralité de l'hiver. Les résultats concernant les hivers 1997/98 et 1999/00 sont présentés sous forme statistique.

4.2.4.1 Résultats de simulations pour l'hiver 1998/99

Les figures 4.6 et 4.7 montrent les résultats de simulation pour les mois de décembre et janvier de l'hiver 1998/99. Les résultats du mois de mars, représentant une période printanière pendant laquelle les chaussées se sont déneigées naturellement, sont montrés sur la figure 4.8. Les résultats des simulations des mois de novembre, février et avril sont présentés en annexe sur les figures C.1, C.4 et C.6.

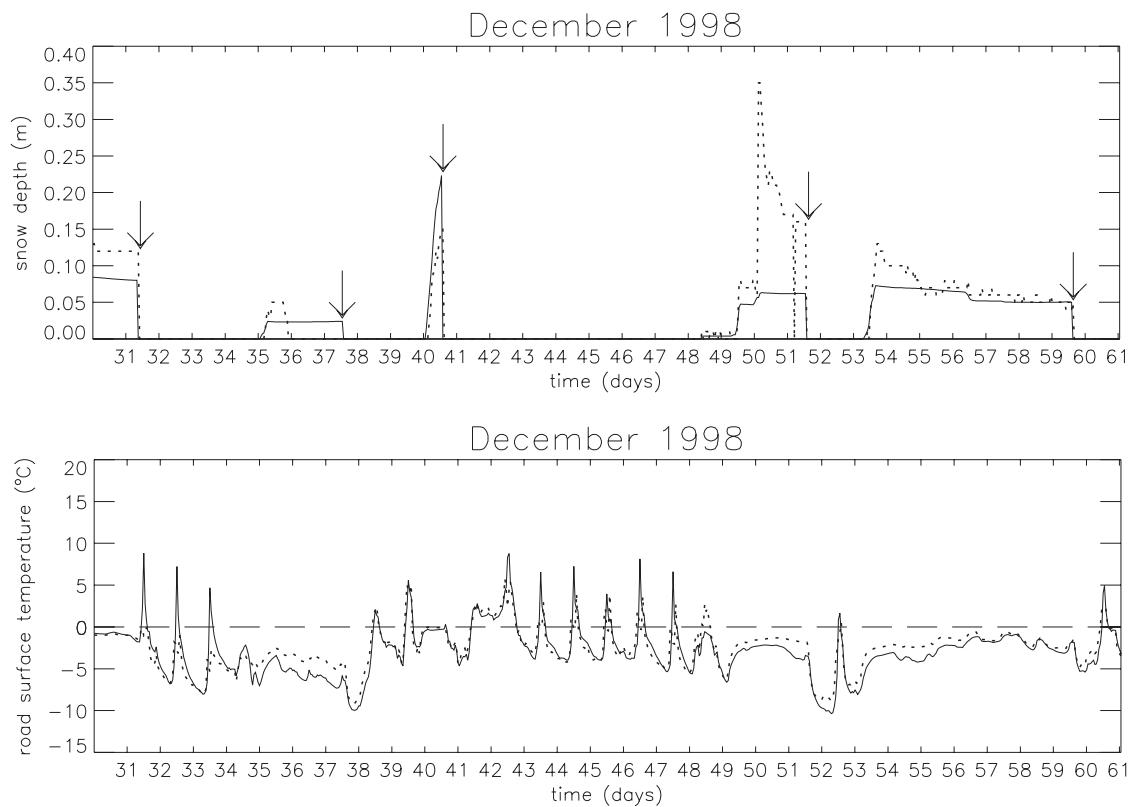


Figure 4.6 : Comparaison pour le mois de décembre 1998 a) des hauteurs de neige simulées (trait continu) et mesurées (trait discontinu), simulation de la hauteur de neige saturée en eau liquide (trait épais) et déneigement manuel (↓) b) des températures de surface simulées (trait continu) et mesurées (trait discontinu).

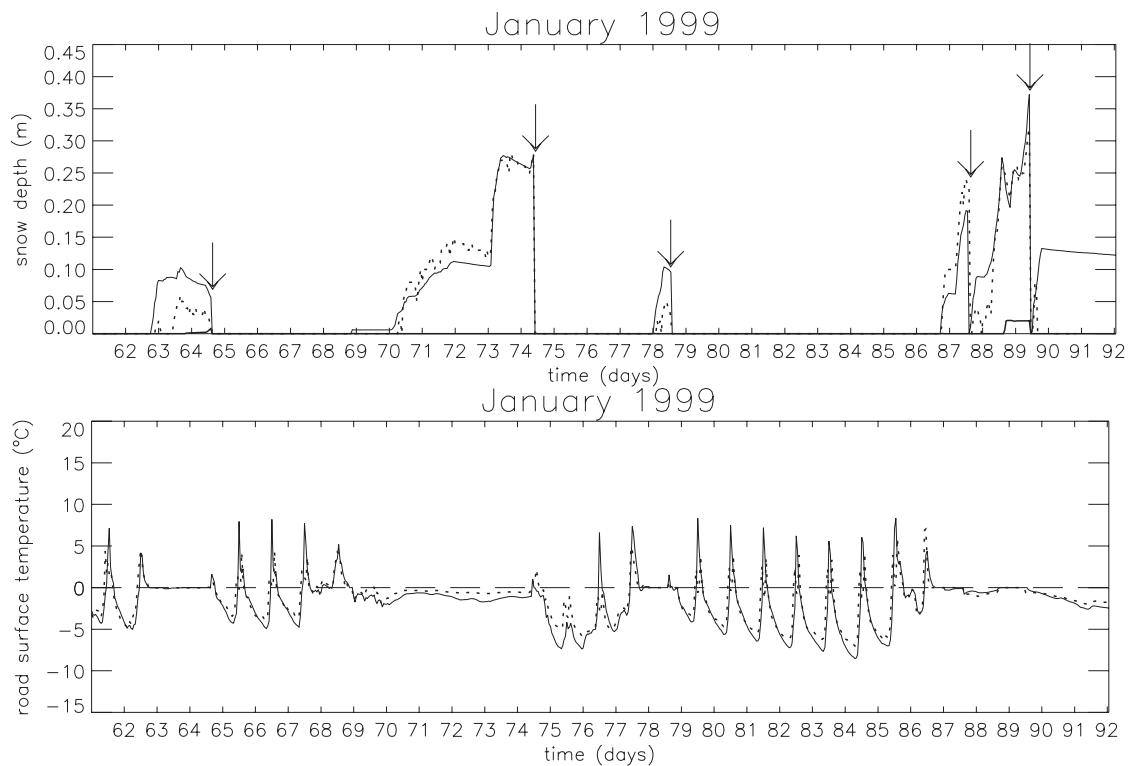


Figure 4.7 : Identique à la figure 4.5, pour le mois de janvier 1999.

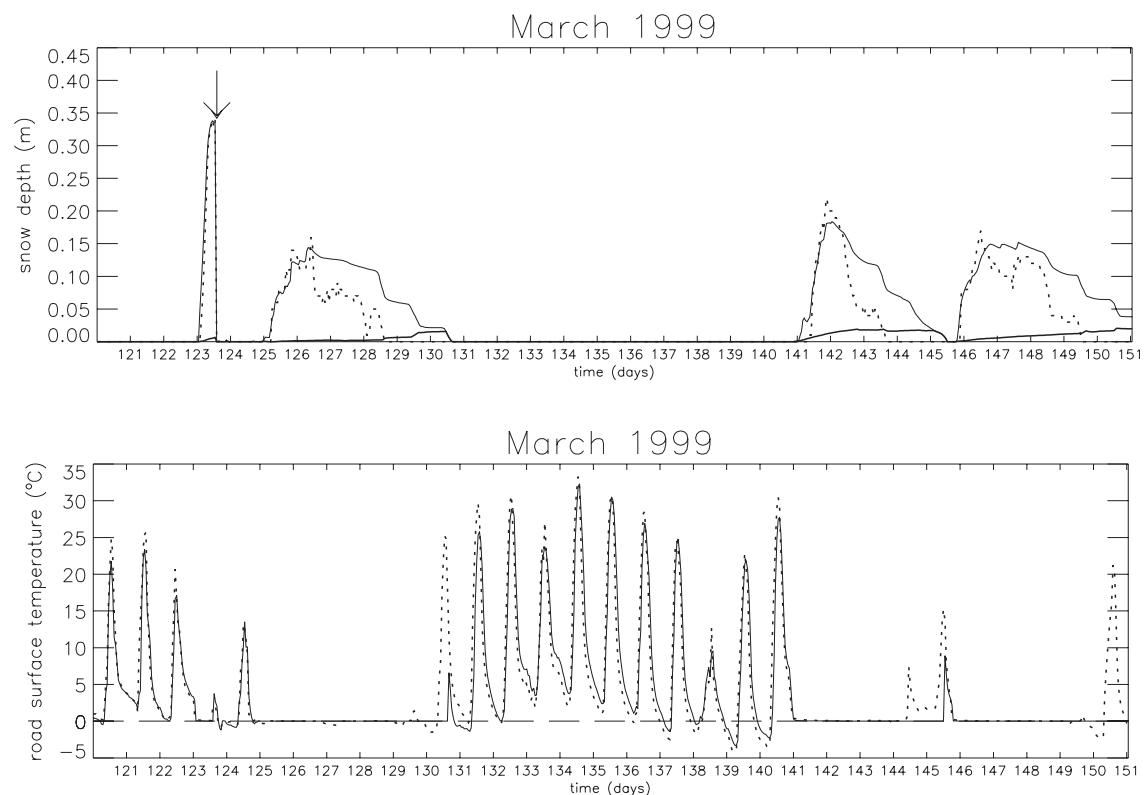


Figure 4.8 : Identique à la figure 4.5, pour le mois de mars 1999

4.2.4.2 Analyse des résultats

Episodes neigeux

Un examen détaillé des enregistrements vidéos a permis la validation du modèle au cours des périodes de panne du capteur de hauteur de neige, ou lorsque la hauteur de neige était inférieure à la limite de détection du capteur. Ceci fût notamment le cas lors des jours simulés 13, 26, 69 et 162 (où la neige semblait tenir sur la chaussée plus tôt dans la simulation) et des jours 36, 37, 90, 91, 92 (où la chaussée était effectivement recouverte de neige malgré l'absence de mesures du capteur). Le problème de la formation d'une congère le 21 décembre 1998 (jours 50 et 51) a été détaillé dans la section 4.2.3.2, lors de la description du second épisode. Au cours du mois de février, l'expérimentation a été interrompue à cause de conditions météorologiques déplorables. A la fin de l'hiver (mars et avril), les conditions météorologiques relativement chaudes ont permis une fonte naturelle dans la majorité des cas.

Cependant, comme il a été expliqué dans la section 4.2.3.3, l'hétérogénéité de la fonte naturelle engendra des différences entre la fonte naturelle et la fonte unidimensionnelle simulée. Des différences significatives entre les hauteurs de neige simulées et mesurées ont pu être observées au cours des jours 10, 13, 40, 63, 78 et 158. Ces épisodes correspondent à des chutes de pluie se transformant en neige ou de mélanges pluie/neige, donc associés à une incertitude sur la détermination de la phase des précipitations.

Température de surface

L'évolution de la température de surface est bien reproduite par le modèle. Les principales différences se situent au cours des épisodes soumis à la fonte naturelle. La fonte plus tardive de neige dans le modèle entraîne une dérive de la température simulée (par exemple au cours des jours 130, 144 et 150 sur la figure 4.8). Hormis ces exceptions, le modèle parvient à simuler avec précision les fortes amplitudes mises en jeu à la fin de l'hiver (figure 4.8) et les températures très négatives de l'hiver (figures 4.6 et 4.7).

En présence de neige, le modèle parvient à simuler avec précision la température d'interface. En effet, la présence d'eau liquide (température de surface simulée et mesurée à 0°C) est bien reproduite. On peut le voir notamment pour les épisodes se produisant au mois de mars (figure 4.8). Les épisodes de neige sèche à l'interface (température de surface négative) sont également

bien reproduits par le modèle. On le voit par exemple pour les épisodes du mois de décembre (figure 4.7).

La comparaison des températures de surface mesurées et simulées au début de l'enneigement permet de confirmer la simulation précise de la présence de neige sur la chaussée.

Formation d'une couche de neige saturée en eau liquide

Des mesures manuelles de la hauteur de neige saturée en eau liquide ont été effectuées 12 fois au cours de cet hiver. Le tableau 4.3 compare ces hauteurs mesurées avec celles simulées.

date :	27/10/98	12/11/98	14/11/98	16/11/98	26/11/98	6/12/98
Hauteur de neige saturée simulée (cm)	1.2	0.25	0.33	0	0	0
hauteur de neige saturée mesurée (cm)	1.1	0.3	1	0.1	0	0
date :	4/01/99	5/02/99	6/03/99	22/03/99	23/03/99	27/03/99
Hauteur de neige saturée simulée (cm)	0.79	0	0.02	0.68	1.64	0.38
hauteur de neige saturée mesurée (cm)	0.7	0	interface humide	1	0.5	0.5

Tableau 4.3 : Comparaison de la hauteur de neige saturée en liquide simulée et mesurée lors des déneigements manuels, pour l'hiver 1998/99.

On peut ainsi remarquer une bonne correspondance entre les hauteurs de neige saturée mesurées et simulées, excepté pour quelques cas.

Une chute de pluie et neige mélangée est intervenue le 14 novembre 1998, donc associée à une incertitude sur la quantité d'eau liquide précipitée. Les mesures du 16 novembre 1998 ont été effectuées au début de l'épisode, qui s'est produit immédiatement après le déneigement manuel de l'épisode précédent. Ainsi la présence d'une couche de neige saturée de faible épaisseur à ce moment est probablement due à de l'eau liquide résiduelle.

Les 22 et 23 mars, deux mesures ont été effectuées pour le même épisode, afin de suivre l'évolution de la couche saturée. Le 22 mars, la couche saturée observée était supérieure à celle simulée, probablement à cause d'une température mesurée supérieure au début de la chute, entraînant un flux de conduction plus important et ainsi plus de fonte que dans la simulation. Pour la seconde mesure, on observe que la hauteur de couche saturée a diminué et est devenue plus faible que dans la simulation. Ces différences sont probablement causées par les différences entre les types de grains simulés et observés.

Cependant, il est important de noter que dans la plupart des cas, le modèle simule correctement la présence ou l'absence d'une couche de neige saturée en eau liquide. Ces résultats ponctuels ont également été confortés par la comparaison des températures de surface simulées et mesurées : une température de surface de 0°C indique dans la plupart des cas que l'on se trouve en présence d'une couche de neige saturée en eau liquide.

4.2.4.3 Résultats statistiques pour les 3 hivers de la campagne

Les résultats obtenus au cours de deux autres hivers de la campagne se sont montrés similaires. Le tableau 4.4 montre les résultats pour les 3 hivers, sous forme statistique.

	Température de surface		Température à 60cm		Hauteur de neige	
	RMSE (°C)	ME (°C)	RMSE (°C)	ME (°C)	RMSE (m)	ME (m)
Hiver 1997/1998	3.941	-0.381	1.276	0.706	0.074	0.024
Hiver 1998/1999	2.792	-0.410	0.995	0.558	0.097	-0.013
Hiver 1999/2000	2.154	0.389	1.377	1.223	0.123	-0.063

Tableau 4.4 : Résultats statistiques (Erreur moyenne ME et Ecart quadratique moyen de l'erreur RMSE) sur les comparaison des simulations et des mesures pour la température de surface, la température à 60cm de profondeur, et la hauteur de neige, pour les hivers 1997/98, 1998/99 et 1999/2000.

Concernant la simulation de température de surface, on peut observer que pour l'hiver 1997/98 l'écart quadratique moyen de l'erreur (RMSE) est supérieur à ceux des deux autres hivers. Cette différence est due aux conditions expérimentales à la fin de l'hiver. Le modèle n'a pas reproduit la fonte rapide intervenue sur la chaussée du 10 au 30 avril (période avec trois chutes de neige sans déneigements manuels). Durant quelques jours au cours de cette période, le modèle simulait une chaussée encore enneigée, avec une température de surface de 0°C, tandis que la route était déneigée et avec une température de surface atteignant jusqu'à 45°C. L'exclusion de cette période a montré que l'on peut considérer que les résultats sont stables d'un hiver à l'autre, avec un écart quadratique moyen de l'erreur d'environ 3°C concernant la température de surface et d'environ 1°C concernant la température à 60 cm de profondeur.

Les statistiques concernant la hauteur de neige sont quant à elles très peu représentatives des résultats réels, du fait du nombre important d'erreurs de mesure du capteur durant certaines périodes. Cependant, les résultats graphiques se sont montrés similaires à ceux présentés pour l'hiver 1998/99.

L'écart quadratique moyen sur la température à 60 centimètres de profondeur est similaire pour les trois hivers, et il est de l'ordre du degré.

4.2.4.4 Température à 60cm de profondeur

Afin de vérifier la capacité du modèle à être utilisé dans un contexte opérationnel, il a été nécessaire de s'assurer de l'absence de biais à long terme. La figure 4.9 compare les résultats de la simulation de température à 60cm de profondeur avec la mesure, pour l'hiver 1998/99.

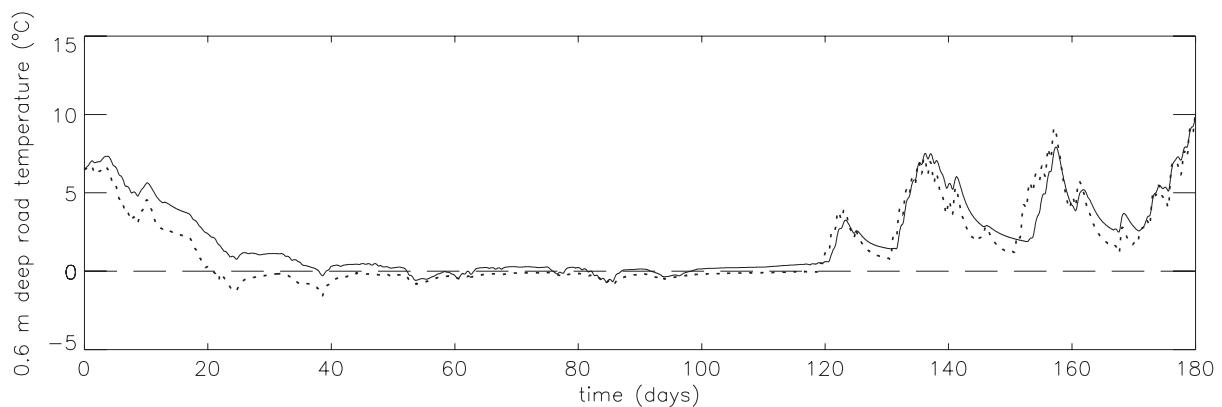


Figure 4.9 : Comparaison des températures à 60cm de profondeur simulées (trait continu) et mesurées (trait discontinu), pour l'hiver 1998/99.

La forme générale de l'évolution de température est bien reproduite. Les différences les plus importantes se produisent au début de la simulation (novembre) et durant le printemps. Afin d'expliquer ces différences entre la simulation et la mesure, des tests complémentaires ont été effectués.

La température à une profondeur de 35cm a été comparée à la mesure, avec différentes conditions limites par rapport au cas de la simulation initiale. Dans le premier test de sensibilité, seule la chaussée était discrétisée (de la surface à 60cm de profondeur) avec comme conditions limites inférieures et supérieures les températures mesurées. Dans le second test, les conditions étaient les mêmes que pour le premier test, avec uniquement la température mesurée à 60cm fixée comme condition limite inférieure. Dans le troisième test, l'intégralité du sol (jusqu'à environ 10m) était discrétisée et seule la température de surface mesurée était fixée comme condition limite supérieure. Les conditions initiales sont identiques dans tous les tests, et sont celles utilisées dans la simulation initiale. Les résultats sont montrés sur les figures 4.10a à 4.10d.

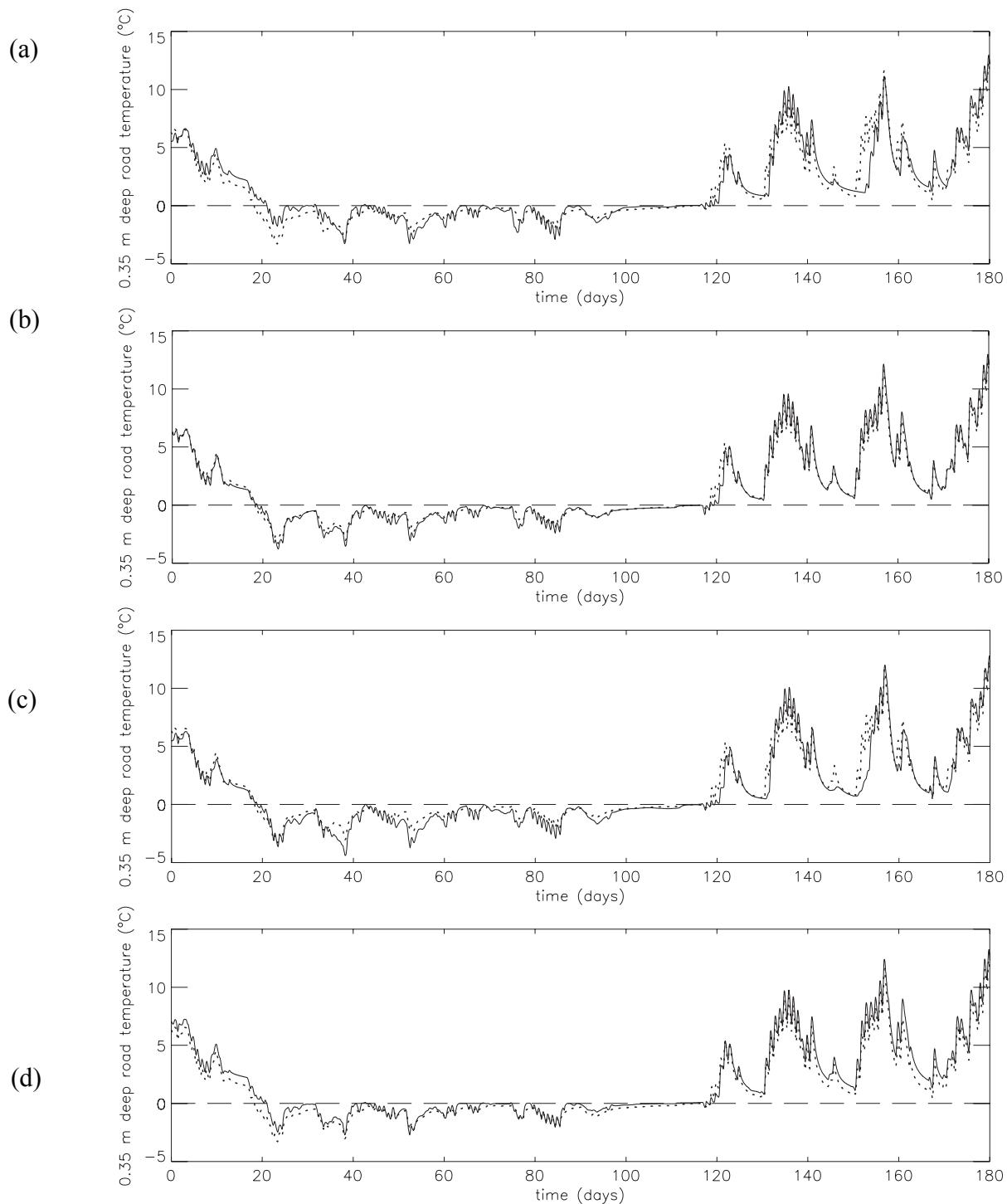


Figure 4.10 : Comparaison pour l'hiver 1998/99 des températures à 35cm de profondeur simulées (trait continu) et mesurées (trait discontinu), pour différentes condition : (a) simulation initiale, (b) simulation initiale avec comme conditions limites inférieures et supérieures les températures mesurées à 60 cm de profondeur et en surface, (c) simulation initiale avec la température mesurée à 60cm de profondeur prescrite comme condition limite inférieure, (d) simulation initiale avec la température mesurée en surface prescrite comme condition limite supérieure.

Les résultats de simulation avec les températures mesurées (en surface et en profondeur) fixées comme conditions limites (figure 4.10b) nous permettent de déduire que la mauvaise simulation de température à 35cm n'est pas due aux propriétés thermiques de la chaussée. Cependant, quelques différences peuvent être observées lorsque la température se situe aux alentours de 0°C (par exemple pour les jours 75 et 120). Ces différences sont probablement dues à des changements de phase. Dans le modèle, la teneur en eau des différents matériaux a été considérée comme constante, avec comme valeur la teneur moyenne des différents types de matériaux. Cependant, comme il a pu être observé sur le site, les chaussées expérimentales n'étaient pas totalement imperméables : des flux d'eau liquide ont été observés entraînant ainsi des variations temporelles du contenu en eau.

Les résultats des simulations avec soit la température de surface mesurée ou soit la température mesurée à 60cm fixée comme condition limite (figures 4.10c et 4.10d), ont montré que la dérive de température à 35cm était due à la combinaison des dérives de température en surface et en profondeur. Les propriétés du sol naturel (conductivité thermique, densité, teneur en eau, porosité) ainsi que les températures n'ont pas été mesurées sur le site (ces mesures sont extrêmement rares). C'est pourquoi une simulation préliminaire sur 10 ans avec le forçage observé sur le site a été effectuée, afin d'obtenir un équilibre des températures profondes. Cependant, il a probablement existé une légère variabilité inter-annuelle, non prise en compte dans cette étude (de plus les tests de sensibilité effectués en section 4.2.2 ont montré une faible sensibilité du modèle aux températures et aux propriétés du sol naturel).

4.2.4.5 Sensibilité à la rétention en surface du revêtement

Afin de quantifier la sensibilité du modèle au paramètre C_{ret} , un test de sensibilité sur le revêtement utilisé a été effectué. Il a consisté à comparer la hauteur de neige et de neige saturée en eau liquide simulée sur l'hiver 98/99 pour 3 simulations : avec un coefficient de 0.01 (réception négligeable) pris comme simulation de référence, avec un coefficient de 0.2, un coefficient de 0.5 et avec un coefficient de 1 (réception totale). Les résultats (tableau 4.5) ont montré une très faible sensibilité du modèle.

	ME h _{sat} (cm)	RMS h _{sat} (cm)	ME h _{tn} (cm)	RMS h _{tn} (cm)
C _{ret} = 0.2	-0.002	0.014	-0.0003	0.020
C _{ret} = 0.5	-0.003	0.019	-0.0003	0.025
C _{ret} = 1	-0.004	0.032	0.016	0.067

Tableau 4.5 : Résultats statistiques (Erreur moyenne ME et Ecart quadratique moyen RMS) sur la sensibilité du modèle au coefficient de rétention C_{ret} sur la hauteur de neige et de neige saturée en eau liquide.

Concernant la hauteur de la couche saturée, les résultats des tests nous montrent une faible sensibilité du modèle à la rétention des chaussées. En effet, les quantités d'eau liquide en surface des revêtements sont faibles et ne sont qu'une faible partie du réservoir d'eau liquide de la couche saturée, la majeure partie provenant de la fonte. De la même manière, les valeurs de l'erreur moyenne et de l'écart quadratique moyen sont encore plus faibles pour la hauteur de neige totale sur la chaussée (relativement à la hauteur de neige totale qui est beaucoup plus grande que la hauteur de neige saturée). Ainsi, ces tests nous prouvent que le modèle est peu sensible à la valeur du coefficient de rétention.

On peut remarquer que les valeurs sont légèrement plus élevées pour le cas du coefficient de rétention pris égal à 1 (rétenzione totale). Ceci est dû à une possible différence entre l'interface route/neige pour ce cas. En effet, en cas de chute de neige sèche sur une chaussée humide, l'absence de remontées capillaires engendrera une interface de type neige sèche sur chaussée sèche, donc un flux de conduction moins élevé que pour les autres cas (présence d'eau liquide à l'interface). Cette diminution du flux de conduction est la cause d'une hauteur de neige légèrement plus forte (erreur moyenne positive) en absence de remontées capillaires. De la même manière, l'absence de remontées capillaires du réservoir de surface de la chaussée n'entraînera pas de couche de neige saturée, alors que pour les autres valeurs du coefficient, les remontées capillaires peuvent engendrer une couche de neige saturée d'épaisseur très faible (ordre du millimètre).

4.2.4.6 Conclusion sur les simulations à long terme

Les résultats obtenus sur les trois hivers de la campagne expérimentale confirment les résultats présentés pour trois épisodes typiques. En effet, l'évolution de température de surface est simulée avec précision par le modèle, avec un écart quadratique moyen de l'erreur d'environ 3°C. De plus, cet écart quadratique prend en compte les dérives de températures dues à la fonte naturelle simulée trop tardivement dans le modèle.

Les épisodes neigeux sont simulés avec précision au cours des trois hivers de la campagne, bien que quelques différences sur la hauteur de neige totale existent. Ces différences ont déjà été mises en avant au cours des trois épisodes présentés en section 4.2.3. De la même manière, le modèle parvient à simuler la présence d'une couche de neige saturée en eau liquide à l'interface.

On s'est également intéressé dans ce paragraphe aux températures en profondeur. Les simulations effectuées ont permis de conclure que le modèle est capable de simuler avec précision la température, avec un écart quadratique moyen de l'erreur d'environ 1°C pour la température à 60cm de profondeur. De plus aucun biais à long terme n'a été détecté. Les tests effectués sur la température à 35cm de profondeur ont montré que les dérives de température à 35cm de profondeur étaient dues à la combinaison des dérives de température en surface et en profondeur.

4.3 Utilisation du modèle de neige ISBA-ES

Afin d'apprécier l'apport de l'utilisation dans le couplage du modèle de neige complexe CROCUS, une simulation a été effectuée sur la saison 1999/99 de l'expérimentation Gelcro, avec le modèle de neige ISBA-ES (Boone et Etchevers 2001). Les conditions (profil de température dans le sol, déneigements manuels) pour cette simulation sont identiques à celles de la simulation originelle avec CROCUS. Les résultats statistiques sont montrés sur le tableau 4.6.

	Température de surface		Snow Depth	
	RMS (°C)	ME (°C)	RMS (m)	ME (m)
ISBA-Route/CROCUS	2.792	-0.410	0.097	-0.013
ISBA-Route/ISBA-ES	3.271	-1.111	0.102	-0.004

Tableau 4.6 : Comparaison (Erreur moyenne ME et Ecart quadratique moyen RMS) de la hauteur de neige et de la température de surface pour l'utilisation du modèle ISBA-Route avec deux schémas de neige : CROCUS (Brun et al. 1989, 1992) et ISBA-ES (Boone et Etchevers 2001).

L'augmentation de l'erreur moyenne et de l'écart quadratique moyen sur la température de surface nous montre une dégradation des résultats de la simulation de l'évolution de température de surface. Les simulations étant équivalentes (même profils initiaux dans la route

et même forçage atmosphérique), la dégradation de l'évolution de la température de surface est donc équivalente à une dégradation de la simulation de présence de neige sur la chaussée. Comme il a été expliqué en section 4.2.4.3, les scores concernant la hauteur de neige sont peu représentatifs, du fait du nombre important d'erreurs de mesure du capteur. Cependant, l'écart quadratique moyen augmente, mais relativement faiblement. Cette augmentation est faible car les différences se situent essentiellement pour les manteaux neigeux de faible épaisseur, donc notamment au moment de la tenue de la neige. Ainsi, ces différences se situent au cœur du problème de la viabilité hivernale. Un exemple d'épisode est montré en figure 4.11.

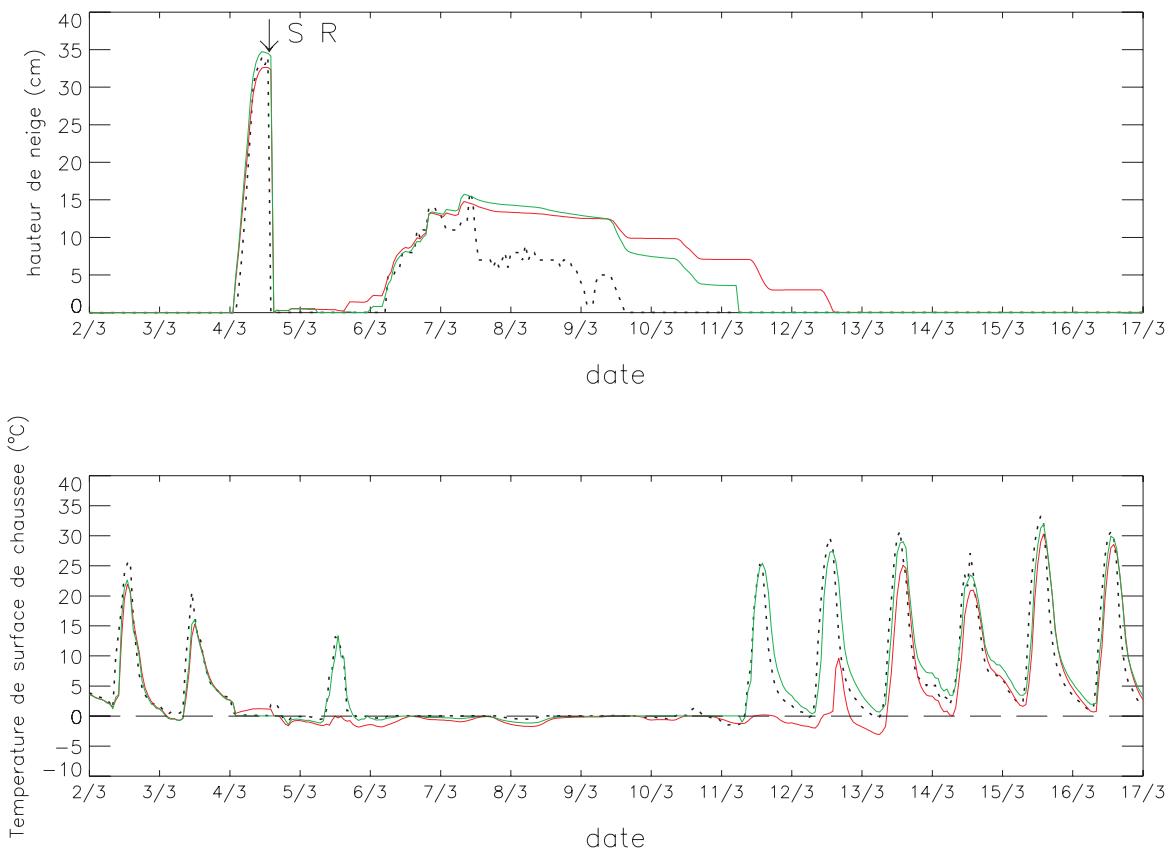


Figure 4.11 : Comparaison pour la période du 2 au 17 mars a) des hauteurs de neige mesurées (trait discontinu) et des hauteurs de neige simulées avec le modèle ISBA-Route couplé avec CROCUS (trait continu vert) et couplé avec ISBA-ES (trait continu rouge), avec présence d'un déneigement manuel (\downarrow SR). b) des températures de surface mesurées (trait discontinu) et simulées avec le modèle ISBA-Route couplé avec CROCUS (trait continu vert) et couplé avec ISBA-ES (trait continu rouge).

On peut voir sur la figure 4.11 l'intérêt de l'utilisation d'un modèle détaillé, et donc par conséquent l'importance d'une description précise de l'interface chaussée/neige, sur la

précision de la simulation de la tenue de la neige au sol. En effet, entre le 4 et le 6 mars, on peut voir sur les mesures une chute de neige qui ne tient pas au sol. Cet épisode est reproduit de façon correcte avec le modèle couplé ISBA-Route/CROCUS et est au contraire mal reproduit avec l'utilisation du modèle ISBA-ES, où la neige tient sur le sol. De la même manière, le problème de la limite du modèle causé par la fonte hétérogène qui a été mis en évidence au Col de Porte, est accentué avec l'utilisation du modèle ISBA-ES.

La simulation effectuée avec le modèle de neige ISBA-ES en place du modèle CROCUS nous montre l'intérêt d'utilisation d'un modèle de neige détaillé dans un problème de viabilité hivernale.

4.4 Sensibilité au revêtement (site du LRPC Nancy)

Afin de tester la sensibilité du modèle à différents types de revêtements, des simulations ont été effectuées à partir de données provenant du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Nancy, où plusieurs échantillons de revêtements de chaussées ont été installés sur le parking. Cette étude se situe parallèlement aux travaux menés par le LRPC, qui consistent à étudier de manière expérimentale le comportement hivernal des différents types de revêtement (Marchetti et al. 2006a), ainsi que l'influence des fondants routiers. Cette étude complémentaire est relative à la modélisation numérique. Il s'agit ici de tester le modèle afin de voir s'il est capable de modéliser le comportement thermique des différents types de revêtements, de même que les différences à l'enneigement et au déneigement. On s'intéresse donc ici uniquement à des chaussées non traitées avec des fondants.

4.4.1 Les données expérimentales

Chaque revêtement a une épaisseur de 4cm. Des sondes de température en surface et en profondeur permettent de suivre l'évolution de température des différents revêtements. Les sondes de température sont des sondes platines, elles ont une précision de ± 0.2 °C. Une webcam permet de suivre l'enneigement des différents revêtements. Le site est présenté sur la figure 4.12.



Figure 4.12 : Site expérimental du LRPC Nancy.

Les données des différents revêtements utilisés pour cette étude et les données météorologiques d'entrée du modèle sont présentées dans cette section.

4.4.1.1 Les revêtements utilisés

Plusieurs types de revêtements ont été utilisés au cours de cette étude, dont les différences se situent soit au niveau du type de granulat utilisé, soit au niveau du revêtement lui-même. Deux types de revêtement ont été utilisés :

- Béton-Bitumineux Semi-Grenus (BBSG)
- Béton Bitumineux DRainant (BBDR).

Les différents revêtements ont tous la même superficie (60x40 cm) et la même épaisseur (4cm). Les conductivités thermiques et les densités des différents revêtements utilisés pour cette étude ont été mesurées expérimentalement (Ouadi et al., 2000).

Par contre, les propriétés de surface n'ont quant à elles pas été mesurées, mais estimées à partir de tests de sensibilité. La longueur de rugosité étant dépendante de la configuration du site, elle a été prise comme constante pour tous les types de revêtements. La valeur utilisée est une hauteur de rugosité $z_0=10^{-4}$ m. De même, pour l'émissivité, une valeur constante de 0.96 a été affectée à tous les revêtements.

Les propriétés physiques qui diffèrent selon le type de revêtement sont récapitulées dans le tableau 4.7 :

Revêtement	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Albédo
BBSG type A	2190	1.67	0.09
BBDR type A	1841	1.04	0.09
BBDR type A dépigmenté	1841	1.04	0.3
BBSG type B	2335	1.15	0.09
BBDR type C	2330	0.56	0.09

Tableau 4.7 : Propriétés physiques des revêtements du site du LRPC de Nancy utilisées au cours de cette étude.

Concernant les enrobés drainants, la porosité des revêtements a également été mesurée, cependant ces propriétés sont relatives à une étude menée par le LRPC en collaboration avec des industriels. Ces mesures sont confidentielles et les données correspondantes n'ont pas été communiquées. Le modèle utilise donc les valeurs de porosité des enrobés drainants issues de la littérature. La valeur de porosité des enrobés drainants neufs varie entre 15% et 25% (Bäckstrom et al. 2000, Isenring et al. 1990). La valeur inférieure de 15% a été utilisée dans cette étude. Un test de sensibilité à la porosité du revêtement est donné en section 4.4.4.

Dans le but de tester la sensibilité du modèle à différents types de revêtement, les données météorologiques d'entrée se devaient d'être relativement précises, afin de limiter les incertitudes relatives aux entrées du modèle.

4.4.1.2 Les données de forçage météorologique

Les données météorologiques utilisées comme forçage d'entrée pour le modèle proviennent du Centre Département Météorologique de Nancy Tomblaine, située à 200 mètres du LRPC. Les mesures disponibles depuis cette station, sont :

- la température de l'air à 2m
- la vitesse du vent à 10m
- l'humidité relative de l'air
- les précipitations totales (pluie + neige)
- le rayonnement solaire visible direct et diffus
- la nébulosité

La station météorologique ne mesurant pas le rayonnement infrarouge incident, le rayonnement issu du modèle d'analyse SAFRAN a été utilisé. Le modèle d'analyse SAFRAN permet la spatialisation et l'interpolation horaire des observations météorologiques disponibles. Ce modèle est utilisé pour l'utilisation du modèle dans un contexte de prévision, et il est présenté en section 5.2.1.

Concernant le type des précipitations (pluie ou neige), les données météorologiques provenant de la station fournissent uniquement une observation manuelle de "hauteur de neige fraîche depuis la dernière observation". Cependant, le pas de temps de cette observation est très variable (de 1 heure à plusieurs heures) et il est ainsi impossible de déterminer avec précision la phase des précipitations à partir de ce paramètre. C'est pourquoi, deux forçages de précipitations ont été constitués.

Le premier forçage utilise les précipitations totales mesurées et est complété avec une détermination du type de précipitations selon la température de l'air mesurée:

- proportion de neige = 1 si $T_{\text{air}} \leq 0^{\circ}\text{C}$ (neige)
- proportion de neige = 0.8 si $0^{\circ}\text{C} < T_{\text{air}} \leq 0.5^{\circ}\text{C}$
- proportion de neige = 0.5 si $0.5^{\circ}\text{C} < T_{\text{air}} \leq 1.5^{\circ}\text{C}$
- proportion de neige = 0 si $T_{\text{air}} > 1.5^{\circ}\text{C}$ (pluie).

Le second forçage a été constitué avec la quantité et le type de précipitation issus du modèle SAFRAN en mode analyse.

Les précipitations issues du modèle SAFRAN analysées à partir des observations et sont interpolées à une maille de 8km. Ainsi, plusieurs divergences avec les observations provenant de la station météorologique existent pour ces précipitations (chutes de neige non observées, chutes de neige inexistantes, chutes de neige retardées ou avancées). A l'inverse, pour les précipitations reconstituées à partir des précipitations totales mesurées, les cas de précipitations neigeuses non observées sont rares, et correspondent à des faibles précipitations (inférieures à 0.2 mm d'équivalent en eau pendant 1 ou 2 heures, donc équivalent à des hauteurs de neige de l'ordre du millimètre). Ainsi ces faibles précipitations neigeuses ont pu exister et n'avoir pas tenu sur le sol, n'étant ainsi pas observées. La simulation s'intéressant aux épisodes neigeux, il a été nécessaire d'utiliser les précipitations neigeuses les plus précises.

Les précipitations reconstituées à partir de la température d'air mesurée et de la quantité de précipitation mesurée correspondent beaucoup mieux aux observations manuelles.

Le fichier de forçage utilisé en entrée du modèle utilise donc une majorité de données observées à la station météorologique voisine du site (température d'air, vent, humidité, nébulosité, quantité de précipitation et rayonnement visible). Ces données ont été complétées par le rayonnement infrarouge issu du modèle SAFRAN et une détermination du type de précipitation à partir de la température d'air observée.

4.4.2 Paramétrisations des revêtements

Parmi les revêtements utilisés dans cette étude, se trouvent des revêtements drainants. Les propriétés hydriques propres à ce type de revêtement : drainage vertical et flux latéral d'évacuation de l'eau liquide à la base du revêtement, ont été introduites dans le modèle ISBA-Route (section 3.3.1). Les équations du flux vertical (équation 3.34) et du drainage latéral (équation 3.65) sont rappelées dans cette section.

Le flux vertical est défini par :

$$F = -k \frac{\partial}{\partial z}(\psi + z) - \frac{D_{v\psi}}{\rho_w} \frac{\partial \psi}{\partial z}$$

Le drainage latéral pour le nœud à la base du revêtement drainant (indice k) est défini par :

$$S_{l,k} = - \frac{(2b_k+3)k_k}{w_k}$$

Ces flux font intervenir les propriétés suivantes :

- Conductivité hydraulique :

$$k = k_{sat} S_w^{2b+3}$$

- Potentiel hydrique

$$\psi = \psi_{sat} S_w^{-b}$$

La conductivité hydraulique et le potentiel hydrique font intervenir 3 constantes de paramétrisation :

- conductivité hydraulique à saturation k_{sat}

- potentiel hydrique à saturation ψ_{sat}
- coefficcient de rétention de l'eau liquide b .

Comme pour les propriétés thermiques, ces paramètres ne sont plus calculés à partir de la constitution du sol comme dans le modèle ISBA-DF (Boone et al. 2000), mais affectées à chaque nœud. Une étude préliminaire a dû être menée afin d'établir une paramétrisation de ces variables pour les revêtements drainants. De la même manière, l'ascension capillaire dans le manteau neigeux de l'eau liquide présente en surface des revêtements drainants a dû être paramétrisée.

4.4.2.1 Conductivité hydraulique à saturation

La valeur de la conductivité hydraulique à saturation donnée dans la littérature est $k_{\text{sat}}=1 \text{ à } 2 \text{ } 10^{-2} \text{ m s}^{-1}$ (Kok Chiew Chai et al. 2004, Di Benedetto et al. 1996). Cependant, cette conductivité hydraulique à saturation dépend du type de revêtement et diminue dans la durée de vie du revêtement, du fait des impuretés obstruant les pores du revêtement drainant. Ainsi, des tests de sensibilité ont été effectués afin de voir la sensibilité de la conductivité hydraulique à saturation sur l'écoulement. Pour cela, le modèle a été utilisé avec un revêtement de porosité de 15%, saturé initialement et sans apport d'eau liquide (suppression des précipitations et de la condensation en surface), en condition d'écoulement libre. Les résultats sont montrés sur la figure 4.13.

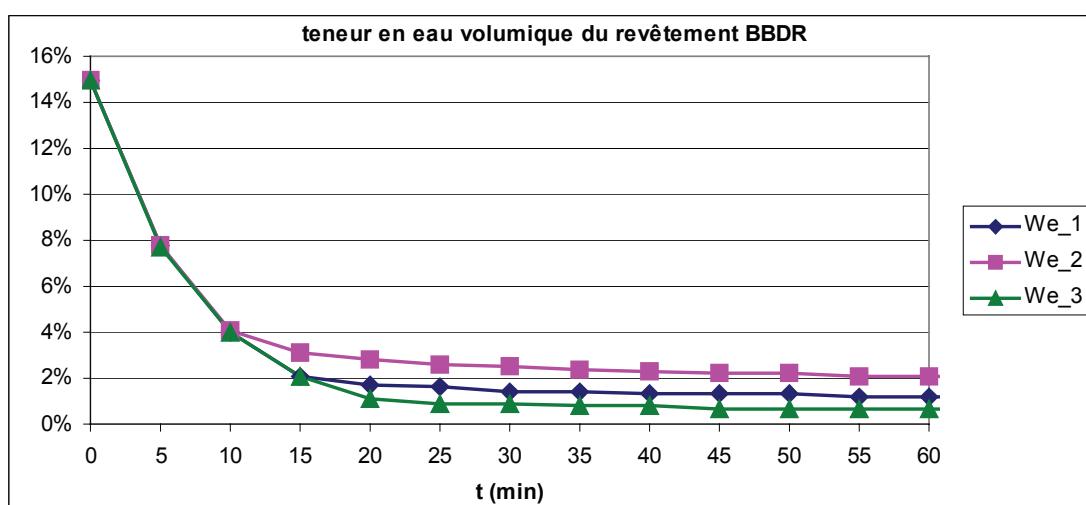


Figure 4.13 : Comparaison de la teneur en eau liquide volumique au sein d'un revêtement drainant, pour plusieurs valeurs de la conductivité hydraulique à saturation : $k_{\text{sat}}=10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$ (We_1), $k_{\text{sat}}=10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ (We_2) et $k_{\text{sat}}=10^{-1} \text{ m.s}^{-1}$ (We_3).

On peut voir qu'après un laps de temps d'une heure (donc un pas de temps du forçage du modèle), l'eau s'est quasiment intégralement écoulée du revêtement. Seule une faible quantité reste après quelques heures. L'écoulement dans les enrobés drainants étant fonction de la mise en oeuvre, de la pente, et de l'état de la route (impuretés obstruant les pores), la variabilité spatiale de l'écoulement est importante. De plus, le pas de temps de forçage des précipitations étant horaire, l'incertitude sur la répartition horaire des précipitations est également importante.

On peut en déduire que la paramétrisation de la conductivité hydraulique à saturation a peu d'influence sur l'écoulement. En effet, la quasi-totalité de l'eau liquide contenue dans le revêtement s'écoule sur une durée très inférieure au forçage, et la quantité d'eau résiduelle varie de quelques dixièmes de pourcent, bien qu'entre les cas extrêmes la conductivité hydraulique à saturation varie d'un facteur 100. De plus, l'incertitude sur la teneur en eau est importante (répartition horaire de la précipitation et variabilité spatiale de l'écoulement), il est ainsi impossible de modéliser avec précision les transferts hydriques.

Ainsi, dans le modèle couplé ISBA-Route/CROCUS, on utilisera la valeur moyenne de la littérature : $k_{sat} = 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$.

4.4.2.2 Coefficient de rétention

De la même manière, la sensibilité du modèle au coefficient de rétention b a été testée. Les résultats sont montrés sur la figure 4.14.

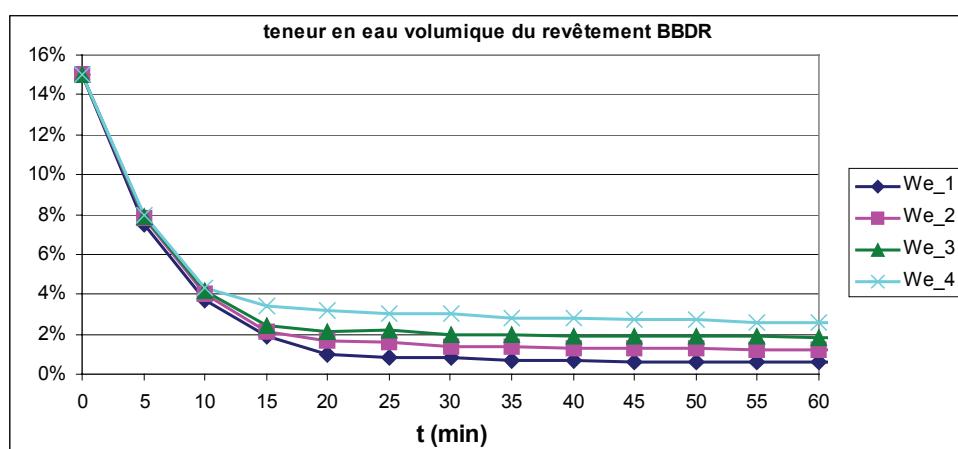


Figure 4.14 : Comparaison de la teneur en eau liquide volumique au sein d'un revêtement drainant, pour plusieurs valeurs du coefficient de rétention : $b=0.5$ (We_1), $b=1$ (We_2), $b=1.5$ (We_3) et $b=2$ (We_4).

Les expériences menées dans Bäckström et al. (2000) montrent qu'au bout de 1 à 2 minutes (selon la température), plus de 90% de l'eau versée en surface d'un revêtement drainant de 4.5mm est recueillie à la base. On peut donc estimer la rétention dans un revêtement à 10%, donc pour la porosité considérée à une teneur volumique de rétention de 1.5%. Ainsi, on peut observer que la rétention est trop forte pour un coefficient $b > 1$. Ainsi dans le modèle on adoptera un coefficient b de 1.

4.4.2.3 Potentiel hydrique à saturation

Le modèle ayant été paramétrisé avec les mêmes propriétés hydriques pour chaque nœud du revêtement drainant, la teneur en eau volumique varie peu entre chaque nœud pour un instant donné, ainsi les gradients potentiels sont négligeables. Donc le paramètre ψ_{sat} a peu d'influence sur l'écoulement. C'est pourquoi dans le modèle, le potentiel hydrique à saturation a été affecté avec une valeur utilisable pour tous les types de sols, $\psi_{sat} = -0.39$ m (Cosby et al. 1984).

Afin de s'assurer de la non sensibilité du modèle à ce paramètre, un test a été effectué avec un potentiel hydrique à saturation fixé à $\psi_{sat} = -0.1$ m et fixé à $\psi_{sat} = -1$ m. Les teneurs en eau volumiques diffèrent très peu par rapport au cas initial (l'écart quadratique moyen par rapport au cas initial est de 0.002% pour $\psi_{sat} = -0.1$ m et de 0.001% pour $\psi_{sat} = -1$ m). Donc on peut en déduire que le potentiel hydrique à saturation a effectivement une influence négligeable sur l'écoulement.

4.4.2.4 Rétention de la couche de surface pour les remontées capillaires

La rétention d'eau liquide au sein du revêtement a été estimée à 10% du volume (d'après les expériences de Bäckström et al 2000), ainsi la valeur limite du coefficient de rétention est fixée à une valeur de $C_{ret} = 0.1$. Cependant, la présence de neige modifie les conditions de rétention. En effet, à l'interface la neige étant intégrée dans les pores de la chaussée, la rétention n'est pas la même que pour le revêtement seul. On a une diminution de la porosité et une augmentation de la matière donc plus de surfaces courbes et ainsi une augmentation des forces de capillarité. Cependant, on se situe ici à une micro échelle impossible à modéliser avec le modèle utilisé. En effet, on se trouve en présence d'un phénomène tridimensionnel et anisotrope dépendant de la formes des pores dans la chaussée et de l'arrangement des grains de neige dans les pores. C'est pourquoi la paramétrisation adoptée est simple, elle permet de donner une valeur limite pour les remontées capillaires.

De plus, la rétention en surface de la chaussée doit être en accord avec la paramétrisation adoptée pour les transferts hydriques dans la chaussée. Avec la paramétrisation adoptée, c'est à dire une porosité de 15%, une conductivité hydraulique à saturation de 10^{-2} m.s⁻¹ et un coefficient de rétention de 1, la simulation en écoulement libre montre qu'indépendamment de la teneur initiale en eau liquide, après 1h de simulation, la teneur volumique en eau liquide est de l'ordre de 0.9%. Le coefficient C_{ret} correspondant à cette teneur volumique est de $C_{ret} = 0.06$. Cette valeur a été utilisée dans les simulations.

4.4.3 Les simulations

Les simulations ont été effectuées pour les 5 types de revêtements sur une période allant du 13 décembre 2003 au 31 mars 2004. Les revêtements étant installés sur le parking du LRPC, le sol utilisé en dessous du revêtement est la route et le sol utilisés lors de la validation du modèle au Col de Porte. L'initialisation de température a été effectuée à partir des mesures de température du revêtement, de la surface à une profondeur de 4cm, et à partir d'un bouclage sur 10 ans pour les températures profondes.

4.4.3.1 Simulation des températures des différents revêtements

Les figures 4.15 et 4.16 montrent les simulations et les mesures de température de surface des différents revêtements, respectivement pour la période du 9 janvier au 6 février 2004 et pour la période du 4 au 31 mars 2004. Les résultats de simulation pour le reste de la période sont donnés en annexe, sur les figures D.1 et D.3.

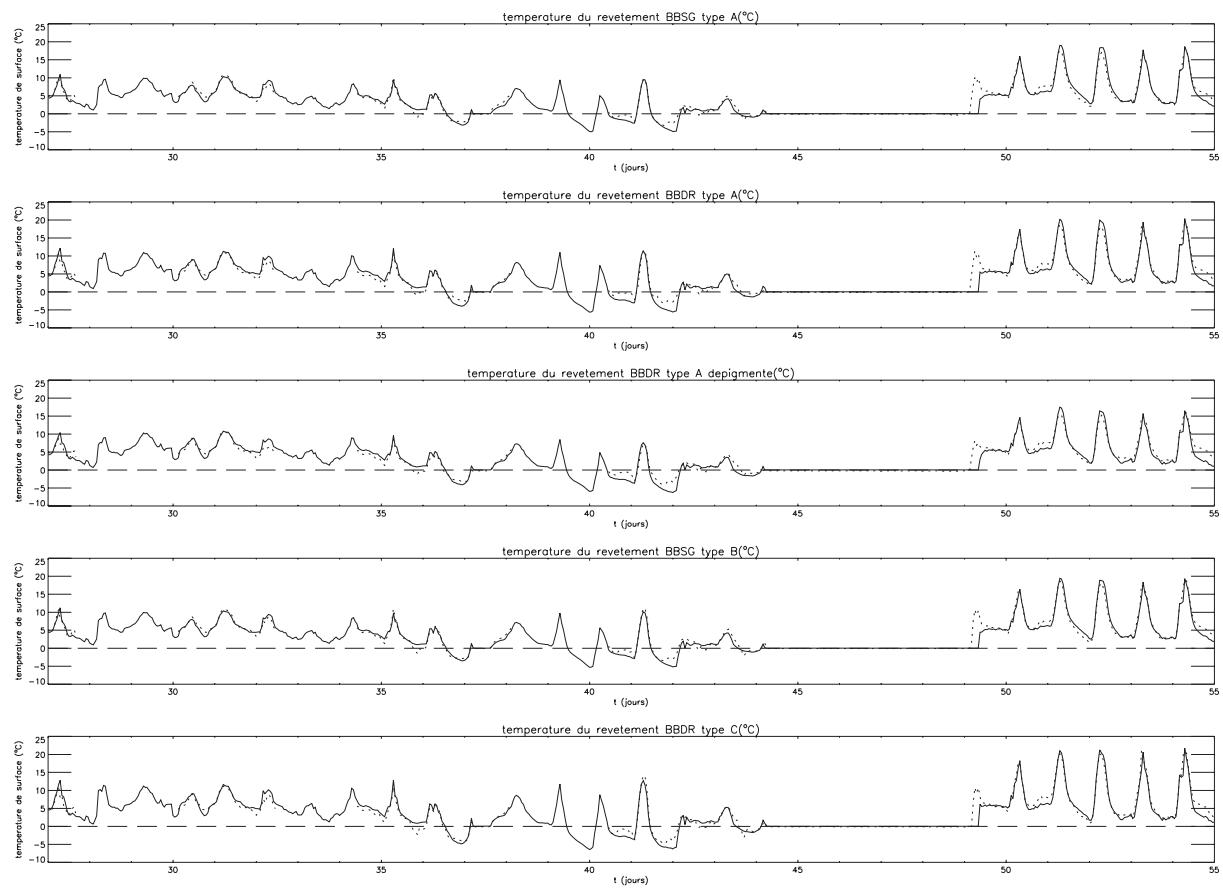


Figure 4.15 :Comparaison pour la période du 9 janvier au 6 février 2004 des températures de surface simulées (trait continu) et mesurées (trait discontinu).

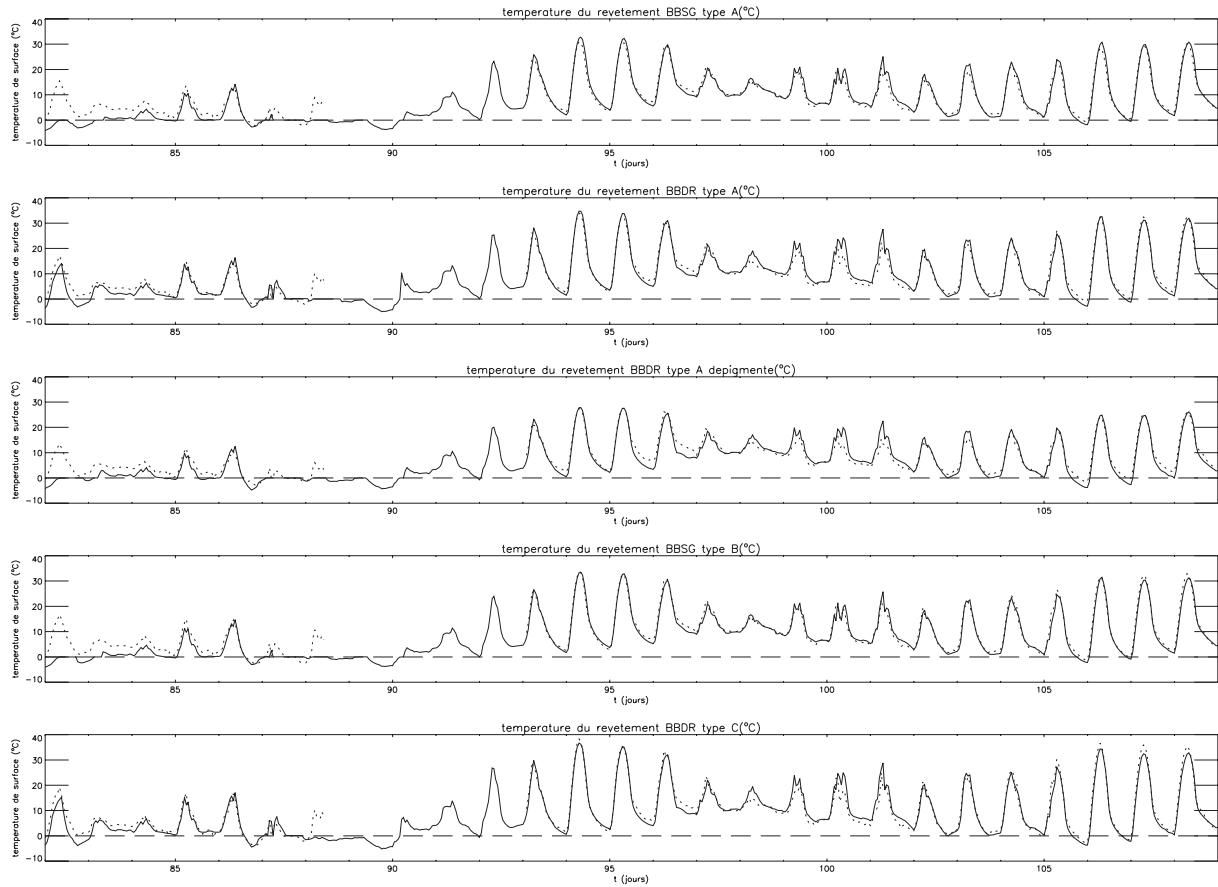


Figure 4.16 : Comparaison pour la période du 4 au 31 mars 2004 des températures de surface simulées (trait continu) et mesurées (trait discontinu).

Les courbes de température mesurée sont discontinues du fait des pannes du capteur. Pour les parties où la mesure existe, on voit que le modèle parvient bien à simuler l'évolution de température de surface des différents revêtements.

Les seules différences notables existantes (entre 72 et 83 jours de simulation, figure C.2 et 4.16), sont dues à une différence d'enneigement entre la simulation et la mesure. Les épisodes neigeux sont détaillés en section 4.4.3.2.

Afin de comparer pour chaque revêtement les températures, en surface mais également à une profondeur de -4cm, simulées et mesurées, les écarts quadratiques moyens et les erreurs moyennes sont calculés par rapport à la mesure (ainsi une erreur moyenne positive signifie que la température simulée est en moyenne supérieure à la température mesurée). Les résultats sont récapitulés dans le tableau 4.8.

REVETEMENT	ME_Ts	ME_T-4cm	RMS_Ts	RMS_T-4cm
BBSG Type A	-0.7	-0.6	2.5	2.2
BBDR Type A	-0.6	-0.4	2.5	2.1
BBDR Type A dépigmenté	-0.6	-0.8	2.3	2.1
BBSG Type B	-0.8	-0.7	2.6	2.3
BBDR Type C	-0.5	-0.5	2.7	1.9

Tableau 4.8 : Résultats statistiques (Erreur moyenne ME et Ecart quadratique moyen de l'erreur RMS) sur les comparaison des simulations et des mesures pour la température de surface et la température à 4cm de profondeur, pour les différents revêtements du site du LRPC de Nancy utilisés au cours de cette étude.

On peut ainsi voir que l'erreur moyenne et l'écart quadratique moyen sont relativement faibles et du même ordre de grandeur pour tous les revêtements (erreur moyenne et écart quadratique moyen de l'erreur respectivement de l'ordre de -1°C et 3°C en surface). On peut donc en déduire que le modèle simule bien l'évolution de température des différents revêtements. On s'intéresse maintenant à la différence de comportement thermique entre les revêtements.

Sur les graphiques, on peut voir que le modèle parvient à simuler les différences de comportement des revêtements, notamment lors des derniers jours de simulation (de $t=103$ à 109 jours, figure 4.15), où l'amplitude thermique journalière est très importante, et où la différence de température entre les revêtements est marquée.

Le tableau 4.9 montre les températures moyennes simulées et observées sur tous les revêtements.

REVETEMENT	Ts moyenne °C (mesure)	Ts moyenne °C (simulation)
BBSG Type A	4.7	4.0
BBDR Type A	4.9	4.3
BBDR Type A dépigmenté	3.9	3.3
BBSG Type B	4.8	4.0
BBDR Type C	4.8	4.2

Tableau 4.9 : Température de surface moyenne simulée et mesurée, pour tous les revêtements.

Le tableau 4.9 permet d'observer que les températures de surface moyennes sont similaires pour l'intégralité des revêtements (environ 5°C pour la simulation et 4°C pour la mesure), à

l’exception du revêtement BBDR Type A dépigmenté (environ 4°C pour la simulation et 3°C pour la mesure).

Afin de quantifier les différences réelles de comportement thermique des revêtements étudiés, l’écart quadratique moyen et l’erreur moyenne ont été calculés pour la température mesurée sur chaque revêtement, par rapport à la température mesurée sur le revêtement BBSG Type A, pris comme référence. Les même calculs ont été effectués avec les températures simulées. Les résultats sont récapitulés dans le tableau 4.10 :

REVETEMENT	ME / Ts (°C)	ME / T-4cm (°C)	RMS / Ts (°C)	RMS / T-4cm (°C)
BBSG Type A	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0	0.0 / 0.0
BBDR Type A	0.2 / 0.3	0.1 / 0.3	0.6 / 1.2	0.5 / 0.8
BBDR Type A dépigmenté	- 0.8 / - 0.7	- 0.5 / - 0.7	1.2 / 1.3	0.9 / 1.3
BBSG Type B	0.1 / 0.0	0.1 / 0.0	0.6 / 0.3	0.4 / 0.3
BBDR Type C	0.1 / 0.2	0.2 / 0.3	1.5 / 1.6	0.9 / 1.2

mesure/simulation

Tableau 4.10 : Différence de comportement (Erreur moyenne ME et Ecart quadratique moyen RMS) mesuré et simulé par rapport au revêtement BBSG Type A pris comme référence.

On peut voir que pour tous les revêtements, les écarts quadratiques moyens et les erreurs moyennes sont approximativement égales pour les simulations et pour les mesures. Donc le modèle parvient à simuler les différences de comportement entre les revêtements. Afin de quantifier les différences, l’écart quadratique moyen entre les revêtements au comportement les plus différents (BBDR Type A dépigmenté et BBDR Type C) a été calculé pour la mesure et la simulation. L’écart quadratique moyen vaut respectivement 1.8°C et 2°C. L’écart quadratique moyen de l’erreur étant d’environ 3°C, on peut en déduire que les différences de comportement sont moins significatives que l’erreur.

4.4.3.2 Simulation des hauteurs de neige sur les différents revêtements

Les hauteurs de neige et de neige saturée simulées sont montrées sur la figure 4.17. Les épisodes neigeux principaux sont détaillés dans ce rapport. Aucun capteur de hauteur de neige n’est présent sur le site et les images webcam ne nous permettent pas connaître la hauteur de

neige présente sur les revêtements. On s'intéresse donc ici principalement à l'enneigement et au déneigement des revêtements.

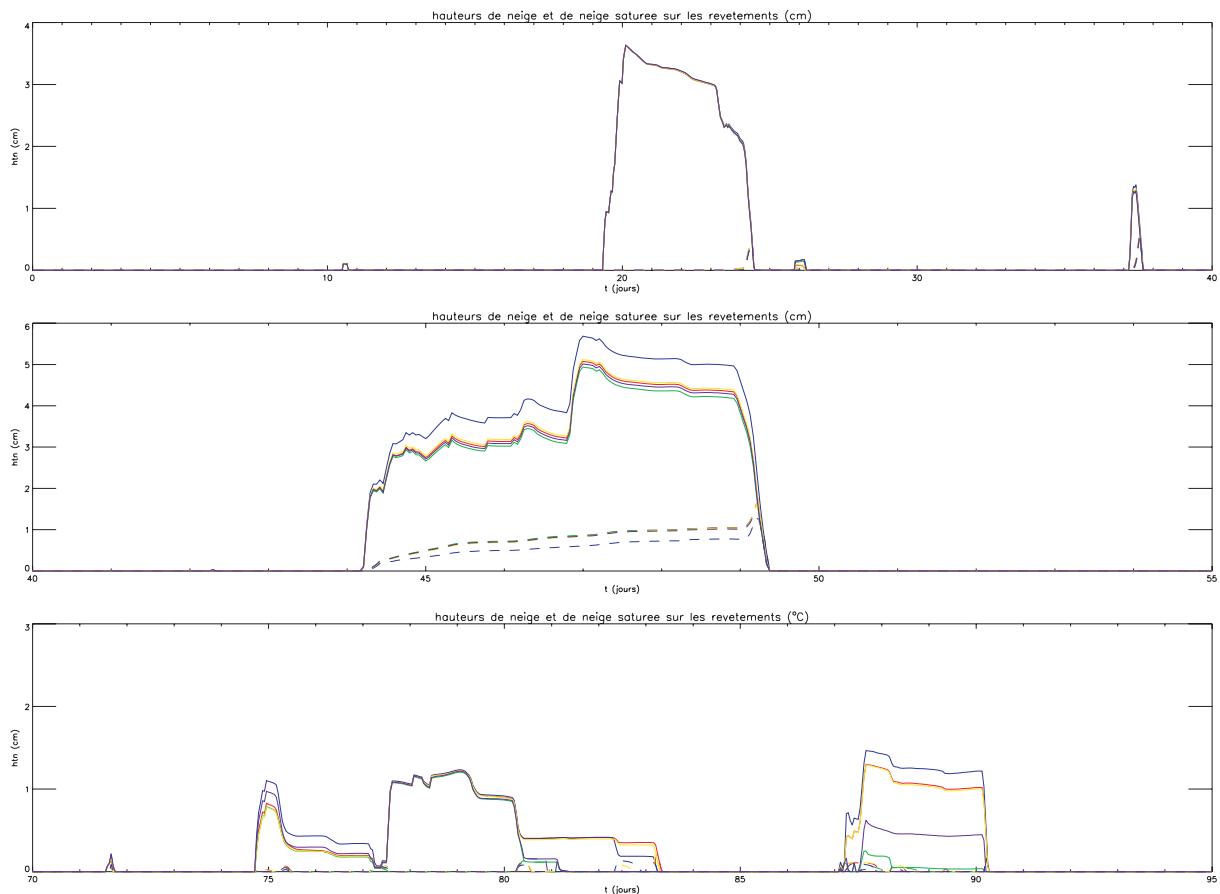


Figure 4.17 : hauteurs de neige (trait continu) et de neige saturée (trait discontinu) sur les différents revêtement : BBSG type A (rouge), BBDR type A(vert), BBDR type A dépigmenté (bleu), BBSG type B (jaune), BBDR type C (violet).

Les épisodes suivants sont définis par rapport à la présence de neige dans la simulation. Comme il a été observé au Col de Porte, le déneigement naturel est un phénomène bidimensionnel. En effet, la fonte ne se produit pas de manière homogène sur le revêtement, où pendant plusieurs heures on peut observer que certaines parties du revêtement sont au noir alors que d'autres sont encore enneigées. Ainsi, on définit le début du déneigement dès qu'une partie de la chaussée est au noir et le déneigement total dès que l'intégralité du revêtement est au noir.

Episodes du mois de janvier 2004

Trois épisodes de présence de neige sur les revêtements (avec une épaisseur non négligeable) se sont produits au cours du mois de janvier 2004 : du 1 au 6 janvier ($t=19$ à 24 jours), le 19

janvier ($t= 37$ jours) et du 26 au 31 janvier ($t=44$ à 49 jours). Pour ces trois épisodes, les simulations n'ont montré aucune différence de comportement à l'enneigement ou au déneigement. La simulation a montré quelques différences sur la hauteur de neige et de neige saturée lors de l'épisode du 26 au 31 janvier. Cependant, le début de l'enneigement et le déneigement se produisant au même moment pour tous les revêtements, cette différence est probablement due à une différence de densité de la neige simulée.

L'absence d'images webcam avant le 4 janvier nous empêche de connaître avec exactitude le début de l'enneigement. L'analyse de température mesurée ne nous permet pas de conclure avec plus de certitude. En effet, la température de surface mesurée est légèrement négative durant toute la journée du 1 janvier, nous empêchant de déterminer le début de l'enneigement. Pour les deux autres épisodes, les différences sur le début d'enneigement des revêtements se sont montrées faibles, tous les revêtements se sont enneigés au cours de la même heure. Ces différences ne peuvent pas être reproduites avec le pas de temps du forçage du modèle (1 heure). Le début d'enneigement a été bien reproduit pour les simulations (au même moment le 9 janvier et deux heures avant le 26 janvier). L'incertitude sur la quantité de précipitation neigeuse ne nous permet pas de savoir si la différence est due à une tenue légèrement trop rapide dans le modèle ou si la quantité de précipitation était trop importante dans le forçage. Cette incertitude sur la quantité de précipitation neigeuse est confirmée par la température d'air mesurée (qui est légèrement positive pendant la précipitation).

Les images webcam ont montré un processus de fonte bidimensionnel et hétérogène. Un exemple est montré sur la figure 4.18. Cependant, peu de différences sont observées concernant le début du déneigement. Les différences se situent essentiellement au niveau du déneigement total, ou parfois des différences de plusieurs heures existent.



Figure 4.18 : Processus de fonte naturelle sur les revêtements du site du LRPC de Nancy

Comme il a été montré au Col de Porte, le modèle étant unidimensionnel, il ne permet pas de reproduire avec exactitude la fonte naturelle. Dans la simulation, le déneigement se fait de manière homogène, alors que les images webcam nous montrent des parties totalement déneigées et d'autres totalement enneigées. Le phénomène réel faisant intervenir des transferts thermiques latéraux non modélisés, la fonte totale se produit ultérieurement dans le modèle.

Episode du 26 février au 5 mars 2004 (jours 74 à 83)

Les images webcam nous montrent que l'on se trouve ici dans épisode constitué de plusieurs chutes de neige de faible intensité. Ces chutes de neige ont engendré de très faibles épaisseurs de neige sur les chaussées (inférieures à 1cm), et dans certains cas elles n'ont pas permis un enneigement total de certaines chaussées. Les chaussées se sont déneigées rapidement, ainsi avant chaque chute de neige, toutes les chaussées étaient au noir. La fonte étant moins rapide dans la simulation, quelques millimètres de neige résiduelle étaient présents dans la simulation avant chaque chute de neige, modifiant ainsi les conditions initiales des chaussées pour l'enneigement. Ainsi, pour pouvoir tenter de discerner une différence de comportement à l'enneigement et au déneigement des chaussées, des déneigements ont été intégrés au modèle lorsque les images webcam nous montraient que les chaussées étaient totalement déneigées. Les déneigements ont été intégrés le 26 février à 12h TU et le 29 février à 1h TU. Les hauteurs de neige simulées avec les déneigements intégrés sont montrées sur la figure 4.19.

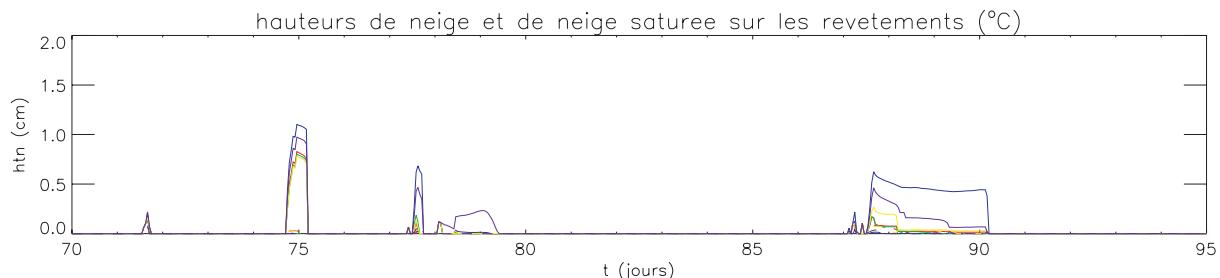


Figure 4.19 : hauteurs de neige (trait continu) et de neige saturée (trait discontinu) sur les différents revêtement : BBSG type A (rouge), BBDR type A(vert), BBDR type A dépigmenté (bleu), BBSG type B (jaune), BBDR type C (violet), avec des déneigements intégrés dans le modèle le 26 et le 29 février 2004 ($t=75$ et 78 jours).

Des différences de comportement peuvent être observées dans la simulation.

Le 25 février ($t=74$ jours), aucune différence de comportement à l'enneigement n'a été observée, ni simulée. De plus, les images webcam nous montrent que le début d'enneigement simulé correspond à l'observation.

Le 28 février ($t=77$ jours), les images webcam nous montrent que deux précipitations neigeuses sont intervenues. La première n'a pas tenu sur la chaussée au contraire de la seconde. Le modèle a reproduit cet épisode, avec cependant une heure d'avance selon le revêtement. Aucune différence de comportement à l'enneigement n'a été observée ni simulée. Par contre, dans le modèle des différences se sont révélées concernant la fonte naturelle (quelques heures). L'ordre de déneigement des revêtements semble être identique dans la simulation et sur les images webcam. Cependant, l'épisode neigeux est de trop faible importance (hauteur de neige de quelques dixièmes de centimètre dans la simulation, et enneigement partiel observé sur les revêtements) pour être représentatif.

Le 29 février ($t=78$ jours), se produit une chute de neige de très faible intensité qui ne tient pas sur les chaussées. Dans la simulation, la neige tient sur tous les revêtements mais la hauteur de neige est négligeable (inférieure à 0.2cm).

Episode 7 : du 9 mars à 8h au 12 mars à 11h (jour 87 à 90)

Dans la journée du 9 mars, de 8h à 18h, on observe dans la simulation ainsi que sur les images webcam, trois précipitations neigeuses successives qui ne tiennent pas sur la chaussée. Sur les images webcam, on voit que la neige commence à tenir entre 21h et 22h sur tous les revêtements. Dans la simulation, la neige tient légèrement plus tôt, à partir de 19h, mais sur une hauteur très faible (inférieure à 0.1cm). La hauteur de neige simulée diffère selon les revêtements, environ 0.2cm sur tous les revêtements excepté sur le revêtement BBDR Type A dépigmenté (environ 0.6cm). On peut aussi observer dans les simulations des différences de déneigement selon les planches. Le revêtement BBDR Type A se déneige le 11 mars à 8h et les autres le 12 mars à 10h. Les images webcam confirment un déneigement plus tardif sur le BBDR Type A dépigmenté (quelques heures). Cependant, la très faible hauteur de neige inférieure à 0.1cm dès le 10 mars (sauf pour la planche BBDR Type A dépigmenté) ne permet pas de tirer de conclusions sur une éventuelle différence de comportement selon les revêtements.

4.4.4 Sensibilité à la porosité du revêtement

Pour étudier la sensibilité du modèle à la porosité de la chaussée, 3 simulations ont été effectuées avec un revêtement BBDR Type A. La première simulation a été effectuée avec la valeur maximale de porosité de 25%, la seconde avec la valeur minimale de 15%, et la troisième en gardant les propriétés physiques du revêtement mais en lui affectant les propriétés hydriques d'un revêtement BBSG (porosité d'environ 6%, sur une épaisseur de 5mm).

Afin de caractériser les différences de comportement du modèle dues aux propriétés hydrologiques de la route, on calcule l'erreur moyenne et l'écart quadratique moyen par rapport au troisième cas (sans hydrologie). Les résultats sont montrés sur le tableau 4.11.

	ME Ts (°C)	RMS Ts (°C)	ME htn (cm)	RMS htn (cm)	ME hsat (cm)	RMS hsat (cm)
porosité 15%	0.261	0.718	-0.011	0.044	-0.007	0.031
porosité 25%	0.190	0.612	-0.010	0.041	-0.007	0.034

Tableau 4.11 : Sensibilité du modèle à la porosité (Erreur moyenne ME et Ecart quadratique moyen RMS), par rapport à un revêtement imperméable.

L'erreur moyenne et l'écart quadratique moyen varient très peu entre les 2 porosités, par rapport au cas de référence. On peut donc en déduire que le modèle est peu sensible à la porosité concernant la température de surface, la hauteur de neige ou la hauteur de neige saturée en eau liquide. Par contre, par rapport au cas de référence, le caractère drainant du revêtement à une sensibilité plus importante que la valeur de la porosité. Cependant, la sensibilité du modèle au caractère drainant est plus forte sur la température de surface que sur la hauteur de neige ou de neige saturée. En effet, l'erreur moyenne et l'écart quadratique moyen sur la température sont respectivement de l'ordre de 0.3 et 0.7 °C, alors que sur la hauteur de neige et de neige saturée, l'erreur moyenne et l'écart quadratique moyen sont inférieurs au millimètre. Cependant, la sensibilité du modèle sur la couche de neige saturée serait plus importante pour des cas présentant des épisodes neigeux plus importants, où l'on dépasserait la valeur de la hauteur maximale de saturation, car cette dernière est dépendante du type de revêtement.

4.4.5 Conclusion sur la validation effectuée à partir des revêtements du LRPC

Le but de cette validation était double, il s'agissait d'une part de proposer une paramétrisation des propriétés hydriques des revêtements drainants, et d'autre part de quantifier la sensibilité du modèle au revêtement utilisé.

Les incertitudes relatives au cycle de l'eau dans les revêtements (répartition horaire de la précipitation, variabilité spatiale de la géométrie des pores des revêtements associée à la variabilité du cycle de vie du revêtement) ne permettent pas de modéliser de manière fine les transferts hydriques dans un modèle unidimensionnel et dont les données d'entrée sont horaires. Il s'agissait ici de modéliser les transferts hydriques de manière réaliste. Les données issues de la littérature le permettent. Des tests de sensibilité ont été effectués sur les propriétés hydriques des revêtements (porosité, conductivité hydraulique à saturation, coefficient de rétention, potentiel hydrique). Ils ont permis de s'assurer que les valeurs issues de la littérature étaient现实的和 qu'une paramétrisation simple de ces propriétés est suffisante dans un contexte de viabilité hivernale, confirmant ainsi les résultats obtenus par Shao (1994).

La simulation effectuée sur les revêtements permet de confirmer la simulation précise de la température de surface, avec un écart quadratique moyen de l'erreur de l'ordre de 3°C pour tous les revêtements. Ces résultats confirment ceux obtenus sur le site du Col de Porte. On s'intéresse dans cette section aux différences de comportement des revêtements. Concernant la température de surface, les simulations ont montré que le modèle était capable de simuler les différents comportements observés à partir des mesures. Cependant, les différences de comportement entre les différents revêtements restent faibles, à la fois dans les mesures et dans les simulations. L'écart quadratique moyen sur la température de surface entre les deux revêtements au comportement les plus éloignés est d'environ 2°C, pour la mesure et pour la simulation. Cet écart est inférieur à l'écart quadratique moyen de l'erreur. Ainsi, l'intérêt de simuler les différents revêtements installés sur le site semble limité. De plus, le revêtement dont le comportement se distingue des autres (BBDR Type A dépigmenté) est un revêtement expérimental non utilisé sur les routes.

L'étude des épisodes neigeux majeurs n'a pas permis de distinguer de différence de comportement à l'enneigement sur les différents revêtements. Cependant, l'observation des

images webcam nous montre que l’enneigement diffère très peu entre les revêtements. Lorsque des différences existent, elles se situent dans un laps de temps inférieur au forçage (horaire). Les principales différences de comportement se situent au niveau de la fonte naturelle. Ces différences de comportement ne sont pas observées dans la simulation, à l’exception d’épisodes neigeux mettant en jeu des épaisseurs de neige très faibles (de l’ordre du millimètre). De plus, la fonte naturelle n’étant pas reproduite de manière précise dans le modèle, aucune conclusion n’a pu être établie concernant la fonte naturelle.

L’étude de la sensibilité du type de revêtement doit être menée de manière plus approfondie, sur des structures de chaussées totalement différentes, et non sur le revêtement uniquement.

4.5 Conclusion du chapitre

Ce chapitre était consacré à la validation du modèle couplé ISBA-Route/CROCUS. Pour cela, des données issues de deux sites expérimentaux ont été utilisées : le site de Météo-France situé au Col de Porte et le site du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Nancy.

La vaste base de données provenant du site du Col de Porte (60 épisodes neigeux au cours de 3 hivers) a permis une validation détaillée du modèle pour un revêtement expérimental représentatif d’une chaussée autoroutière. En effet, la validation du modèle couplé ISBA-Route/CROCUS avec les données de l’expérimentation du projet Gelcro a montré que le modèle était capable de simuler avec précision l’évolution de température de surface de la chaussée et la présence de neige sur la route en conditions naturelles (sans prise en compte du trafic routier ou du traitement de la chaussée par des fondants). Le modèle parvient à reproduire avec précision l’évolution de température d’une chaussée, avec un écart quadratique moyen de l’erreur d’environ 3°C. Les statistiques calculées par rapport à la mesure de hauteur de neige déposée sur les chaussées ne sont pas représentatives du fait des nombreuses erreurs de mesure (pannes, incertitude sur les manteaux neigeux de faible épaisseur associés à la précision du capteur de ± 1 cm) cependant la comparaison des hauteurs de neige simulées et mesurées, parfois complétés par l’observation des enregistrements vidéos, a permis de conclure que le modèle parvient à reproduire avec précision le comportement d’une couche de neige se déposant sur la chaussée. De la même manière, les mesures manuelles effectuées ont permis de montrer que la présence d’une couche de neige saturée en eau liquide à la base du manteau neigeux a été reproduite de manière satisfaisante par le modèle dans la plupart des cas.

Cette simulation précise de l'interface a nécessité l'utilisation du modèle détaillé CROCUS, permettant de simuler le type de neige à l'interface. Une simulation a été effectuée avec l'utilisation du modèle de neige ISBA-ES (Boone et Etchevers 2001) en place du modèle CROCUS (Brun et al. 1989, 1992). Cette simulation a confirmé l'apport du modèle CROCUS pour le contexte de la viabilité hivernale, pour les épisodes critiques (faibles épaisseurs de neige). En effet, la tenue ou non de la neige sur la route est mieux simulée avec le modèle CROCUS, grâce à une représentation plus précise des transferts thermiques et hydriques à l'interface.

Les données issues du site du LRPC de Nancy ont, quant à elles, été utilisées pour tester la sensibilité du modèle à différents types de revêtements. Cette étude a permis de proposer une paramétrisation simple mais réaliste des propriétés hydriques des revêtements drainants. La sensibilité du modèle au type de revêtement n'a pas pu être mise en évidence de manière significative. Le modèle s'est montré capable de reproduire les évolutions de température de surface propres à chaque type de revêtement. Cependant les différences de comportement par rapport à la température de surface sont assez faibles (un écart quadratique moyen d'environ 2°C par rapport aux revêtements au comportement extrêmes) et inférieures à l'erreur (un écart quadratique moyen de l'erreur d'environ 3°C pour tous les revêtements). Une différence de comportement significative est observée essentiellement pour un revêtement dépigmenté non représentatif des routes installées sur le réseau français. L'étude des épisodes neigeux majeurs n'a pas permis de distinguer de différences de comportement à l'enneigement sur les différents revêtements. Cependant, l'observation nous montre que les différences de comportement à l'enneigement sont faibles, et qu'elles se situent dans un laps de temps inférieur au forçage (horaire). L'étude de la sensibilité du type de revêtement doit être menée de manière plus approfondie, sur des structures de chaussées totalement différentes, et non sur le revêtement uniquement.

La validation effectuée sur deux sites différents a permis de valider le modèle et d'en apprécier ses qualités et ses défauts. Ainsi la simulation précise de la température de surface et de l'occurrence de neige a pu être mise en évidence. La fonte naturelle est, quant à elle, assez mal représentée par le modèle. En effet, le processus de fonte est hétérogène et il fait intervenir des transferts latéraux non modélisés. L'utilisation du modèle avec un forçage horaire ne permet pas une représentation des phénomènes extrêmement précise, essentiellement de la répartition horaire des précipitations et des transferts hydriques dans la chaussée. Ainsi, certaines

incertitudes se sont révélées concernant la hauteur de neige totale sur le revêtement et la durée d’enneigement. Cependant, ces défauts ne sont pas limitants pour un problème de viabilité hivernale, où l’intérêt principal est la prévision de l’occurrence de neige sur la chaussée plutôt que la hauteur totale ou la fonte naturelle. En effet, les services d’exploitation vont intervenir avec un déneigement dès la moindre présence de neige sur la chaussée.

Cette validation détaillée a été facilitée par la base de données complète du projet Gelcro. En effet, l’instrumentation et les mesures manuelles ont permis de valider les épisodes neigeux. De même, les enregistrements vidéos ont été nécessaires à cette validation. Ils ont permis de combler les pannes du capteur et de valider les épisodes neigeux de faible épaisseur se situant en dessous de la précision du capteur, donc d’observer avec certitude le début de l’enneigement de la chaussée. De même, le processus de fonte hétérogène et certains phénomènes non modélisés comme le transport de neige par le vent ont pu être mis en évidence. L’absence de capteurs de hauteur de neige sur le site du LRPC de Nancy n’a pas permis une validation détaillée des épisodes neigeux. Cependant, ce manque a partiellement été comblé par les images webcam, qui ont permis d’observer le début d’enneigement ou de fonte.

Les résultats satisfaisants obtenus avec les données météorologiques observées sur le site permettent d’envisager une utilisation du modèle dans un contexte de prévision. La base de données et les simulations effectuées au Col de Porte vont permettre de confronter ces résultats à ceux des prévisions, et ainsi d’apprécier le comportement du modèle dans une utilisation avec des données météorologiques prévues.

Chapitre 5

Prévision sur le site expérimental du Col de Porte

Prévision sur le site expérimental du Col de Porte

5.1 Introduction

Le but final du projet Gelcro est le développement d'un outil opérationnel de prévision de l'état des routes en conditions hivernales. Les simulations effectuées à partir des données météorologiques observées sur site s'étant montrées satisfaisantes, le modèle a pu être utilisé dans un contexte de prévision. En effet, le modèle est capable de reproduire les épisodes neigeux observés sur le site expérimental du Col de Porte à partir des données météorologiques mesurées sur le site. On s'intéresse ici à évaluer les performances du modèles avec d'autres données météorologiques, prévues et non plus mesurées sur le site.

La première étape a pour but de tester la capacité du modèle à reproduire les épisodes observés sur le site expérimental à partir de données météorologiques prévues. Ainsi, des prévisions a posteriori ont été effectuées sur les hivers de la base de données constituée lors de l'expérimentation du projet Gelcro. Ces prévisions ont donc la possibilité d'être comparées aux mesures ainsi qu'aux simulations effectuées avec le forçage observé. Les prévisions sont effectuées grâce au forçage issu du modèle SAFRAN (Durand et al. 1993), décliné en deux modes : un mode analyse et un mode prévision. Le mode analyse sert à l'initialisation de la prévision pour l'échéance considérée. L'applicabilité du modèle dans un contexte de prévision hors du site bien instrumenté du Col de Porte pourra ainsi être évaluée.

Ce chapitre présente dans un premier temps le principe de la prévision, ainsi que le modèle SAFRAN (Durand et al. 1993), qui fournit les forçages nécessaires à la prévision. Les résultats des prévisions effectuées sur le site du Col de Porte sont ensuite discutés et comparés aux résultats expérimentaux.

5.2 Les conditions de prévision

Dans ce paragraphe est présenté le modèle SAFRAN (Durand et al. 1993) qui fournit le forçage utilisé pour la prévision. Sont présentées également les définitions et les paramétrisations utilisées pour la prévision, comme les déneigements qu'il a fallu intégrer dans le modèle,

l'échéance de la prévision, l'initialisation de la prévision ou encore la définition adoptée pour la présence de neige au sol.

5.2.1 Le modèle SAFRAN

Le modèle SAFRAN (Durand et al. 1993) est un modèle qui existe dans 2 modes : un mode d'analyse et un mode de prévision. On appellera forçage analysé les données fournies par SAFRAN utilisé dans son mode analyse, et forçage prévu les données fournies par SAFRAN utilisé dans son mode prévision.

Le mode d'analyse du modèle SAFRAN

Le mode d'analyse du modèle SAFRAN (Durand et al. 1993) permet la spatialisation sur une grille irrégulière et l'interpolation horaire des observations météorologiques disponibles. Il fournit au pas horaire les paramètres météorologiques suivants : température, vent, humidité, rayonnement visible et infrarouge, nébulosité et précipitations (liquides et solides).

Les données d'observation sont issues du réseau de mesure de Météo-France. SAFRAN combine ces observations avec des estimations préliminaires des différents champs, appelées ébauches. Ces ébauches sont calculées à partir des données issues du modèle de prévision du temps de Météo-France ALADIN, grâce à des opérateurs de descente d'échelle. L'analyse est faite grâce à une méthode d'interpolation optimale. Les détails sont donnés dans Durand et al. 1993.

Le modèle a dans un premier temps été développé à l'échelle des Alpes et des Pyrénées françaises, dans un but opérationnel de prévision du risque d'avalanche (Durand et al. 1998). Ainsi la grille originelle était constituée de 23 massifs montagneux pour les Alpes et de 15 pour les Pyrénées, chaque massif étant d'une superficie approximative de 500 km². Le modèle SAFRAN fournit les paramètres météorologiques au pas horaire, pour différents versants de chaque massif, avec une discréétisation verticale de 300m.

Le modèle a été ensuite adapté à l'échelle de la France, pour les besoins de la prévision hydrologique. Cette grille a une résolution horizontale de 8km et chaque maille est caractérisée par son altitude moyenne. Cette grille sera utilisée pour la prévision à l'échelle de la France (chapitre 6).

Le mode prévision du modèle SAFRAN

Le mode prévision du modèle SAFRAN est une version simplifiée du mode analyse, il permet la descente d'échelle sur la grille considérée des prévisions du modèle ALADIN.

5.2.2 Principe et intérêt de la prévision

Une prévision de l'état des routes en hiver peut s'avérer très utile pour les exploitants routiers. Dans ce contexte, on s'intéresse ici uniquement à la prévision à courte échéance, sur une période de 24 heures. En effet, une prévision précise sur une période de 24 heures, de la température de surface d'une chaussée, ainsi que de l'occurrence de neige pourra servir d'indicateur à l'exploitant. Cet indicateur, associé à l'expérience des exploitants sur les problèmes de viabilité hivernale, ainsi qu'à leur connaissance du terrain pour les effets météorologiques purement locaux, permettra une meilleure gestion des épisodes à risques (gel, neige). Une bonne prévision des épisodes neigeux et de la température de surface engendrerait une amélioration au niveau de la gestion du matériel, du personnel et de l'utilisation de fondants routiers.

5.2.2.1 Initialisation de la prévision

La prévision est effectuée par pas de 24 heures (de J 6h TU à J+1 6h TU) avec le forçage prévu (forçage issu de SAFRAN en mode prévision). La simulation ISBA-Route/CROCUS est initialisée à partir des résultats de la simulation effectuée avec le forçage analysé (forçage issu de SAFRAN en mode analyse) sur la période précédente (de J-1 à J 6h TU).

Le principe est le suivant : on initialise tous les jours à 6h TU le modèle couplé ISBA-Route/CROCUS avec le profil de chaussée (température, teneur en eau liquide et glace de chaque couche) et le profil du manteau neigeux (température, teneur en eau liquide, densité, type de grains de chaque couche) issus de la simulation effectuée avec le forçage analysé, à la date correspondante. Ensuite, la prévision de la période considérée (de J 6h TU à J+1 6h TU) est effectuée grâce aux forçage prévu pour cette période.

Un exemple est montré sur la figure 5.1. La courbe noire discontinue représente la mesure (température de surface et hauteur de neige) et la courbe noire continue représente la simulation avec le forçage atmosphérique mesuré sur le site (forçage utilisé pour la validation du modèle). La courbe verte représente la simulation effectuée avec le forçage atmosphérique analysé. Les

courbes rouges représentent les prévisions journalières (de J 6h TU à J+1 6h TU). Les graduations en abscisse correspondent à 6h TU, d'où la présence de 2 valeurs de température de surface ou de hauteur de neige à cet horaire, la prévision à 24h du jour J-1 et l'initialisation (échéance 0h) du jour J. L'initialisation de la prévision est effectuée à partir des résultats de simulation en analyse de la période précédente. C'est pourquoi la simulation en analyse et l'échéance 0h de la prévision sont confondues.

On appellera "simulation en analyse" la simulation effectuée avec le forçage du modèle SAFRAN dans son mode analyse, et "simulation en prévision" la prévision effectuée selon le principe expliqué dans cette section.

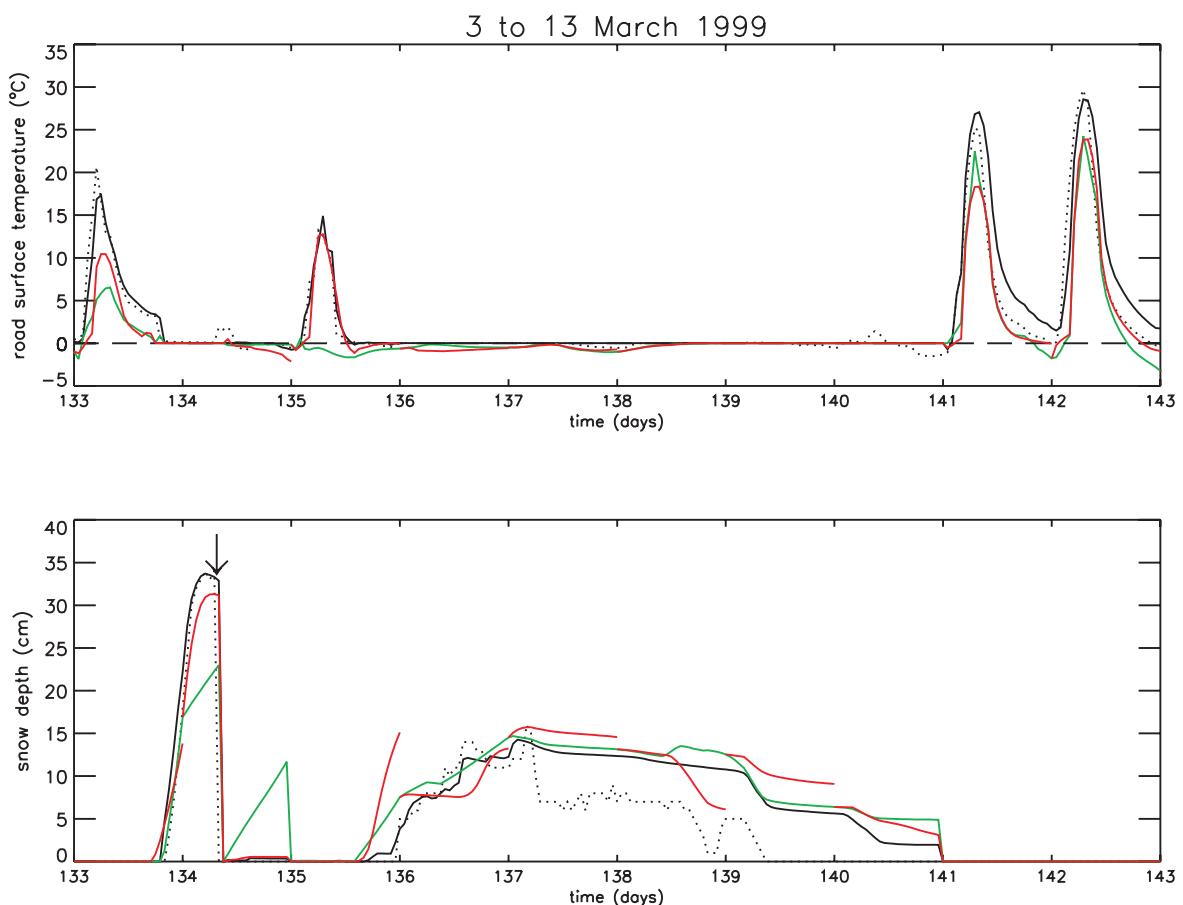


Figure 5.1 : a) Comparaison pour la période du 3 au 13 mars 99 de la température de surface mesurée (---) avec la température de surface simulée : avec le forçage observé (—), avec le forçage analysé (—) et avec le forçage prévu (—); **b)** même comparaison pour la hauteur de neige.

Cette initialisation du modèle à 6h (les quantités de précipitations sont mesurées quotidiennement à 6h dans les réseaux météorologiques), synonyme de disponibilité des résultats au cours de la matinée, n'est pas la plus appropriée dans un contexte opérationnel. En effet, une simulation sur un réseau plus tardif comme le réseau 12h-12h, permettant une disponibilité des résultats en fin de journée, serait plus appropriée, permettant ainsi une amélioration de la gestion des astreintes au cours de la nuit et de la matinée suivante. Ce réseau serait à mettre en œuvre pour une utilisation du modèle dans une chaîne de prévision opérationnelle.

5.2.2.2 Les déneigements dans le modèle

Afin de se rapprocher du contexte opérationnel, où l'accumulation de neige sur les routes est rendue impossible par l'intervention des services d'exploitation, des déneigements ont dû être introduits dans le modèle. Ces déneigements permettent également d'éviter de propager des erreurs dues à une précipitation neigeuse prévue mais non observée, susceptible de tenir sur la chaussée. Ainsi, des déneigements sont intégrés dans le modèle au début de la période, à 6h TU. Un unique déneigement à 6h est éloigné du contexte opérationnel, où les déneigements sont fréquents, mais l'on s'intéresse ici uniquement à la possibilité d'un recouvrement de neige au cours de la période (et non à la représentativité des enneigements réels). Ainsi, seule l'initialisation du sol est nécessaire au début de l'échéance.

Cependant, pour la prévision sur le site expérimental du Col de Porte, les conditions diffèrent du contexte opérationnel. En effet, les épisodes neigeux de la campagne expérimentale ont été soumis à la fonte naturelle ou à un déneigement manuel après plusieurs jours. Un traitement particulier des déneigements a donc été effectué pour la prévision sur le site. Ainsi, en plus des déneigements effectués manuellement, la chaussée est déneigée dans le modèle tous les jours à 6h TU, à l'exception des épisodes observés au Col de Porte (ces épisodes ont été définis de 6h TU le jour de début de précipitation neigeuse observée jusqu'à 6h TU le jour suivant le déneigement manuel ou la fonte naturelle totale observée). La présence de neige au sol pouvant être continue sur plusieurs jours, l'initialisation du profil du manteau neigeux à 6h TU est nécessaire.

5.2.2.3 Le principe de la prévision

Il s'agit de prévoir l'évolution de la température de surface de la chaussée et la présence ou l'absence de neige sur la chaussée, sur une période de 24 heures. Pour cela, il a été nécessaire de définir l'état "**présence de neige au sol**".

Il a été défini de la manière suivante :

- présence de neige sur une durée continue d'au moins 6 heures au cours de la période
- ou présence continue de neige depuis au moins 2 heures à la fin de la période.

Cette définition a été adoptée en fonction du contexte opérationnel routier. En effet, les déneigements sont effectués dès que la neige tient sur la chaussée, indépendamment de la hauteur de neige. Ainsi, aucun critère d'épaisseur n'a été pris en compte dans la définition. Seul un critère de durée d'enneigement a été utilisé, afin de distinguer les cas où la neige ne tient pas de ceux où elle tient.

5.2.3 Conclusion

Cette section préliminaire permet de présenter le principe de prévision utilisé dans cette étude, ainsi que les données météorologiques avec lesquelles le modèle a été utilisé. Pour la prévision, il a été nécessaire de tenir compte du contexte opérationnel et d'intégrer des déneigements dans la simulation. Un traitement particulier est effectué pour les prévisions sur le site expérimental du Col de Porte. De même, la prévision s'intéressant essentiellement à la tenue de la neige sur la chaussée, une définition de l'événement "présence de neige au sol" a dû être adoptée. La définition, la paramétrisation et le forçage atmosphérique décrits dans cette section ont été utilisés pour la prévision sur le site expérimental, et pour la prévision à l'échelle de la France (chapitre 6).

5.3 Résultats des prévisions sur le site expérimental

5.3.1 Les différents types de prévision

Sur le principe expliqué en section 5.2.2.1 ont été établis 3 types de prévision à échéance 24h (de 6h TU à 6h TU), de manière à dégrader la prévision par étapes successives. Les 3 prévisions utilisent le forçage atmosphérique prévu au cours de l'échéance, mais diffèrent par

leur initialisation (sol et manteau neigeux) à 6h TU et par la prise en compte ou non des masques solaires (zones d'ombre générées par les arbres et les bâtiments) mesurés sur le site. Les trois prévisions sont définies de la manière suivante :

- **prévision A** : prise en compte des masques solaires, initialisation à 6h avec les profils issus de la simulation avec le forçage atmosphérique mesuré sur le site (forçage utilisé pour la validation du modèle).
- **prévision B** : prise en compte des masques solaires, initialisation à 6h à partir des profils issus de la simulation avec le forçage atmosphérique analysé (avec masques solaires).
- **prévision C** : absence des masques solaires et initialisation à 6h à partir des profils issus de la simulation avec le forçage atmosphérique analysé (sans masques solaires).

La prévision C est la plus défavorable, mais elle se rapproche de la prévision en condition opérationnelle.

5.3.2 Résultats

La figure 5.2 montre une comparaison de la température de surface et de la hauteur de neige mesurées avec les différentes simulations : avec le forçage observé, et avec les 3 prévisions à 24h, pour une période de 10 jours (du 3 mars 99 à 6h au 13 mars 99 à 6h). La figure 5.3 montre les mêmes résultats pour le mois de décembre 1998. Sur ces 2 figures, les graduations en abscisse correspondent à 6h TU, d'où la présence de 2 points distincts (la prévision et l'initialisation de la période suivante) à cet horaire.

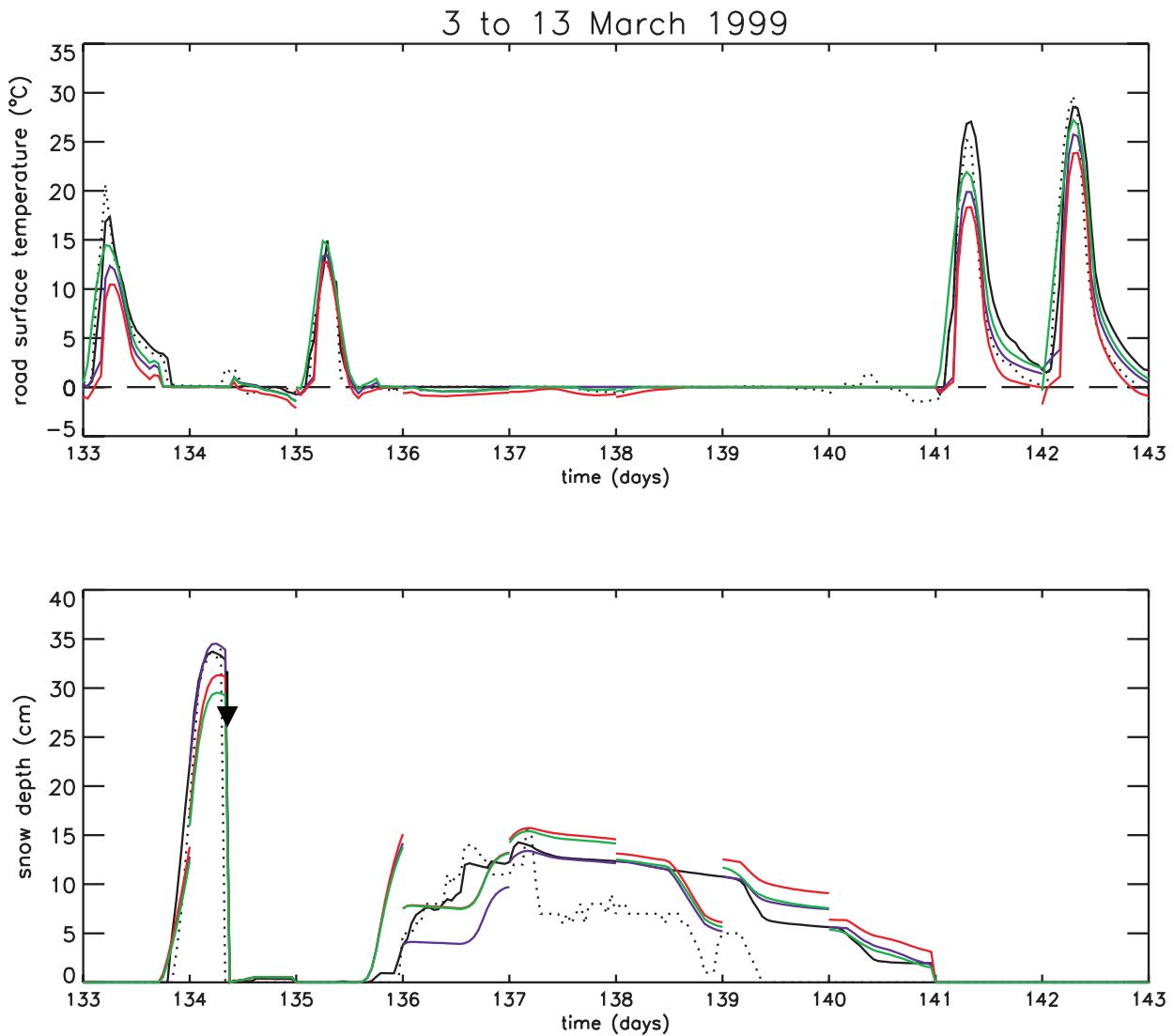


Figure 5.2 : a) Comparaison pour la période du 3 au 13 mars 99 de la température de surface mesurée (---) avec la température de surface simulée avec le forçage observé (—) et avec les 3 prévisions (prévision A : —; prévision B : —; prévision C : —); b) même comparaison pour la hauteur de neige (avec les déneigements manuels ↓)

Sur la figure 5.2a, on peut voir que le modèle reproduit avec précision l'évolution de température de surface, avec une dégradation des différentes prévisions par rapport à la simulation avec le forçage observé sur le site. Concernant la prévision de la neige au sol, on s'intéresse uniquement aux jours où il n'y a pas de neige observée à 6h TU. En effet les jours où l'on a déjà de la neige à 6h sont sans intérêt, d'une part à cause de la réinitialisation avec les profils issus des simulations avec le forçage observé ou analysé, mais également à cause du contexte opérationnel, où l'on a pas d'accumulation de neige sur plusieurs jours. Donc sur la figure 5.2, seulement 2 jours de prévision sont intéressants, les prévisions du 3 mars à 6h

($t=133$ jours) au 4 mars à 6h ($t=134$ jours), et du 5 au 6 mars ($t=135$ à 136 jours). Pour ces 2 jours, on peut voir que la tenue de la neige est bien prévue, même si des incertitudes subsistent sur la hauteur de neige totale et le début de l'enneigement. Mais comme il été expliqué précédemment, on s'intéresse ici uniquement à la possibilité de recouvrement de la chaussée au cours de la période.

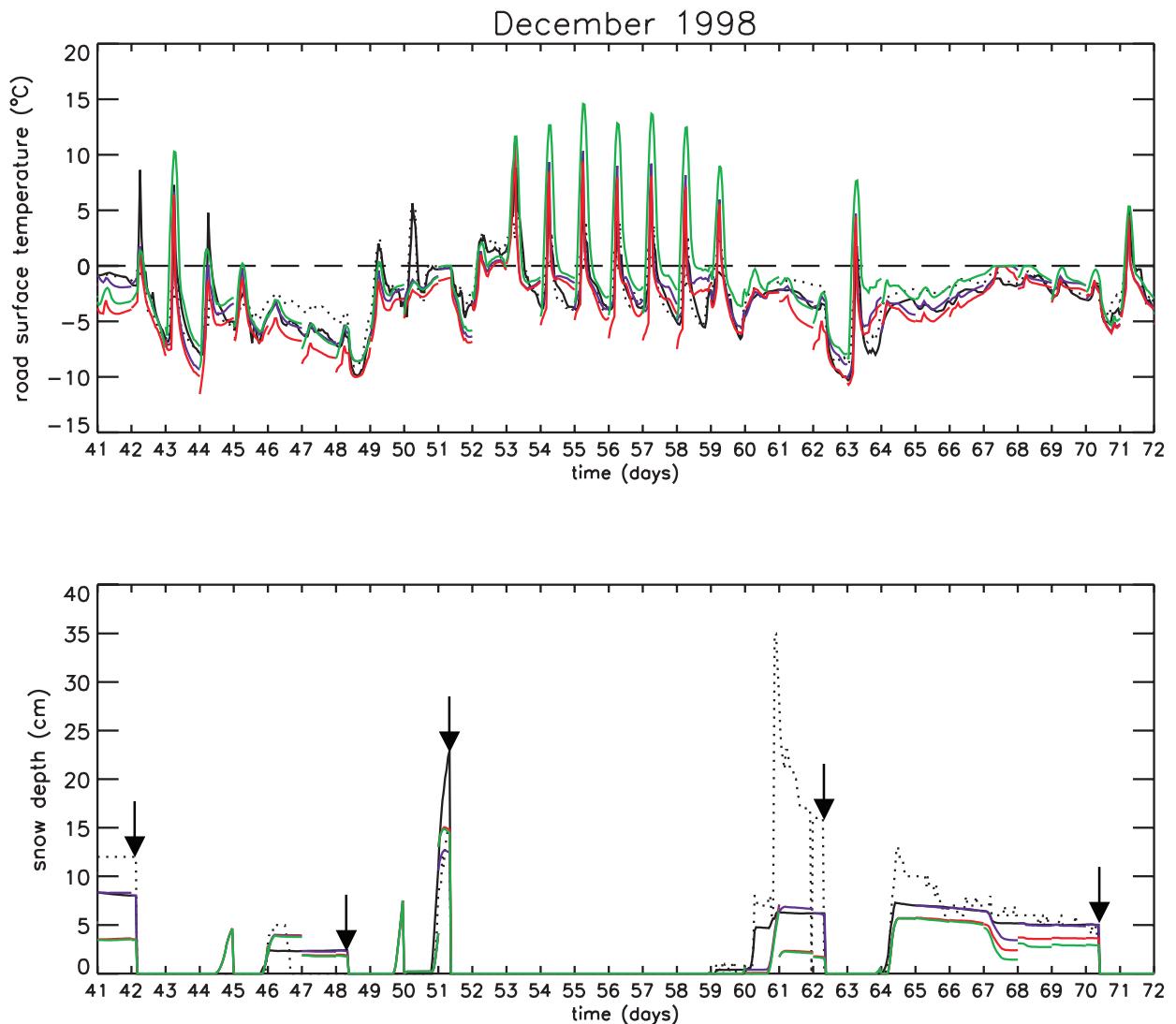


Figure 5.3 : a) Comparaison pour le mois de décembre 1998 de la température de surface mesurée (---) avec la température de surface simulée avec le forçage observé (—) et avec les 3 prévisions (prévision A : —; prévision B : —; prévision C : —); **b)** même comparaison pour la hauteur de neige(avec les déneigements manuels ↓)

La figure 5.3 est similaire, cependant elle permet également de visualiser des cas de mauvaises prévisions. Concernant les bonnes prévisions de la tenue de la neige au sol, le modèle prévoit

l’enneigement de la chaussée du 5 au 6 décembre ($t=45$ à 46 jours), du 10 au 11 décembre ($t=50$ à 51) et du 24 au 25 décembre ($t=64$ à 65 jours), même si la hauteur de neige prévue et le début de l’enneigement diffèrent de l’observation. Par contre, pour les prévisions entre le 4 et le 5 décembre et entre le 9 et 10 décembre 1998 (de $t=44$ à 45 jours et de $t=49$ à 50 jours), on peut apercevoir des cas de présence de neige au sol prévue mais non observée. A l’inverse, pour la prévision entre le 19 et le 20 décembre 1998 (de $t=59$ à 60 jours), on peut apercevoir un cas de présence de neige au sol observée mais non prévue.

Le modèle reproduit avec précision l’évolution de température de surface, avec une dégradation des différentes prévisions par rapport à la simulation avec le forçage observé sur le site. On peut observer 2 cas où les trois prévisions de température de surface sont supérieures à la mesure au cours de la nuit, du 14 au 15 et du 18 au 19 décembre ($t = 54$ à 55 jours) et ($t = 58$ à 59 jours). Ces mauvaises prévisions sont dues à une mauvaise prévision du rayonnement infrarouge. En effet, la comparaison des données météorologiques pour ces deux périodes nous montrent un rayonnement infrarouge beaucoup plus important au cours de la nuit pour le forçage prévu.

Table de contingence

Afin de synthétiser les résultats obtenus sur l’intégralité des épisodes des 3 hivers et pour les jours où il n’existe pas de neige à 6h, une table de contingence (Tableau 5.1) a été établie.

SIMULATION	MESURES	
	Neige au sol	Pas de neige au sol
forçage observé	Neige au sol	42
	Pas de neige au sol	2
forçage analysé (avec masques solaires)	Neige au sol	41
	Pas de neige au sol	3
forçage analysé (sans masques solaires)	Neige au sol	40
	Pas de neige au sol	4
prévision A	Neige au sol	30
	Pas de neige au sol	14
prévision B	Neige au sol	30
	Pas de neige au sol	14
prévision C	Neige au sol	30
	Pas de neige au sol	14

Tableau 5.1 : Table de contingence des différentes simulations pour les jours sans neige observée à 6h TU, pour les 3 hivers de la campagne expérimentale.

Scores statistiques

A partir de ces résultats, on peut définir les scores statistiques suivants:

- **Taux de détection :**

$$TD = PO / (PO+NPO) \quad (5.1)$$

- **Taux d'événements manqués :**

$$TEM = 1-TD = NPO / (PO+NPO) \quad (5.2)$$

- **Spécificité :**

$$SPE = NPNO / (PNO+NPNO) \quad (5.3)$$

- **Taux de fausses détection :**

$$TFD = 1-SPE = PNO / (PNO+NPNO) \quad (5.4)$$

- **Taux de fausses alarmes :**

$$TFA = PNO / (PNO+PO) \quad (5.5)$$

- **Critère de Rousseau** (Rousseau, 1980) :

$$I = \frac{PO \times NPNO - \left(\frac{NPO+PNO}{2} \right)^2}{\left(PO + \frac{NPO+PNO}{2} \right) \times \left(NPNO + \frac{NPO+PNO}{2} \right)} \quad (5.6)$$

où :

PO est le nombre d'événements " présence de neige au sol " prévus et observés

PNO est le nombre d'événements prévus et non observés

NPO est le nombre d'événements non prévus et observés

NPNO est le nombre d'événements non prévus et non observés.

Contrairement aux autres scores statistiques, le critère de Rousseau est non linéaire et a une plage de variation plus grande ($-1 \leq I \leq 1$). Ce score est particulièrement utilisé en météorologie, il permet de donner du poids aux événements peu fréquents (ici, présence de neige au sol). Le score -1 représente la prévision nulle, le score 0 représente la prévision au hasard, mais qui respecte la fréquence du phénomène dans l'échantillon, et le score 1 représente la prévision parfaite.

Le tableau 5.2 montre les scores pour la simulation avec le forçage observé, pour la simulation en analyse et pour les 3 types de prévision.

Type de simulation	TD	TEM	SPE	TFD	TFA	I
Forçage observé	95.5%	4.5%	99.1%	0.9%	4.5%	0.89
Forçage analysé (avec masques solaires)	93.2%	6.8%	96.4%	3.6%	16.3%	0.86
Forçage analysé (sans masques solaires)	90.9%	9.1%	96.8%	3.2%	14.9%	0.85
Prévision A	68.2%	31.8%	94.5%	5.5%	28.6%	0.64
Prévision B	68.2%	31.8%	92.7%	7.3%	34.8%	0.60
Prévision C	68.2%	31.8%	94.5%	5.5%	28.6%	0.64

Tableau 5.2 : Comparaison des scores statistiques de prévision des évènements "présence de neige au sol" des différentes simulations

On s'intéresse maintenant au cas le plus fréquent, le cas d'une chaussée sans neige, donc uniquement à la prévision de température de surface de la chaussée. Pour cela, on étudie les cas où il n'y a pas de neige au cours de la période : ni observée, ni dans aucune des simulations (indépendamment de la définition de l'évènement "présence de neige au sol", on étudie ici les cas sans aucune présence de neige au sol, on écarte ainsi les cas où la neige ne tient pas sur la chaussée).

Ainsi, il a été calculé pour chaque prévision quotidienne, à partir des 24 échéances prévues (de 7h TU le jour J à 6h TU le jour J+1) les résultats statistiques journaliers suivants :

- **Erreur moyenne journalière :**

$$ME_j = \frac{\sum(T_{sim} - T_{mes})}{24} \quad (5.7)$$

- **Ecart quadratique moyen journalier :**

$$RMS_j = \sqrt{\frac{\sum (T_{sim} - T_{mes})^2}{24}} \quad (5.8)$$

où T_{sim} est la température de surface de la chaussée de la simulation considérée (avec le forçage observé, le forçage analysé ou une des prévisions) et T_{mes} est la température de surface mesurée, à l'échéance considérée.

De la même manière, on définit l'erreur moyenne globale et l'écart quadratique moyen global pour l'intégralité des jours (sur les 3 hivers) sans aucune présence de neige simulée ni observée :

- **Erreur moyenne globale :**

$$ME_g = \frac{\sum ME_j}{N} \quad (5.9)$$

- **Ecart quadratique moyen global :**

$$RMSg = \sqrt{\frac{\sum RMS_j^2}{N}} \quad (5.10)$$

où N est le nombre de jours sans aucune présence de neige observée ni dans aucune des simulations, pour les 3 hivers et vaut $N=186$ jours.

Les résultats sont donnés dans le Tableau 5.3.

Type de simulation	MEg (°C)	RMSg (°C)
Forçage observé	0.5	2.8
Forçage analysé (avec masques solaires)	-1.4	3.8
Forçage analysé (sans masques solaires)	1.8	4.1
Prévision A	-0.7	4.1
Prévision B	-1.4	4.4
Prévision C	2.4	4.9

Tableau 5.3 : Comparaison des erreurs moyennes globales et des écarts quadratiques moyens globaux sur la température de surface pour les cas sans neige

5.3.3 Analyse des résultats

5.3.3.1. Simulations avec le forçage mesuré

La température de surface simulée avec le forçage mesuré sur le site est conformément aux attentes la plus précise, avec un écart quadratique moyen d'environ 3°C. La simulation précise de la température de surface avec le modèle couplé ISBA-Route/CROCUS a déjà été montrée

en section 4.2 (bien que l'on ne s'était pas intéressé dans cette section uniquement aux jours sans neige, mais à l'intégralité de la simulation). On s'intéresse donc ici essentiellement à la prévision de l'événement " présence de neige au sol " pour les jours sans neige à 6h. La table de contingence nous montre 4 cas de mauvaise prévision de l'événement. Ces cas se situent à la limite de la définition adoptée, où la précipitation neigeuse a lieu en fin de période et où dans un cas (soit dans la simulation, soit dans la mesure) la neige tient sur la chaussée sur une période légèrement supérieure à 2 heures, donc défini comme cas de " présence de neige au sol ", et sur une durée légèrement inférieure dans l'autre cas, donc défini comme cas d' " absence de neige au sol ". Cependant, la majorité des cas de présence de neige au sol sont reproduits avec le forçage mesuré sur le site, d'où les très bons résultats statistiques, comme par exemple l'indice de Rousseau qui vaut environ 0.9.

5.3.3.2. Simulations avec le forçage analysé

Par rapport aux simulations effectuées avec le forçage mesuré sur le site, la simulation de l'évolution de température de surface est dégradée. En effet, avec ou sans prise en compte des masques solaires, l'écart quadratique moyen de l'erreur augmente d'environ 1°C ($RMS \approx 4^\circ\text{C}$). L'absence des masques solaires a pour conséquence une température de surface beaucoup plus élevée lors des maximums de rayonnement solaire, d'où l'inversion de l'erreur moyenne globale qui devient positive et de norme plus élevée. Cependant cette température plus élevée a tendance à dégrader la simulation lors des périodes plutôt froides du cœur de l'hiver et à l'améliorer lors des épisodes plutôt chauds de fin d'hiver, expliquant la faible augmentation de l'écart quadratique moyen global.

Les résultats obtenus concernant la prévision de la présence de neige en surface restent relativement importants, avec un taux de détection d'environ 90%, un taux de fausses alarmes d'environ 15% et un indice de Rousseau d'environ 0.85. Les scores sont quasiment identiques concernant les deux simulations (avec et sans prise en compte des masques solaires). Seuls 2 cas diffèrent entre les deux simulations. Ces deux cas sont identiques, ils concernent une faible précipitation neigeuse qui tient sur la chaussée pour la simulation prenant en compte les masques solaires, et qui fond pour la simulation ne prenant pas en compte les masques (à cause d'une température de surface plus élevée due à l'absence de masques). Cependant, pour le premier cas, la simulation sans masques engendre une bonne prévision de l'événement (observé et simulé) alors que pour le second cas la bonne prévision est engendrée par la simulation sans

masques solaires (non observé et non simulé). Ainsi, les résultats statistiques de simulation de l'événement "présence de neige au sol" sont quasiment similaires pour les deux simulations.

Concernant les 11 cas de mauvaise simulation de présence de neige au sol, ils sont essentiellement dus à une erreur d'analyse dans le forçage (pluie observée et neige analysée ou inversement), et quelques cas sont des différences situées à la limite de la définition adoptée, comme expliqué en section 5.3.4.1 pour les simulations effectuées avec le forçage observé. Par exemple, pour la simulation avec le forçage analysé ne prenant pas en compte les masques solaires (donc le forçage qui va être utilisé pour l'initialisation du modèle dans le contexte se rapprochant de l'opérationnel), deux cas de mauvaise simulation sont dus à une différence de durée de tenue de la neige en fin de période (légèrement supérieure à 2h dans un cas et légèrement inférieure dans le cas complémentaire), et neuf cas de mauvaise simulation sont dus à une différence du type de précipitation dans le forçage (pluie observée et neige analysée ou inversement).

5.3.3.3. Prévision de la température de surface

Les résultats statistiques globaux (tableau 5.3), ainsi que les figures 5.2a et 5.3a, confirment le résultat attendu, à savoir que les simulations en prévision aboutissent à une simulation de température de surface moins précise ($4.1^{\circ}\text{C} < \text{RMS}_g < 4.9^{\circ}\text{C}$) que celle obtenue avec le forçage observé sur le site ($\text{RMS}=2.8^{\circ}\text{C}$). Par contre, on peut également voir que les résultats de la prévision B ne sont pas beaucoup dégradés par rapport à la prévision A. En effet, l'écart quadratique moyen global et l'erreur moyenne sont du même ordre de grandeur pour la prévision A et B. On peut donc en déduire que concernant la prévision de température de surface, le modèle n'est pas très sensible à l'initialisation de température. Ce résultat peut également être observé sur les figures 5.2a et 5.3a, où l'on voit que même pour les cas où les températures initiales à 6h TU sont éloignées, les courbes de températures des prévisions A et B sont similaires (par exemple pour les jours 54 à 59 sur la figure 5.3a). Par contre, la prévision C dégrade quant à elle un peu plus les résultats, même si l'écart quadratique moyen global reste du même ordre de grandeur que celui des deux autres prévisions. Les figures 5.2a et 5.3a nous montrent une différence de comportement assez marquée par rapport aux autres prévisions, essentiellement au niveau des maximums diurnes. En effet, de manière analogue aux simulations avec le forçage analysé, l'absence de masques solaires dans la prévision C a pour conséquence une température de surface beaucoup plus élevée que pour les prévisions A et B, lors des maximums de rayonnement solaire (d'où l'inversion de l'erreur moyenne globale qui

devient positive et de norme plus élevée). Cependant, cette température plus élevée à tendance à dégrader la prévision lors des périodes plutôt froides du cœur de l'hiver (figure 5.3a) et à l'améliorer lors des épisodes plutôt chauds de fin d'hiver (figure 5.2a), expliquant la faible augmentation de l'écart quadratique moyen global.

5.3.3.4. Prévision de la tenue de la neige au sol

L'analyse de la table de contingence et des scores statistiques nous montre que les scores de prévision de l'événement "présence de neige au sol" sont relativement proches. Les 3 types de prévision peuvent être considérés comme équivalents, même si il existe 4 cas présentant des différences dans la prévision B. Un de ces cas différent est du, comme expliqué précédemment, à la limite de la définition adoptée, et les 3 autres cas sont dus à l'initialisation de température. En effet, nous sommes dans ces 3 cas en présence d'une faible chute de neige au début de la période, qui tient sur la chaussée uniquement dans la prévision B car la température de surface initiale est négative. Cette température négative entraîne dans la prévision B la présence d'un manteau neigeux de faible épaisseur (inférieur à 1cm), et une fonte due à une température positive dans les autres prévisions. Cependant, ce phénomène se produit essentiellement pour des chutes de neige de faible intensité et une utilisation du modèle sur un autre réseau, comme 12h TU – 12h TU, limiterait probablement l'effet de l'initialisation de température, car on se trouverait plus rarement proche du seuil critique de 0°C.

Les résultats statistiques des prévisions sont relativement élevés, le taux de détection est d'environ 70% et la spécificité est supérieure à 90%. De même, le taux de fausses alarmes est assez faible (environ 30%). Ces résultats sont du même ordre que ceux obtenus par Shao (1995) concernant la prévision du verglas en surface des routes. Ces résultats sont confirmés par la valeur du critère de Rousseau (environ 0.6), qui est assez élevé et qui tient compte de la fréquence plus faible de l'événement "présence de neige au sol".

Les cas de mauvaise prévision (neige sur la chaussée prévue mais non observée ou inversement) sont essentiellement (pour 18 cas) dus à une mauvaise prévision du forçage (précipitation neigeuse prévue mais non observée ou inversement), donc indépendants du modèle couplé ISBA-Route/CROCUS. Les 8 autres cas de mauvaise prévision sont, comme il a été expliqué précédemment, des cas se situant à la limite de la définition adoptée, pour des chutes de neige se produisant en fin de période.

5.3.4 Sensibilité de la prévision

L'incertitude associée aux prévisions de la présence de neige au sol est abordée dans cette section. On désire apprécier l'effet d'une légère variation des conditions météorologiques sur la prévision de la présence de neige sur la route. Pour cela, un test de sensibilité à certains paramètres météorologiques prévus a été effectué. Ce test a consisté à étudier l'influence d'une variation de température de l'air (avec la conséquence engendrée sur la phase des précipitations et sur le rayonnement infrarouge incident) et d'une variation de la quantité de précipitations.

Ainsi, pour l'hiver 1998/99, pour chaque jour sans neige au sol à 6h avec de la précipitation prévue, de nouvelles simulations ont été effectuées en modifiant la quantité de précipitation et la température d'air prévues. Ainsi pour les 24 échéances horaires du forçage prévu, la température d'air et la quantité de précipitation ont été fixées à :

$$T_{air} = T_{air\ o} + \Delta T_{air} \text{ avec } \Delta T_{air} \text{ de } -4^{\circ}\text{C} \text{ à } +4^{\circ}\text{C} \text{ par pas de } 1^{\circ}\text{C} \quad (5.11)$$

$$RR = RR_o + \Delta RR \text{ avec } \Delta RR \text{ de } -100\% \text{ à } +100\% \text{ par pas de } 25\% \quad (5.12)$$

où T_{air} et RR sont respectivement la nouvelle température d'air et la nouvelle quantité de précipitation, $T_{air\ o}$ et RR_o sont respectivement la température d'air et la quantité de précipitation prévue initialement, ΔT_{air} et ΔRR sont respectivement les variations de température et de quantité de précipitations.

La variation de la température d'air prévue a été accompagnée d'une prise en compte de la modification de température sur le type des précipitations. Ainsi de la neige est prévue si :

$$T_{air\ o} + \Delta T_{air} < 1^{\circ}\text{C} \quad (5.13)$$

et de la pluie est prévue si :

$$T_{air\ o} + \Delta T_{air} \geq 1^{\circ}\text{C} \quad (5.14)$$

De la même manière, l'influence de la variation de température d'air sur le rayonnement infrarouge incident a été prise en compte, en modifiant le flux de rayonnement infrarouge incident par :

$$IR = IR_o + \Delta IR \quad (5.15)$$

avec :

$$\Delta IR = 4.(IR_o / T_{air\ o}) \cdot \Delta t_{air} \quad (5.16)$$

où IR , ΔIR et IR_o sont respectivement le rayonnement infrarouge modifié, la variation de flux infrarouge et le rayonnement infrarouge prévu initialement.

Le test a été effectué avec les conditions se rapprochant des conditions opérationnelles, sans les masques solaires. Ainsi la prévision de référence représente la prévision C.

5.3.4.1. Exemple de résultats pour de bonnes prévisions

Les résultats des tests de sensibilité effectués sur les bonnes prévisions de présence de neige au sol du mois de décembre 1998 (figure 5.3) sont représentés sur les figures 5.4 (à gauche) pour la prévision du 5 au 6 décembre, 5.4 (au centre) pour la prévision du 10 au 11 décembre et 5.4 (à droite) pour la prévision du 24 au 25 décembre. Sur ces figures, on peut voir l'influence d'une variation de la quantité de précipitation et de la température d'air sur la tenue ou non de la neige au sol. Pour les différentes variations appliquées, la couleur blanche signifie une présence de neige sur la chaussée, selon la définition adoptée, et une couleur est équivalente à une absence de neige, la couleur correspond ainsi à la température de surface minimale prévue.

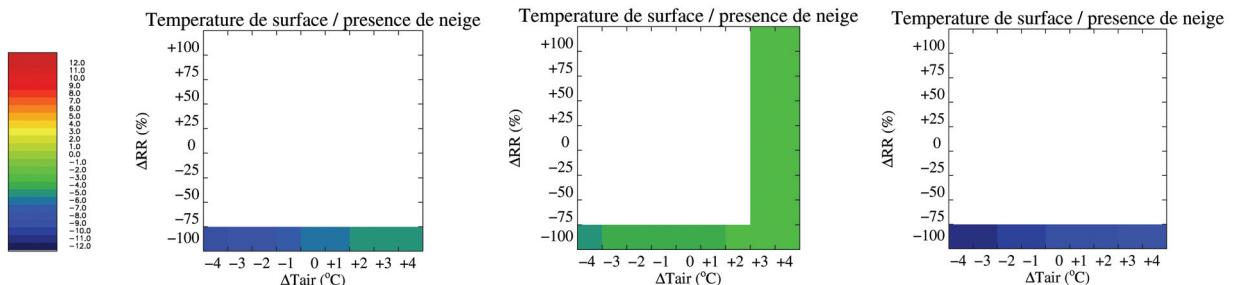


Figure 5.4 : Sensibilité de la prévision à une variation de la température d'air prévue et de la quantité de précipitation prévue pour la prévision du 5 au 6 décembre 98 (gauche), pour la prévision du 10 au 11 décembre 1998 (centre) et pour la prévision du 24 au 25 décembre 1998 (droite). La couleur blanche représente la présence de neige sur la chaussée, la partie colorée représente la température de surface minimum en absence de neige sur la chaussée.

Sur la figure 5.4, on peut voir que la tenue de la neige au sol est très peu sensible à la quantité de précipitation, en effet seule la suppression totale des précipitations équivaut à une non prévision de la tenue de la neige au sol. De la même manière, les températures largement

négatives correspondantes à ces 3 jours, montrent qu'une large surestimation de la température de l'air prévue n'aurait pas eu de conséquences sur la tenue de la neige au sol. En effet, pour les prévisions du 5 au 6 décembre et du 24 au 25 décembre une prévision de température de surface en moyenne supérieure de 4°C à la prévision initiale n'aurait pas suffit à ne pas prévoir la tenue de la neige au sol.

Concernant la prévision du 10 au 11 décembre, une mauvaise prévision de la tenue de la neige au sol aurait nécessité une surestimation moyenne de 3°C, valeur qui est élevée et qui par conséquent nécessite une très mauvaise prévision (ébauche) issue du modèle ALADIN.

De la même manière, on s'intéresse également aux cas de bonnes prévisions de l'absence de neige sur la chaussée. Deux exemples sont montrés sur la figure 5.5, du 13 au 14 décembre ($t=53$ à 54 jours, figure 5.3) et du 18 au 19 décembre ($t=58$ à 59, figure 5.3).

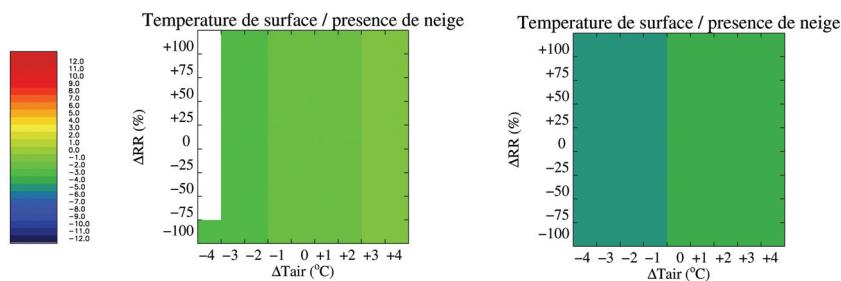


Figure 5.5 : Sensibilité de la prévision à une variation de la température d'air prévue et de la quantité de précipitation prévue pour la prévision du 13 au 14 décembre 1998 (gauche) et pour la prévision du 18 au 19 décembre 1998 (droite). La couleur blanche représente la présence de neige sur la chaussée, la partie colorée représente la température de surface minimum en absence de neige sur la chaussée.

Du 13 au 14 décembre, seule une prévision de température d'air inférieure de 4°C à la prévision aurait permis de prévoir une tenue de la neige sur la chaussée non observée, donc pour une prévision très éloignée de la prévision réelle. De plus, comme pour les exemples de bonnes prévisions de tenue de la neige montrés précédemment, la sensibilité du modèle à la variation de la quantité de précipitation est faible. Dans ce cas, la précipitation neigeuse se produit au cours des 4 premières échéances et est de faible intensité (inférieure à 1mm d'équivalent en eau par heure), période au cours de laquelle la température de chaussée est largement positive, ainsi la neige fond au contact du sol, même en doublant la quantité de précipitation.

Du 18 au 19 décembre, la précipitation neigeuse se produit au cours des 2 dernières échéances, et la faible quantité de précipitation ne permet pas la tenue de la neige sur une période continue d'au moins 2 heures à la fin de la période.

5.3.4.2. Exemple de résultats pour de mauvaises prévisions

Toujours pour le mois de décembre 1998 (figure 5.3), les résultats des tests de sensibilité sont montrés pour les 3 cas de mauvaise prévision sur la figure 5.6: entre le 4 et le 5 décembre et entre le 9 et 10 décembre 1998 (de $t=44$ à 45 jours et de $t=49$ à 50 jours), qui sont cas de présence de neige au sol prévue mais non observée, et entre le 19 et le 20 décembre 1998 (de $t=59$ à 60 jours), qui est un cas de présence de neige au sol observée mais non prévue.

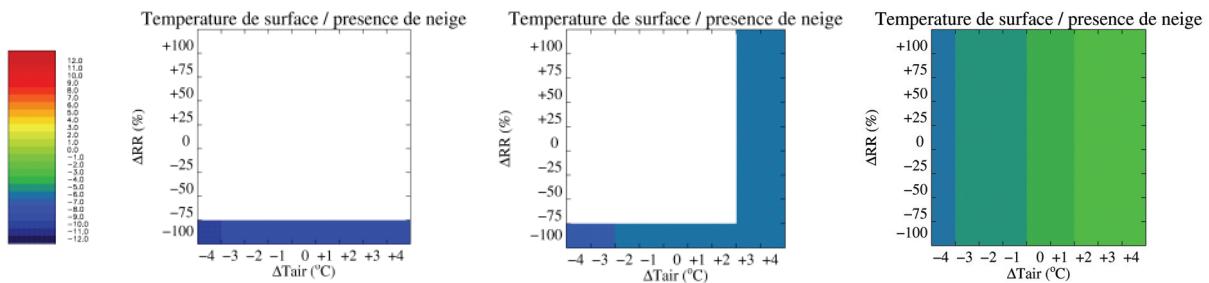


Figure 5.6 : Sensibilité de la prévision à une variation de la température d'air prévue et de la quantité de précipitation prévue pour la prévision du 4 au 5 décembre 1998 (gauche), pour la prévision du 9 au 10 décembre 98 (centre) et pour la prévision du 19 au 20 décembre 1998 (droite). La couleur blanche représente la présence de neige sur la chaussée, la partie colorée représente la température de surface minimum en absence de neige sur la chaussée.

Comme expliqué en section 5.3.3.4, les cas de mauvaise prévision sont essentiellement dus à une mauvaise prévision de la précipitation. Ainsi, du 4 au 5 décembre, une importante chute de neige a été prévue mais non observée. Les températures d'air prévues étant proches de celles observées et très négatives (environ -7°C), même une prévision de température relativement supérieure à celle observée n'aurait pas suffit à modifier le type de précipitation (pluie en place de la neige), donc dans ce cas la mauvaise prévision est due uniquement à la mauvaise prévision de précipitation.

De la même manière, du 9 au 10 décembre, une importante précipitation a été prévue mais non observée. Pour obtenir une bonne prévision, c'est à dire une absence de neige sur la chaussée, il aurait fallu prévoir une température d'air supérieure de 3°C à la prévision, et ainsi prévoir de la

pluie en place de la neige. Ceci correspondrait à compenser une mauvaise prévision de la précipitation par une mauvaise prévision de la température de l'air. En effet, au moment de la précipitation prévue, la prévision de la température de l'air est quant à elle correcte (environ -1°C au cours de la nuit pour la température d'air prévue et observée).

Du 19 au 20 décembre, la mauvaise prévision correspond au cas opposé aux 2 précédentes, c'est à dire une présence de neige au sol observée mais non prévue. Ainsi, une faible précipitation neigeuse a été observée pendant une heure et a tenu sur la chaussée (quelques millimètres). Cependant cette précipitation n'a pas été prévue, rendant fausse la prévision, indépendamment de la température prévue.

5.3.4.3. Exemple de résultats pour des cas limites

La majorité des cas sont similaires à ceux détaillés précédemment, cependant certains cas sont plus intéressants, lorsque la prévision se situe en limite de transition entre une bonne et une mauvaise prévision. Ces cas se produisent essentiellement au début ou en fin d'hiver, où la sensibilité à la température de l'air prévue est plus remarquable. En effet, au cœur de l'hiver, les températures au cours des chutes de neige sont souvent très négatives, rendant le modèle peu sensible à un écart de température de quelques degrés. Par contre, au début ou en fin d'hiver, on se retrouve fréquemment avec des températures proches de 0°C au moment de la chute, rendant le modèle beaucoup plus sensible à une différence de température d'air prévue de quelques degrés. Des exemples sont montrés sur la figure 5.7 : une mauvaise prévision, du 26 au 27 octobre 1998, et une bonne prévision, du 11 au 12 avril 1999.

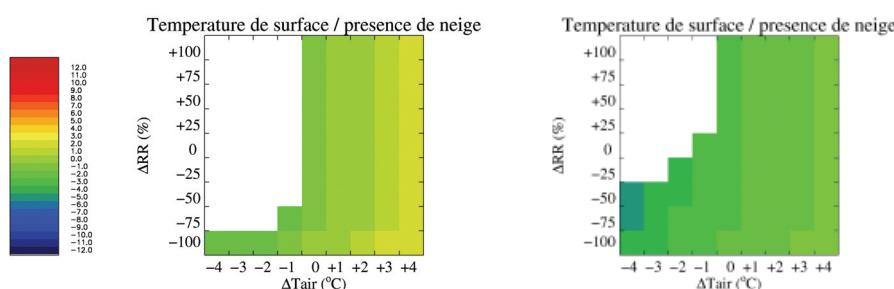


Figure 5.7 : Sensibilité de la prévision à une variation de la température d'air prévue et de la quantité de précipitation prévue pour la prévision du 26 au 27 octobre 1998 (gauche) et pour la prévision du 26 au 27 avril 1999 (droite). La couleur blanche représente la présence de neige sur la chaussée, la partie colorée représente la température de surface minimum en absence de neige sur la chaussée.

La prévision du 26 au 27 octobre représente un cas de mauvaise prévision, où de la neige sur la chaussée a été observée mais non prévue. En effet, une importante précipitation neigeuse a été observée au cours de cette période et a permis la tenue de la neige sur le sol. Cette importante précipitation a également été prévue, mais sous forme de pluie. Les températures d'air (prévues et observées) au moment de la précipitation fluctuant autour de 1°C, rendent la prévision très sensible à la température de l'air. Ainsi, une prévision de température légèrement inférieure à la prévision initiale aurait permis de prévoir la précipitation neigeuse et ainsi la tenue de la neige sur la route.

La prévision du 11 au 12 avril représente un cas de bonne prévision, où aucune présence de neige sur la chaussée n'a été prévue ou observée. Ce cas est un épisode de pluie se transformant en neige, correctement prévu. Ainsi, ce cas représente un des rares cas où la prévision se montre sensible à la quantité de précipitation. Au moment de la précipitation, se produisant de 6h à 15h, les températures de l'air (prévues et observées) se situent entre 2°C et 0°C. L'équivalent en eau prévu (environ 8.5mm) était supérieur à celui observé (environ 5,5mm), cependant la quantité de précipitation sous forme neigeuse étaient approximativement équivalente dans la prévision (environ 1.5mm) et dans l'observation (environ 2mm) et la transition pluie/neige a été correctement prévue. La principale différence se situe dans la quantité d'eau liquide précédent la chute de neige qui est environ 2 fois supérieure dans la prévision. Ainsi une prévision de température d'air plus froide aurait avancé cette transition et aurait entraîné une tenue de la neige sur la route, sauf en cas de meilleure prévision de la quantité de précipitation. En effet, une bonne prévision de la quantité d'eau liquide, c'est à dire une diminution de 50% par rapport à la prévision aurait permis de prévoir l'absence de neige sur la chaussée, même avec une prévision de température d'air dégradée.

5.3.4.4. Conclusion sur la sensibilité de la prévision

La stratification largement verticale observée sur les figures 5.4 à 5.7 nous montre que le modèle est plus sensible à la température de l'air qu'à la quantité de précipitation. De plus, lorsque le modèle se montre sensible à la précipitation, il l'est essentiellement par la présence ou non de précipitation, et très peu par la quantité de précipitation. En effet, la variation relative (au maximum d'un facteur 2) ne permet que rarement de modifier remarquablement l'intensité de la précipitation. Une variation absolue de la lame d'eau aurait probablement permis d'observer une plus grande sensibilité du modèle à la précipitation. La sensibilité aux conditions météorologiques se montre plus importante pour les épisodes de début d'hiver et de

printemps, où la température d'air se situe plus souvent vers le seuil de transition pluie/neige. Ce type d'épisodes correspond probablement plus souvent aux épisodes d'hiver en plaine.

Afin de tirer des conclusions sur la sensibilité totale du modèle, une étude plus poussée doit être effectuée. En effet, la température de l'air (et sa conséquence sur le rayonnement infrarouge et la phase de la précipitation) et la quantité de précipitation sont des paramètres importants, mais les autres paramètres météorologiques doivent également être pris en compte. En effet, le rayonnement visible est un terme très important, essentiellement en début et fin d'hiver, du bilan d'énergie. De même, les flux turbulents sont également importants en surface du manteau neigeux, ainsi l'humidité de l'atmosphère et le vent sont également des paramètres d'intérêt. C'est pourquoi une étude de sensibilité à tous les paramètres est nécessaire. De plus, les paramètres météorologiques sont dépendants entre eux, ainsi la sensibilité doit être étudiée avec une variation simultanée et réaliste de tous les paramètres. De même, l'incertitude associée aux prévisions du modèle doit être étudiée de manière précise, par exemple à partir d'une technique de prévision d'ensemble. Le principe consiste à perturber les conditions initiales de la chaussée en utilisant différentes prévisions à courte échéance et différentes propriétés de la chaussée, de manière à décrire la distribution statistique de la température de surface et de la hauteur de neige prévue.

5.4 Conclusion du chapitre

Les résultats du modèle couplé ISBA-Route/CROCUS avec des données météorologiques prévues nous prouvent que l'utilisation du modèle peut être envisagée dans un cadre opérationnel de prévision de l'état des routes en conditions hivernales. En comparaison avec les résultats obtenus pour la simulation avec le forçage observé sur le site, les résultats des prévisions (de l'évolution de température et de la présence de neige sur la chaussée) sont relativement satisfaisants, même pour la prévision C, qui est la plus proche des conditions opérationnelles.

Le taux de détection assez élevé (environ 70%) et le taux de fausses alarmes assez faible (environ 30%) nous montrent que la prévision de l'événement "présence de neige au sol" est satisfaisante sur le site expérimental. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Shao (1995) concernant la prévision de verglas en surface des routes. Les cas de mauvaise prévision de la présence de neige sur la chaussée, ont été essentiellement dus à une mauvaise prévision de

la précipitation, plutôt qu'au modèle lui-même (fonte de la précipitation au contact avec la route ou inversement).

De même, concernant la prévision de température de surface, l'écart quadratique moyen (environ 5°C) et l'erreur moyenne (environ 2.5 °C) sont des résultats relativement corrects considérant le contexte de la prévision (pas de prise en compte des masques solaires, absence d'utilisation de mesure). De plus, la dégradation est essentiellement sensible au niveau des maximums diurnes de température. Or, pour les problèmes relatifs à la viabilité hivernale, la prévision des minimums de température de surface est beaucoup plus importante.

La sensibilité du modèle à certains paramètres météorologiques prévus (la quantité de précipitation, la température de l'air ainsi que son influence sur le rayonnement infrarouge incident ou le type de précipitation) a également été abordée. Ces tests de sensibilité ont confirmé l'importance du type de précipitation prévu (neige ou pluie) dans la prévision de la présence de neige au sol. Cette étude a montré une influence beaucoup plus marquée de la température d'air prévue que de la quantité de précipitation. Cependant, la sensibilité à la quantité de précipitation est plus marquée pour des épisodes de début d'hiver ou printaniers, périodes au cours desquelles la température de l'air se situe souvent aux alentours de 0°C au moment de la précipitation. Ce type d'épisode peut correspondre aux épisodes hivernaux se produisant en plaine. La sensibilité du modèle doit être étudiée de manière plus réaliste et approfondie que celle utilisée dans cette étude. De même, l'incertitude associée aux prévisions doit être étudiée précisément. L'utilisation des prévisions météorologiques d'ensemble, comme celles du modèle ALADIN (pour la courte échéance) ou celles du Centre Européen de Prévision (pour le moyen terme), serait une méthode qui permettrait d'introduire une incertitude sur les prévisions. Cette méthode permettrait de fournir des prévisions équiprobables de la température de surface et de l'occurrence de neige sur la chaussée.

La prochaine étape consiste à spatialiser le modèle à l'échelle de la France, à effectuer des prévisions sur la France entière et à confronter les prévisions aux mesures de stations météoroutières. L'utilisation du modèle dans ce contexte permettra d'apprécier l'influence de facteurs non pris en compte dans le modèle, le trafic routier et les fondants.

Chapitre 6

Prévision à l'échelle de la France

Prévision à l'échelle de la France

6.1 Introduction

Dans cette section, on s'intéresse au modèle dans sa version spatialisée sur la France. La méthode utilisée pour la spatialisation du modèle est présentée ici. Les résultats des simulations sur l'hiver 2004/05 sont discutés et comparés à différentes mesures. La validation spatiale des prévisions des épisodes neigeux est effectuée à partir des mesures des stations du réseau de Météo-France et les validations des prévisions de température de surface sont effectuées ponctuellement à partir de mesures de données de stations météoroutières.

6.2 Le modèle spatialisé

Le modèle ISBA-Route développé au cours de cette étude est actuellement utilisé de manière opérationnelle pour la prévision de la température de surface des chaussées routières en France. Le principe de prévision utilisé opérationnellement est proche de celui décrit en section 5.2.2. Ainsi, l'échéance de prévision est de 24h et le réseau utilisé est également 6h – 6h. Le modèle ISBA-Route est utilisé avec le modèle SAFRAN au sein de la chaîne opérationnelle SAFRAN-ISBA-ROUTE. Cette chaîne est dérivée de la chaîne opérationnelle SAFRAN-ISBA-MODCOU, utilisée pour la prévision hydrologique. La résolution horizontale du modèle SAFRAN à l'échelle de la France est d'environ 8km. La grille utilisée comprend 9892 points de grille, chaque point étant représenté par sa latitude, sa longitude et l'altitude moyenne de la maille. La chaîne opérationnelle SAFRAN-ISBA-ROUTE fournit des prévisions de température de surface destinées aux exploitants autoroutiers.

Cette étude se place dans le même contexte, avec l'apport de la prévision de présence de neige par rapport à la chaîne opérationnelle SAFRAN-ISBA-ROUTE. Ainsi, le modèle couplé ISBA-Route/CROCUS a été spatialisé et utilisé en prévision avec le modèle SAFRAN. La résolution horizontale associée est donc d'environ 8km.

6.3 Recherche d'un état initial

La simulation a été effectuée sur une année entière, du 1 août 2004 au 1 août 2005. Le principe de la prévision utilisé est identique à la prévision effectuée sur le site expérimental du Col de Porte, expliqué en section 5.2.2.1. Cependant, chaque maille a dû être initialisée pour débuter la simulation avec le forçage analysé.

Le temps de calcul sur la France étant relativement élevé, il n'a pas été possible de réaliser un bouclage sur 10 ans avec le forçage analysé comme au Col de Porte afin d'obtenir un profil de température en profondeur réaliste sur toutes les mailles. Pour l'initialisation du modèle, on a considéré uniquement une variation de température dans le sol avec la latitude et avec l'altitude. Ainsi, un bouclage a été réalisé sur la maille de latitude la plus au Nord (51.1°) et sur la maille de latitude la plus au Sud (41.2°). Un gradient Nord/Sud a ensuite été appliqué à toutes les mailles, à partir de ces profils extrêmes. De la même manière, un gradient d'altitude a été appliqué pour les mailles dont l'altitude est supérieure à 300m. Cette méthode a permis d'obtenir le profil de température en profondeur (de 1m à 10m) pour chaque maille. Le profil de température sur le premier mètre de profondeur est obtenu en extrapolant pour chaque maille la température de surface (prise égale à la température de l'air à 2 mètres à la date considérée) avec la température à 1 mètre obtenue précédemment.

Afin d'apprécier l'influence du profil initial de température, un test de sensibilité a été effectué. La simulation de l'année 2004/05 a été effectuée sur la maille d'altitude la plus élevée (3322 m), soumise à une quantité très importante de précipitations neigeuses. Une première simulation a été effectuée avec le profil initial issu du bouclage sur cette maille. Une seconde simulation a été effectuée avec le profil issu du bouclage sur la maille la plus au Sud, donc avec des températures dans le sol beaucoup plus élevées (14.5°C en moyenne). L'erreur moyenne (calculée par rapport au profil correspondant à la maille) et l'écart quadratique moyen sont donnés dans le tableau 6.1, pour la température de surface et la hauteur de neige.

	ME	RMS
Température de surface (°C)	0.44	0.78
Hauteur de neige (cm)	-0.02	0.1

Tableau 6.1 : Influence du profil de température initial dans le sol sur la température de surface et sur la hauteur de neige. ME est l'erreur moyenne et RMS est l'écart quadratique moyen.

On peut voir que l'influence du profil initial de température sur la hauteur de neige est négligeable, avec une erreur moyenne et un écart quadratique moyen de l'ordre du dixième de centimètre. De même, l'influence sur température de surface est assez faible, l'erreur moyenne étant inférieure à 0.5 °C et l'écart quadratique moyen étant inférieur à 0.8 °C. Les différences de température sont essentiellement sensibles les premiers jours de simulation (au mois d'août) donc relativement loin de la période hivernale d'intérêt. De même, lorsqu'on compare les résultats des deux simulations, les hauteurs de neige moyennes sur la chaussée simulées sont similaires (1.48 cm contre 1.46 cm pour la simulation avec le profil plus chaud). Dans la simulation effectuée avec le profil réaliste, on dénombre 133 jours avec présence de neige sur la chaussée (conformément à la définition adoptée). Concernant la simulation avec le second profil, les résultats sont similaires, on dénombre 131 jours avec présence de neige sur la chaussée. Les 2 jours qui diffèrent mettent en jeu des faibles épaisseurs de neige, environ 0.5 cm, qui ne tiennent pas sur la chaussée dans la simulation avec le profil plus chaud.

De plus, le profil utilisé pour apprécier la sensibilité du modèle est extrêmement éloigné du profil réaliste obtenu après un bouclage sur 10 ans. On peut donc en déduire que l'initialisation effectuée ne dégradera pas les résultats des prévisions au cours de l'hiver 2004/05, par rapport à un profil plus réaliste (avec un bouclage sur 10 ans effectué sur toutes les mailles).

6.4 Validation à partir de données de stations météoroutières

Une validation ponctuelle des simulations de l'hiver 2004/05 a pu être effectuée à partir de mesures de température de surface disponibles pour certains points de grille. Ces données sont des données opérationnelles provenant essentiellement d'exploitants autoroutiers (COFIROUTE, ATMB, SANEF, ASF). Une autre série de données nous a également été fournie par un exploitant, mais elle se situe légèrement hors du contexte routier. Il s'agit de

mesures d'une station météoroutière installée sur l'aéroport d'Orly, en région parisienne, fourni par l'exploitant ADP. Hormis pour la station installée sur l'aéroport d'Orly, les capteurs de températures des stations sont installés sur la voie de circulation lente des autoroutes. Ainsi, les mesures prennent en compte l'influence du trafic et des fondants routiers, qui sont des facteurs non pris en compte dans le modèle.

Les résultats des simulations de l'hiver 2004/05 ont ainsi pu être confrontés aux mesures de ces stations.

Comme pour les simulations effectuées sur le site expérimental du Col de Porte, les scores utilisés sont l'erreur moyenne globale ME_g et l'écart quadratique moyen global RMS_g (définis en section 5.3.3). Cependant, l'absence de capteurs de hauteur de neige sur les stations météoroutières ne permet pas de valider la présence de neige avec certitude. Ainsi, les scores sont calculés pour l'intégralité des jours, même avec présence de neige. Ceci permet de prendre en compte l'influence de la neige sur la température de surface, bien que les chaussées soient déneigées fréquemment par les exploitants autoroutiers et que les simulations ne prennent pas en compte l'utilisation de fondants routiers (retardant ou empêchant la tenue de la neige sur le sol). Cependant, la présence de neige est très rare sur les autres points de mesure, du moins dans les simulations (quelques jours avec des épaisseurs faibles sur des échantillons de plusieurs mois), à l'exception de l'autoroute A40 (une dizaine de jours avec des épaisseurs importantes sur un échantillon de 1.5 mois). Ainsi, seuls les jours présentant des pannes de capteur ont été supprimés des échantillons pour les calculs statistiques.

6.4.1 Données de validation

La base de données constituée grâce aux données fournies par les exploitants est la suivante :

- ADP : une station de mesure sur l'aéroport d'Orly pour l'intégralité du 1 août 2004 au 31 juillet 2005.
- COFIROUTE : une station de mesure (point kilométrique 7 de l'autoroute A10, en région parisienne), pour la période du 1 novembre 2004 au 30 avril 2005.
- ATMB : 7 stations de mesures (voir section 2.3.3 pour la localisation géographique), pour la période du 1 janvier au 15 février 2005
- SANEF : 5 stations de mesures situées sur l'autoroute A4 dans l'Est de la France (départements du Bas-Rhône et de la Moselle), pour la période du 2 février au 30 avril 2005.

- ASF : 7 stations de mesures situées sur l'autoroute A20 (dans le département de la Haute-Vienne), pour la période du 1 janvier au 30 avril 2005.

La précision des stations de mesure autoroutières ne nous a pas été communiquée. Cependant, la station installée sur l'Aéroport d'Orly est une station similaire à celles installées sur les autoroutes. La précision sur la température de surface pour la station d'Orly est de +/- 0.6°C. Ainsi la précision des capteurs des autres stations météoroutières est probablement du même ordre de grandeur.

Le réseau autoroutier français est montré sur la figure 6.1.

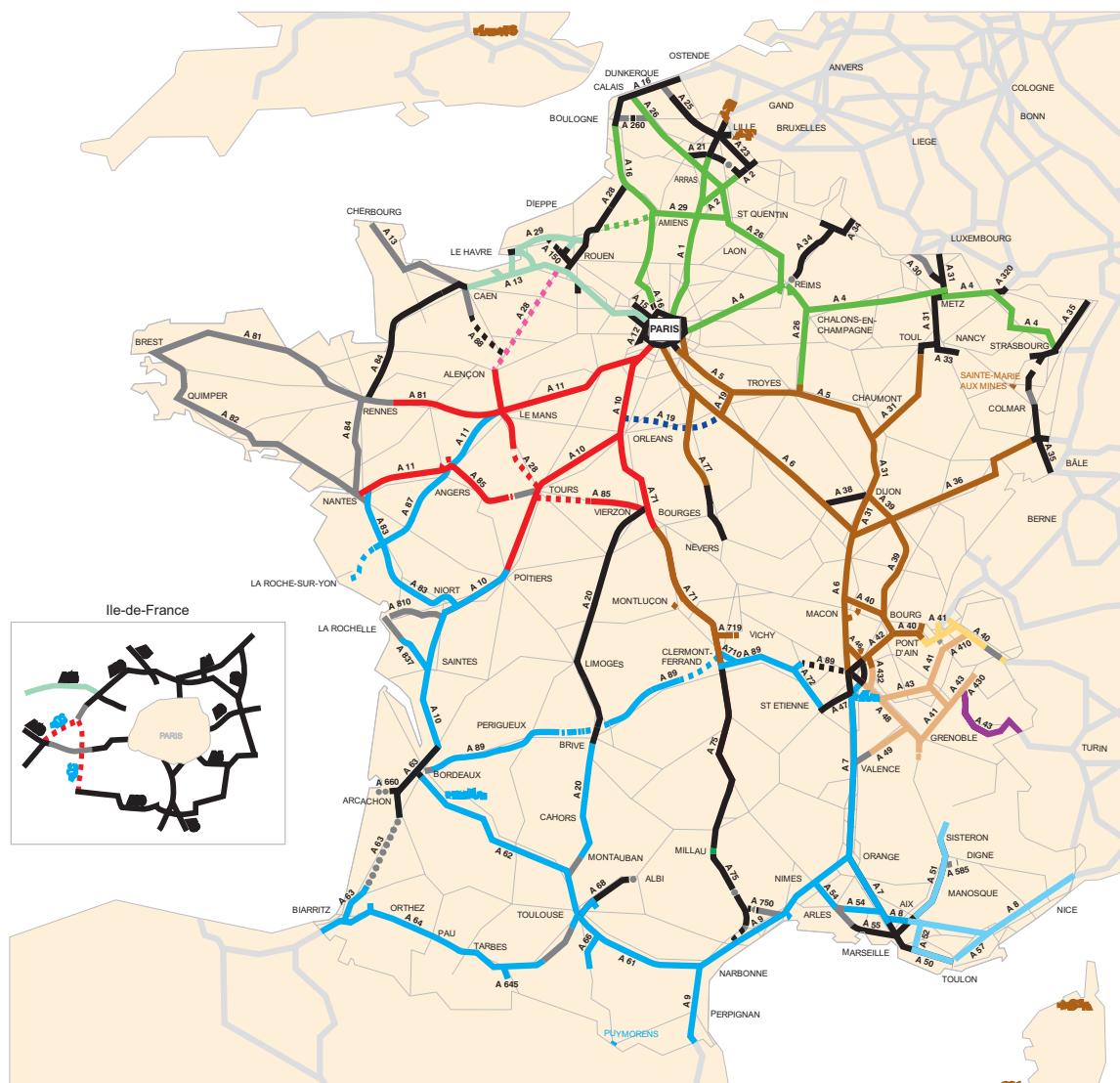


Figure 6.1 : réseau autoroutier français, source : Direction des Routes (<http://www.route.equipement.gouv.fr/>)

6.4.2 Autoroute A40

L'autoroute A40 est la seule parmi celles étudiées à avoir été soumise à plusieurs épisodes neigeux importants. De plus, de par sa configuration géographique (section 2.3.3), il s'agit de l'autoroute la plus soumise au problème de la viabilité hivernale. Les résultats statistiques globaux (ME_g et RMS_g) sont présentés dans le tableau 6.2 pour chaque station, pour la simulation en analyse et la prévision.

STATION	Forçage analysé		Prévision	
	MEg (°C)	RMSg (°C)	MEg (°C)	RMSg (°C)
Passy	0.3	2.8	1.5	3.3
Cluses	3.5	4.5	3.4	5.0
Bonneville	4.0	5.3	4.3	6.1
Nangy	0.9	2.3	1.3	3.1
Pont 2	1.3	2.7	1.7	3.7
Bossey	0.3	2.9	0.7	3.9
Viry	-1.0	2.5	-0.6	2.9

Tableau 6.2 : Comparaison des erreurs moyennes globales et des écarts quadratiques moyens globaux sur la température de surface des différentes stations météoroutières de l'A40.

On peut remarquer sur le tableau 6.2 que les résultats ne sont pas homogènes pour toutes les stations. Par exemple, la forte valeur de l'erreur moyenne et de l'écart quadratique moyen pour les stations Cluses et Bonneville nous montre que les simulations (en analyse ou en prévision) pour ces 2 stations sont beaucoup moins satisfaisantes que pour les autres. Au contraire, les statistiques calculées sur les autres stations nous montrent que les prévisions sont assez satisfaisantes, avec une erreur moyenne de l'ordre de 1°C et un écart quadratique moyen de l'ordre de 3°C. La figure 6.2 montre les résultats graphiques pour une station où la prévision est satisfaisante (Viry) et la figure 6.3 montre les résultats graphiques pour une station où la prévision est relativement mauvaise (Bonneville).

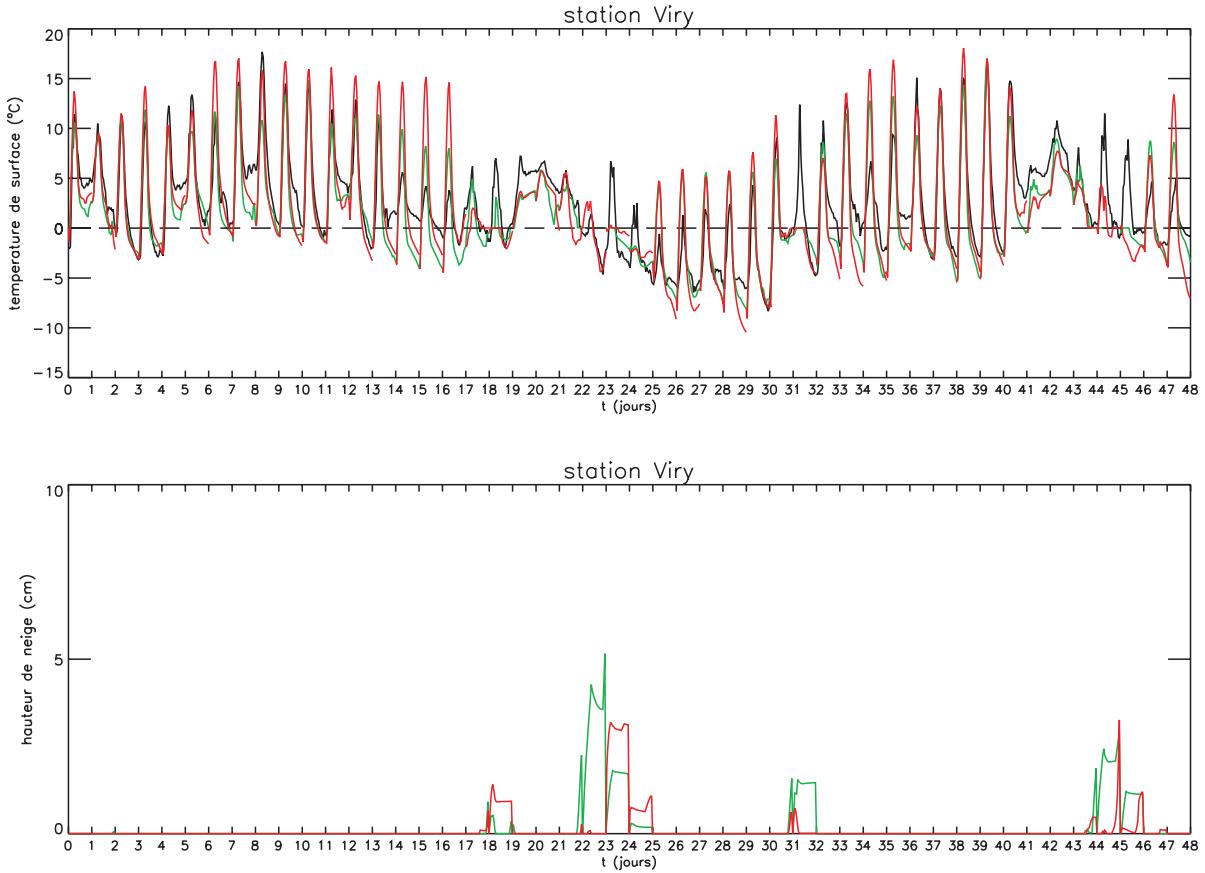


Figure 6.2 : a) Comparaison pour la période du 1 janvier au 18 février 2005 de la température de surface mesurée sur la station Viry (A40) (—) avec la température de surface simulée avec le forçage analysé (—) et avec la prévision (—); b) Simulations des hauteurs de neige sur la chaussée avec le forçage analysé (—) et en prévision(—).

La figure 6.2 confirme les résultats statistiques. En effet, la prévision de température de surface est relativement satisfaisante. Certaines différences existent au niveau des amplitudes diurnes. Ceci est dû à l'absence de prise en compte des masques solaires dans le modèle. De plus, les stations météoroutières sont souvent placées aux endroits les plus froids, donc souvent dans des zones relativement peu ensoleillées. C'est pourquoi la plupart des températures prévues au moment des maximums solaires est supérieure à la mesure. Ce problème n'est cependant pas le plus important pour l'exploitant autoroutier.

En effet, l'exploitant s'intéresse principalement au risque de gel, donc aux températures négatives. Les refroidissements nocturnes sont relativement bien prévus par le modèle, à part quelques exceptions, essentiellement la période du 14 au 17 janvier ($t=13$ à 16 jours). La simulation en analyse ne permet pas non plus une simulation satisfaisante de cette période. On se trouve probablement en présence d'un effet local au niveau de la station, comme du

brouillard, des nuages bas, entraînant un flux de rayonnement infrarouge beaucoup plus important que celui présent dans le forçage analysé ou prévu (inférieur à 250 W/m^2 sur l'intégralité de la période). Le problème de la prévision du brouillard et des nuages bas par le modèle ALADIN est un problème connu. Ainsi, une amélioration de ces prévisions sera associée à une meilleure prévision de la température de surface. Les résultats graphiques des autres stations (à l'exception de Cluses et de Bonneville) sont similaires.

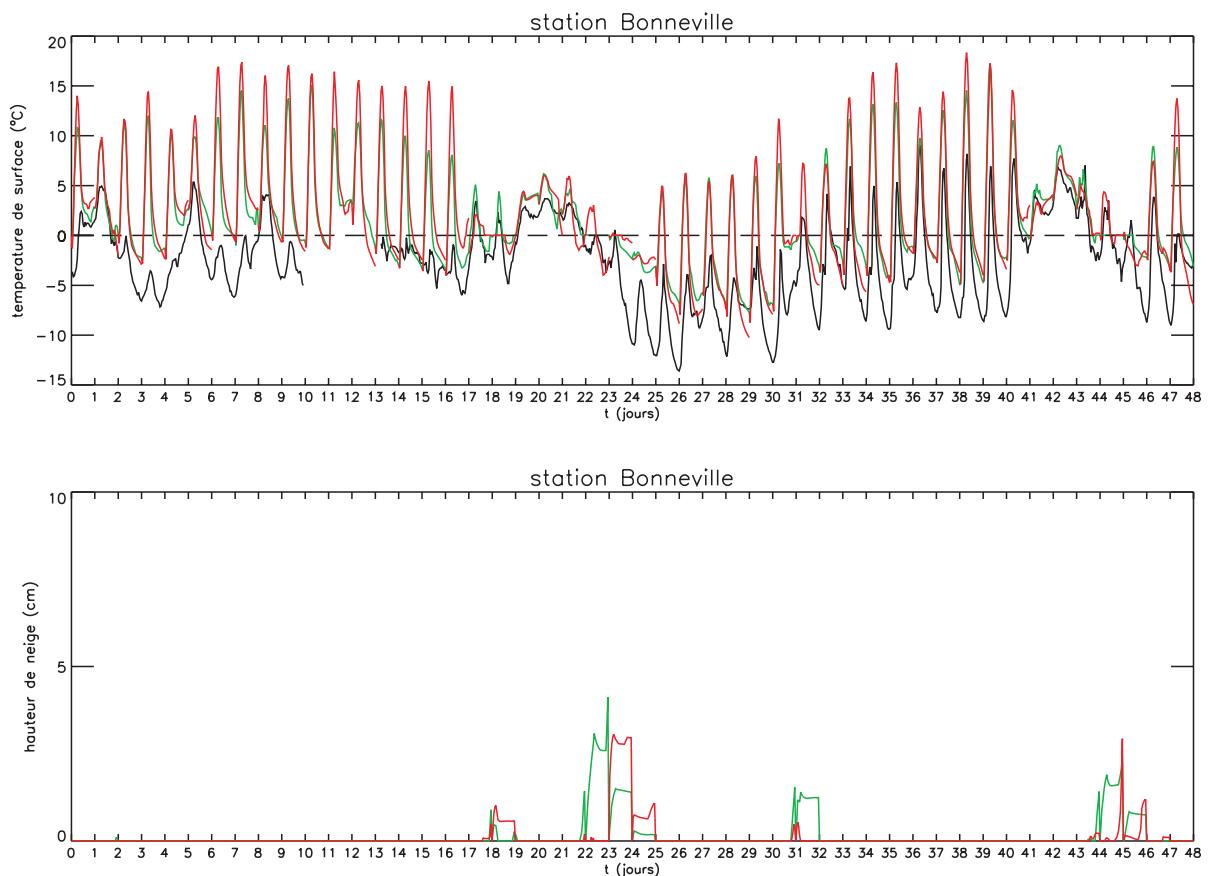


Figure 6.3 : a) Comparaison pour la période du 1 janvier au 18 février 2005 de la température de surface mesurée sur la station Bonneville (A40) (—) avec la température de surface simulée avec le forçage analysé (—) et avec la prévision (—); b) Simulations des hauteurs de neige sur la chaussée avec le forçage analysé (—) et en prévision(—).

La figure 6.3 confirme les prévisions beaucoup moins satisfaisantes au niveau de la station de Bonneville. On remarque en effet que le modèle prévoit des températures beaucoup trop élevées. Une cause possible de cette mauvaise prévision est la localisation de la station. Cette station est peut être placée à un endroit très froid, soumise à des effets locaux (non pris en compte dans le modèle) très importants (vent ou absence de soleil). Une autre cause de ces

mauvaises prévisions, avec des températures prévues très supérieures à celles mesurées, peut être un effet de vallée. En effet, il est possible que l'on se trouve en présence d'une inversion de température (avec une température plus froide en fond de vallée qu'en altitude) non détectée par le modèle ALADIN. Cependant, au cours de la seconde moitié de la période, le modèle parvient à prévoir la succession de températures négatives, bien qu'elles restent supérieures à la mesure. Les résultats graphiques de la station de Cluses sont similaires.

La température de surface ne permet pas, en général, de valider les épisodes neigeux. Cependant, grâce à une présence sur site (section 2.3.3), l'important épisode neigeux de la nuit du 14 au 15 février ($t=44$ à 45 jours) peut être validé. Une présence de neige de plus faible ampleur observée le lendemain a également été prévue par le modèle. De plus la température de surface mesurée fluctuant aux alentours de 0°C au moment de la chute de neige prévue permet de le confirmer. Ces deux épisodes ont été prévus pour l'ensemble des stations.

On s'intéresse maintenant aux minimums de température de surface, afin d'apprécier la capacité du modèle à prévoir les températures négatives représentant un risque de gel. Les figures 6.4 à 6.10 montrent les minimums de température simulés en fonction des minimums mesurés, pour l'ensemble des stations.

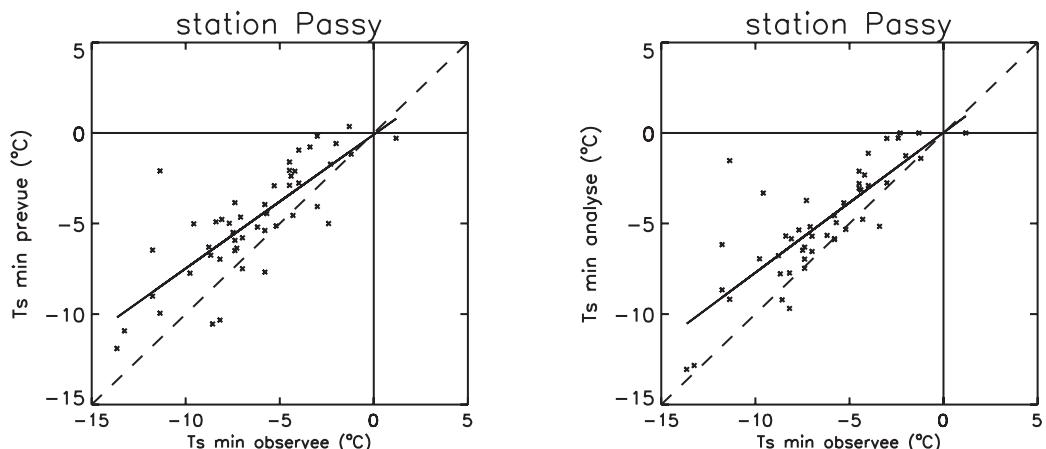


Figure 6.4 : minimums de température simulés (avec le forçage analysé et en prévision) en fonction des minimums mesurés, pour la station Passy.

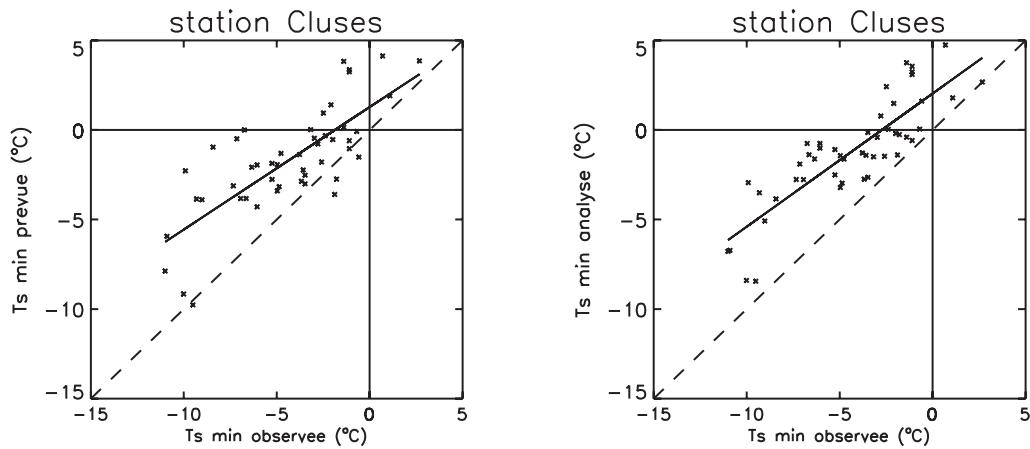


Figure 6.5 : minimums de température simulés (avec le forçage analysé et en prévision) en fonction des minimums mesurés, pour la station cluses.

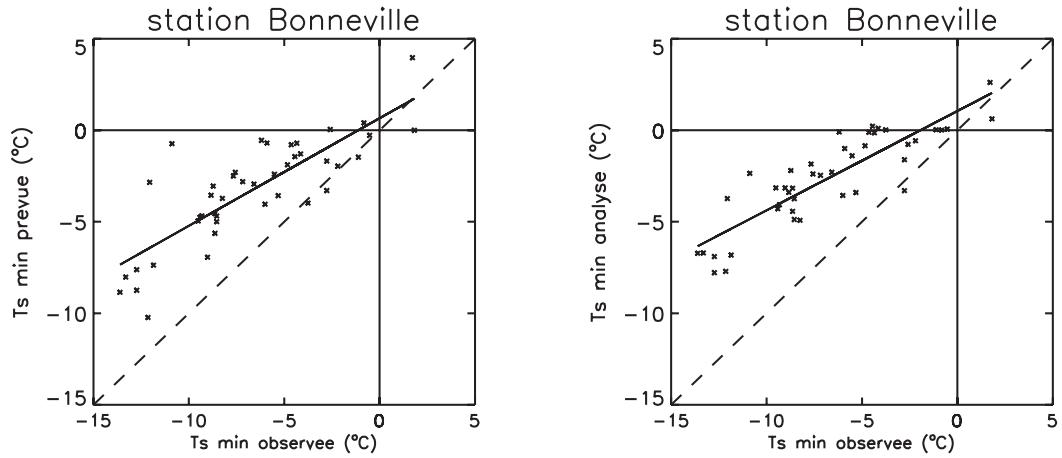


Figure 6.6 : minimums de température simulés (avec le forçage analysé et en prévision) en fonction des minimums mesurés, pour la station Bonneville.

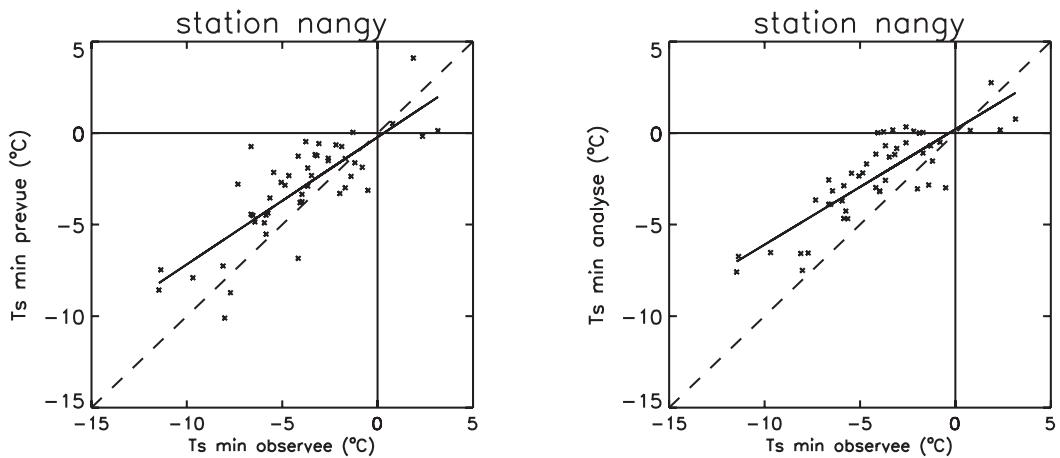


Figure 6.7 : minimums de température simulés (avec le forçage analysé et en prévision) en fonction des minimums mesurés, pour la station Nangy.

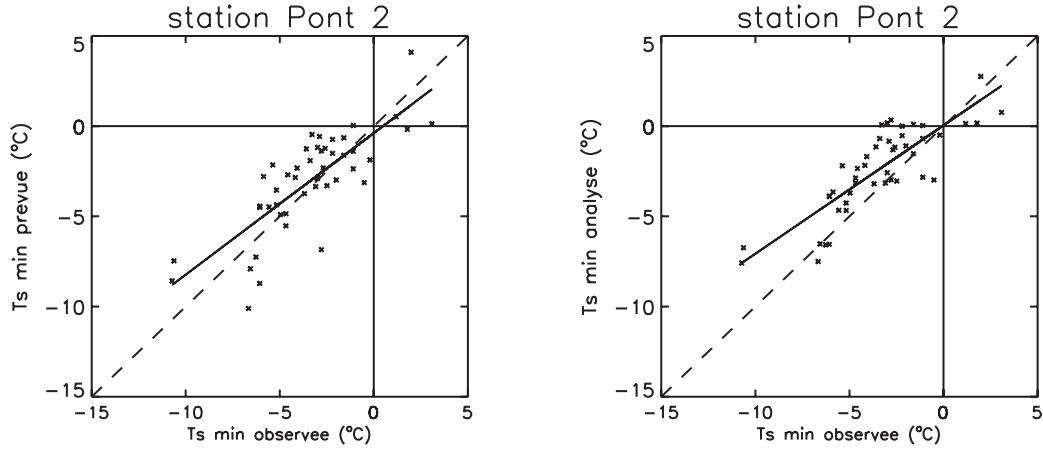


Figure 6.8 : minimums de température simulés (avec le forçage analysé et en prévision) en fonction des minimums mesurés, pour la station Pont 2.

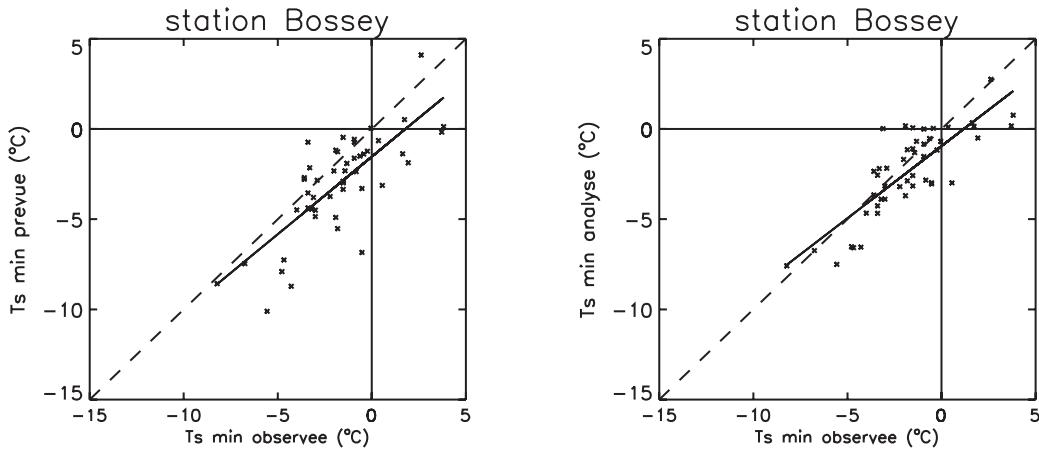


Figure 6.9 : minimums de température simulés (avec le forçage analysé et en prévision) en fonction des minimums mesurés, pour la station Bossey.

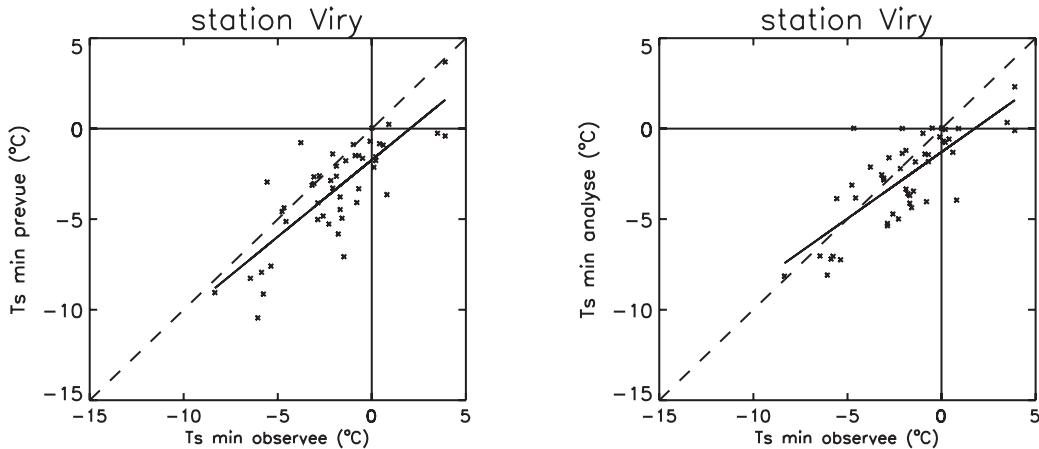


Figure 6.10 : minimums de température simulés (avec le forçage analysé et en prévision) en fonction des minimums mesurés, pour la station Viry.

Hormis pour les stations Bossey et Viry (figures 6.9 et 6.10), le modèle a tendance à simuler (en analyse ou en prévision) des minimums de température supérieurs à la mesure. Cependant, la forte densité de points sur les quarts inférieurs gauche de chaque graphique nous montre que les prévisions sont relativement satisfaisantes. En effet, les simulations (analyse ou prévision) de température négative sont souvent confirmés par la mesure. Des tables de contingence ont pu être établies à partir de ces résultats. Des scores statistiques ont été calculés :

- Erreur moyenne entre le minimum simulé et le minimum mesuré : ME
- Ecart quadratique moyen entre le minimum simulé et le minimum mesuré : RMS
- Coefficient de corrélation : R²

- Taux de détection : TD
- Taux de fausses alarmes : TFA
- Taux de fausses détections : TFD

Ces résultats sont présentés dans le Tableau 6.3.

	ME (°C)	RMS (°C)	R²	TD (%)	TFA (%)	TFD (%)
Station Passy						
Prévision	1.587	2.565	0.629	98.0%	2.0%	100.0%
Analyse	1.475	2.455	0.6522	96.0%	0.0%	0.0%
Station Cluses						
Prévision	2.645	3.416	0.586	82.0%	0.0%	0.0%
Analyse	3.138	3.592	0.7195	78.0%	0.0%	0.0%
Station Bonneville						
Prévision	3.438	4.149	0.6654	95.0%	3.0%	14.0%
Analyse	4.133	4.678	0.7531	85.0%	0.0%	0.0%
Station Nangy						
Prévision	1.015	2.152	0.6373	98.0%	2.0%	25.0%
Analyse	1.705	2.425	0.7034	86.0%	0.0%	0.0%
Station Pont 2						
Prévision	0.3551	1.834	0.6218	98.0%	2.0%	17.0%
Analyse	1.032	1.855	0.6913	88.0%	0.0%	0.0%
Station Bossey						
Prévision	-1.289	2.217	0.5769	98.0%	11.0%	62.5%
Analyse	-0.599	1.548	0.6728	90.0%	5.2%	25.0%
Station Viry						
Prévision	-1.428	2.253	0.6259	100.0%	17.8%	72.7%
Analyse	-0.7789	1.895	0.5901	92.0%	17.1%	63.6%

Tableau 6.3 : Statistiques sur la température de surface minimum simulée et mesurée sur les différentes stations météoroutières de l'A40.

Les statistiques du tableau 6.3 confirment les résultats établis pour la simulation de température globale, avec des résultats moins bons pour les stations de Cluses et de Bonneville. La prévision des cas de température minimum négative est relativement bonne (taux de détection très élevé et taux de fausses alarmes très faible). Cependant, ces scores ne sont pas très représentatifs car l'événement " température de surface minimum négative " est extrêmement

fréquent sur la période considérée. La faible présence de température de surface minimum positive dans l'échantillon explique la variation très importante du taux de fausses détections.

6.4.3 Autoroute A20

La localisation de l'autoroute A20 est montrée sur la figure 6.11.



Figure 6.11 : Localisation de l'autoroute A20, source : <http://olivier.sc.free.fr/>

Les résultats statistiques globaux (ME_g et RMS_g) sont présentés pour chaque station dans le tableau 6.4, pour la simulation en analyse et la prévision.

STATION	Forçage Analysé		Prévision	
	MEg (°C)	RMSg (°C)	MEg (°C)	RMSg (°C)
La Coulerouze	0.5	2.8	0.4	3.4
La garde	-0.3	2.8	-0.2	3.3
Laugerie	0.8	2.7	1.0	3.7
Le Mazataud	0.5	2.5	0.7	3.4
Magnac-Bourg	0.6	2.4	0.7	3.4
Népoulas	-1.0	2.6	-0.7	3.3
Pierre-Buffière	0.0	2.4	0.2	3.4

Tableau 6.4 : Comparaison des erreurs moyennes globales et des écarts quadratiques moyens globaux sur la température de surface des différentes stations météoroutières de l'A20.

Les résultats sont similaires entre les différentes stations, avec un écart quadratique d'environ 3°C pour la simulation avec le forçage analysé et de 4°C pour la prévision. Ces scores sont relativement satisfaisants et sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus sur l'autoroute A40. La prévision de température est donc satisfaisante sur les stations de l'autoroute A20. Les résultats graphiques sont similaires entre les différentes stations. Un exemple est montré sur la figure 6.12 pour la station Laugerie.

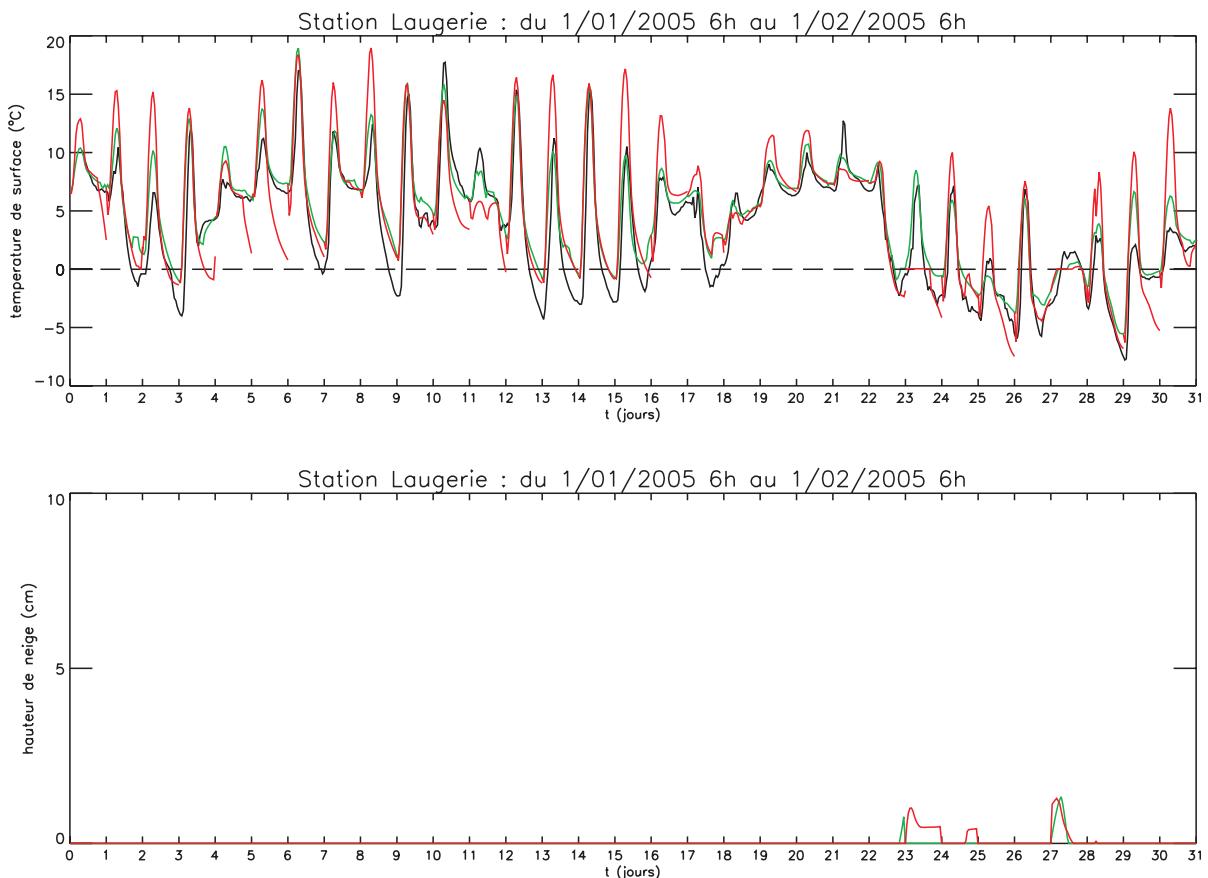


Figure 6.12 : a) Comparaison pour le mois de janvier 2005 de la température de surface mesurée sur la station Laugerie (A20) (—) avec la température de surface simulée avec le forçage analysé (—) et avec la prévision (—); **b)** Simulations des hauteurs de neige sur la chaussée avec le forçage analysé (—) et en prévision(—).

Sur la figure 6.12, on peut voir que la prévision de température de surface est assez précise. Comme il a été expliqué précédemment, l'absence de prise en compte des masques solaires entraîne des températures simulées supérieures à la mesure au cours de la journée. On voit que les forts refroidissements nocturnes de la fin du mois de janvier sont relativement bien prévus. Par contre, au début de la période, du 1 au 7 janvier (de $t=0$ à $t = 6$ jours), les prévisions sous

estiment largement la température de surface nocturne. Ceci est probablement dû à une mauvaise prévision de la nébulosité. En effet, ces sous estimations ne se produisent pas dans la simulation avec le forçage analysé. L'analyse des données météorologiques nous le confirme, avec une nébulosité et un flux de rayonnement infrarouge beaucoup plus important dans le forçage analysé que dans le forçage prévu pour les nuits correspondantes. Pour la période du 13 au 17 janvier (de $t=12$ à $t=16$ jours), on peut voir que la prévision, comme la mesure de température de surface deviennent négatives, cependant on se trouve ici en présence de températures faiblement négatives. Ainsi, les températures moins froides que sur l'autoroute A40, vont permettre de mieux estimer la prévision de l'événement température de surface minimum négative. Par exemple, sur la figure 6.13, on peut voir que les minimums de température de surface se répartissent équitablement entre températures positives et négatives.

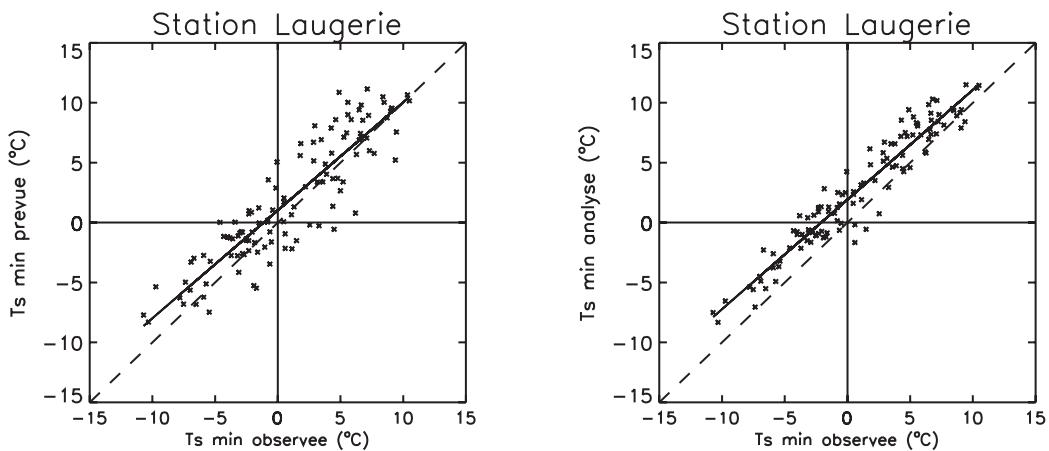


Figure 6.13 : minimums de température simulés (avec le forçage analysé et en prévision) en fonction des minimums mesurés, pour la station Laugerie.

Les résultats pour l'intégralité des stations sont donnés dans le tableau 6.5.

	ME (°C)	RMS (°C)	R ²	TD (%)	TFA (%)	TFD (%)
Station La Coulerouze						
Prévision	0.06762	2.321	0.7998	87.0%	16.0%	28.0%
Analyse	0.9422	2.101	0.8637	67.0%	13.0%	17.0%
Station La garde						
Prévision	-0.7344	2.052	0.8678	92.0%	29.0%	38.0%
Analyse	0.07721	1.552	0.9134	79.0%	21.0%	21.0%
Station Laugerie						
Prévision	0.9255	2.508	0.8017	81.0%	17.0%	29.0%
Analyse	1.835	2.332	0.9197	61.0%	10.0%	12.0%
Station Le Mazataud						
Prévision	-0.3747	2.009	0.8607	92.0%	30.0%	43.0%
Analyse	0.2369	1.554	0.9153	92.0%	23.0%	30.0%
Station Magnac-Bourg						
Prévision	0.2516	1.936	0.8588	90.0%	21.0%	37.0%
Analyse	0.9144	1.633	0.9258	83.0%	11.0%	16.0%
Station Népoulas						
Prévision	-1.142	2.448	0.8516	100.0%	30.0%	40.0%
Analyse	-0.6033	1.69	0.9264	96.0%	27.0%	32.0%
Station Pierre-Buffière						
Prévision	0.06574	2.221	0.8192	89.0%	25.0%	38.0%
Analyse	0.9321	1.676	0.9249	67.0%	14.0%	14.0%

Tableau 6.5 : Statistiques sur la température de surface minimum simulée et mesurée sur les différentes stations météoroutières de l'A20.

Dans le tableau 6.5, les taux de détection relativement élevés (supérieur à 80%) et les taux de fausses alarmes relativement faibles (inférieur à 30%) nous montrent que la prévision du minimum de température de surface est relativement satisfaisante, pour les stations de l'autoroute A20. Ces résultats sont du même ordre que ceux obtenus par Shao (1995).

6.4.4 Autoroute A4

La localisation de l'autoroute A4 est montrée sur la figure 6.14.

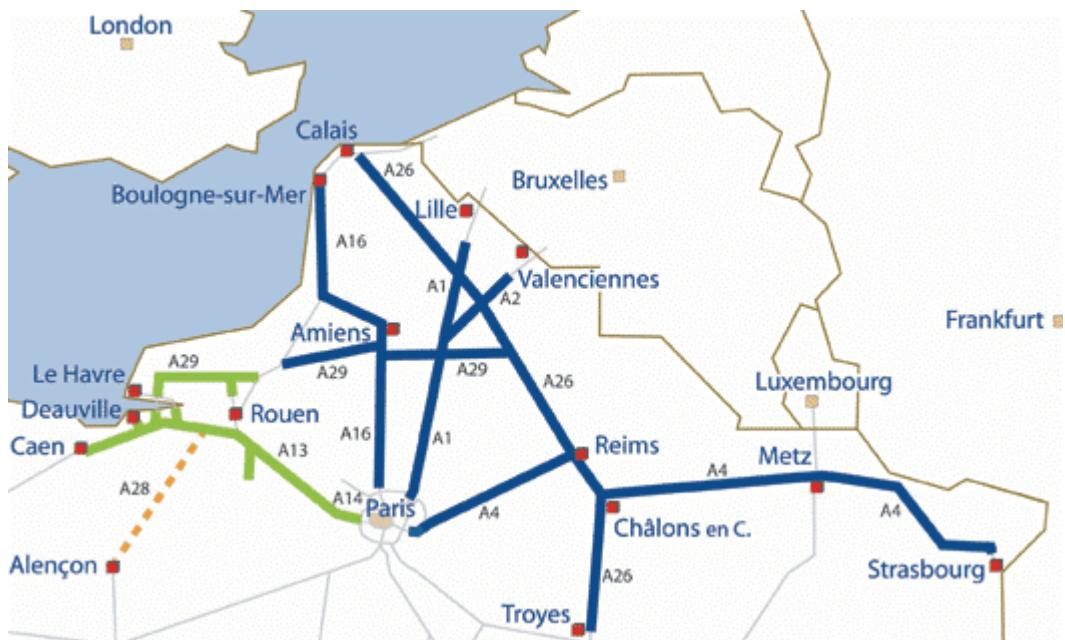


Figure 6.14 : Localisation de l'autoroute A4, source : <http://www.sanef.fr/>

De nombreuses pannes sont intervenues sur les capteurs de température, entraînant de fortes discontinuités sur la mesure de température. De plus, certaines périodes d'isothermie à 0°C sont apparues sur la mesure de température de surface, durant parfois plusieurs jours. Ces isothermies se retrouvaient simultanément sur la mesure de la température d'air à 2 mètres. Ces périodes n'ont pas pu être expliquées. En effet, la première cause aurait pu être thermodynamique, avec une présence d'eau et de glace au niveau du capteur. Cependant, cette isothermie se produit sur toute la période, notamment à la fin du mois d'avril, période relativement chaude sans présence de neige. Une étude réalisée à la Direction de la Production de Météo-France avec ces mêmes données (Leclaire et Suarez 2005) n'a pas permis d'identifier ce problème. En effet, ces périodes d'isothermies ne se retrouvent pas dans les données issues du Centre Départemental de la Météorologie de Metz. En absence de justification physique, ces périodes ont été supprimées de l'échantillon. De plus, cette isothermie se produit simultanément sur toutes les stations. Ce qui peut laisser penser à une défaillance électronique. Les résultats statistiques globaux (ME_g et RMS_g) sont présentés pour chaque station dans le tableau 6.6, pour la simulation en analyse et la prévision.

STATION	Forçage Analysé		Prévision	
	MEg (°C)	RMSg (°C)	MEg (°C)	RMSg (°C)
Bouchbach	0.3	3.0	0.6	3.5
Bouchehorn	0.2	2.9	0.9	3.4
Grundviller	0.1	3.2	0.2	3.7
Landonvilliers	-0.5	3.5	0.2	3.7
Steinbourg	0.0	2.8	0.1	3.6

Tableau 6.6 : Comparaison des erreurs moyennes globales et des écarts quadratiques moyens globaux sur la température de surface des différentes stations météoroutières de l'A4.

Les résultats sont similaires entre les différentes stations, avec un écart quadratique d'environ 3°C pour la simulation avec le forçage analysé et de 4°C pour la prévision. Ces scores sont relativement satisfaisants et sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus sur les autres autoroutes. La prévision de température est donc satisfaisante sur les stations de l'autoroute A4. De même, les résultats graphiques sont similaires entre les différentes stations. Un exemple est montré pour les 2 stations les plus éloignées géographiquement : les stations Landonvilliers (figure 6.15) et Steinbourg (figure 6.16), pour la période du 1 février au 2 mars 2005.

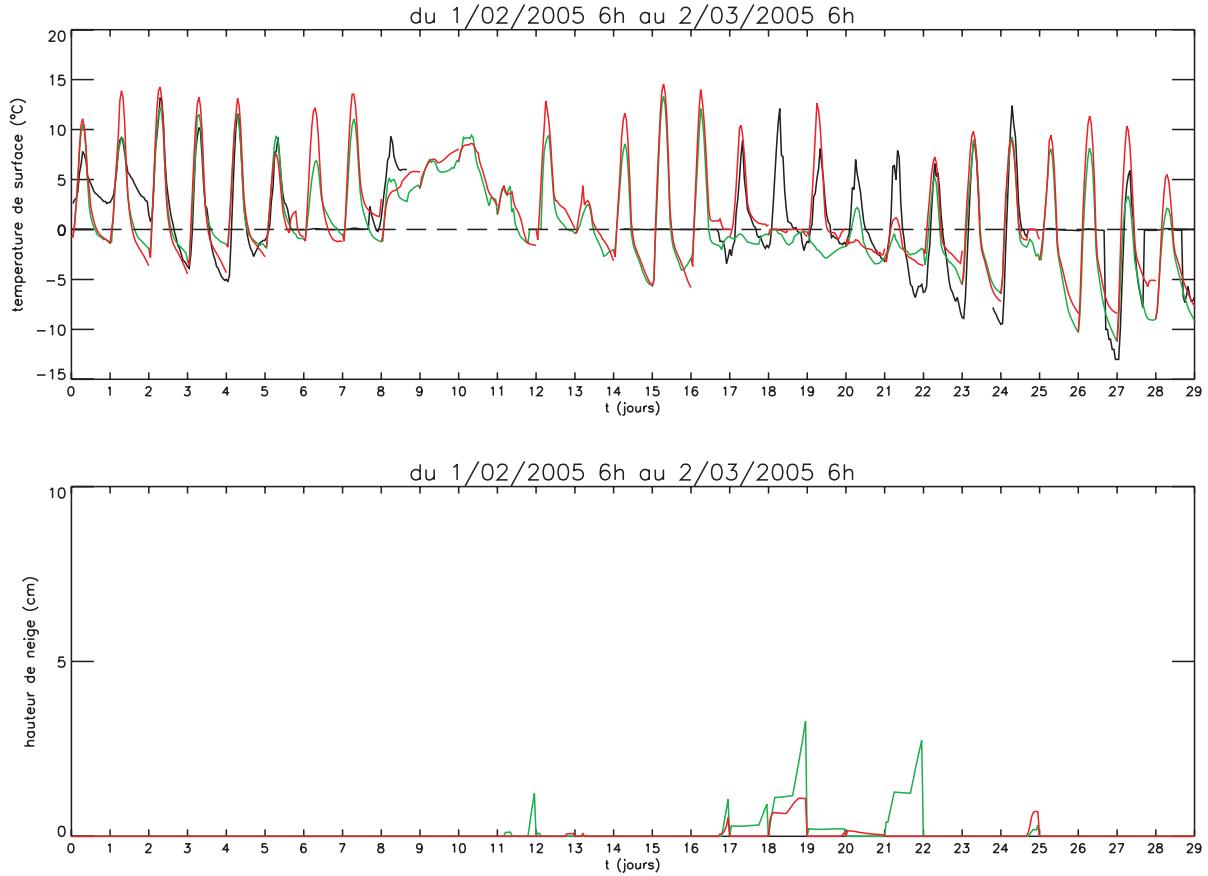


Figure 6.15 : a) Comparaison pour la période du 1 février au 2 mars 2005 de la température de surface mesurée sur la station Landonvilliers (A4) (—) avec la température de surface simulée avec le forçage analysé (—) et avec la prévision (—); b) Simulations des hauteurs de neige sur la chaussée avec le forçage analysé (—) et en prévision(—).

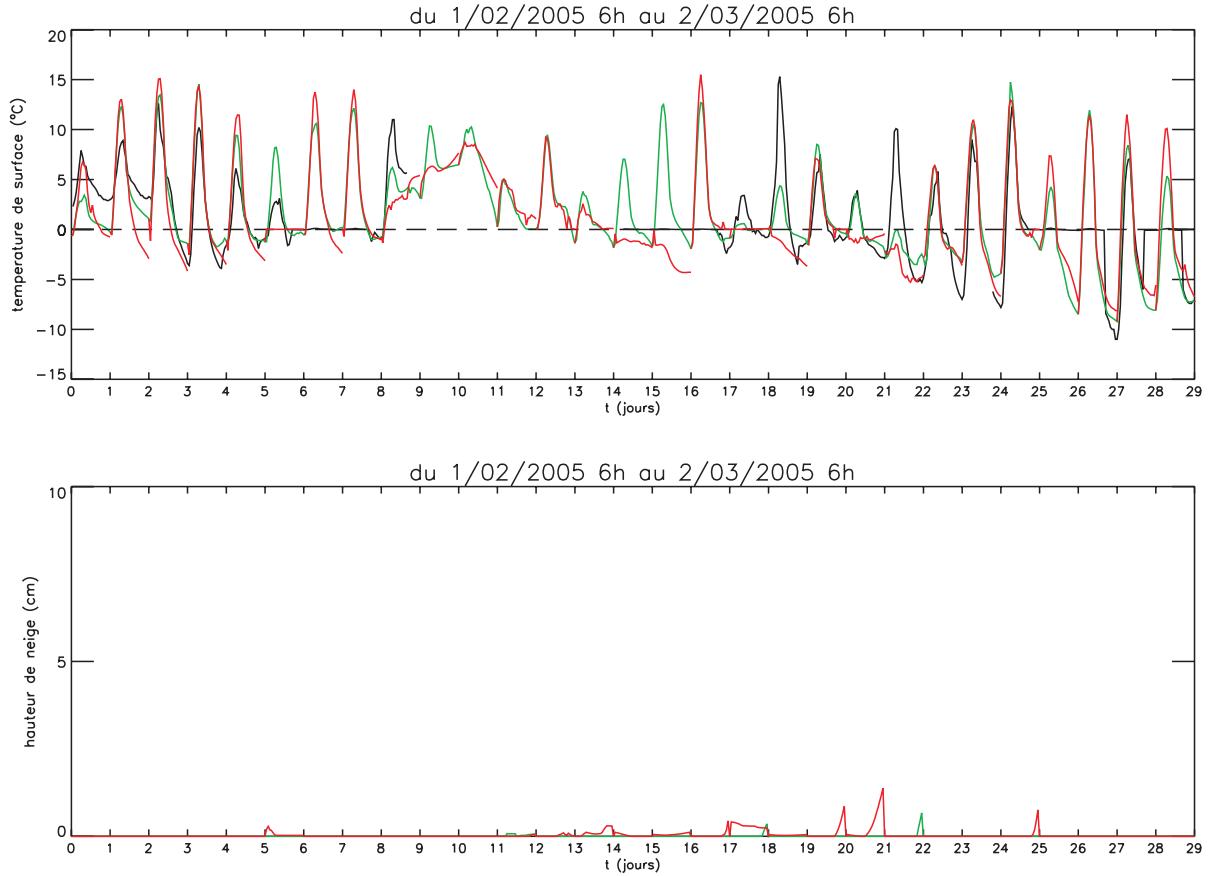


Figure 6.16 : a) Comparaison pour la période du 1 février au 2 mars 2005 de la température de surface mesurée sur la station Steinbourg (A4) (—) avec la température de surface simulée avec le forçage analysé (—) et avec la prévision (—); b) Simulations des hauteurs de neige sur la chaussée avec le forçage analysé (—) et en prévision(—).

Les résultats sont similaires pour les deux stations (figures 6.15 et 6.16). Au début de la période, deux jours avec un minimum de température négatif sont prévus par le modèle, mais ils n'ont pas été observés. La simulation avec le forçage analysé ne permet pas non plus de les détecter (le second jour est cependant mieux simulé en analyse pour la station Steinbourg, figure 6.16). Cette mauvaise prévision est probablement dû à un effet local. En effet, la présence de nombreux lacs dans cette région a pu être responsable localement de formation de brouillard. Par contre, les autres jours avec un minimum de température négatif sont relativement bien prévus par le modèle.

Les nombreuses pannes de capteur et les périodes inexplicquées d'isothermie ont été supprimées de l'échantillon. De plus, la période de données est relativement tardive (février à avril). Ainsi, le nombre de jours à température de surface négative est relativement faible dans l'échantillon. C'est pourquoi aucune statistique n'a été effectuée sur les minimums de température.

Cependant, la quasi intégralité des jours présentant des températures de surface négatives peut être observée sur les figures. La majorité des jours avec un minimum de température de surface négatif observé a été prévu par le modèle, on peut ainsi conclure à une prévision satisfaisante de l'évènement.

6.4.5 Autoroute A10

La localisation de l'autoroute A10 est montrée sur la figure 6.17.



Figure 6.17 : Localisation de l'autoroute A10, source : <http://www.cofiroute.fr/>

Les comparaisons des simulations de la maille et des mesures de la station sont montrées pour la période du 1 février au 01 mars 2005 (figure 6.18). Les statistiques correspondant à la simulation de la période entière (1 novembre 2004 au 30 avril 2005) sont données dans le tableau 6.7.

Type de simulation	MEg (°C)	RMSg (°C)
Forçage analysé	-0.9	2.9
Prévision	-1.7	4.1

Tableau 6.7 : Comparaison des erreurs moyennes globales et des écarts quadratiques moyens globaux sur la température de surface de la station météoroutière de l'A10.

Les résultats statistiques sont du même ordre de grandeur que pour les autres autoroutes (un écart quadratique moyen d'environ 3° pour l'analyse et d'environ 4°C pour la prévision).

Cependant, contrairement aux stations des autres autoroutes, l'erreur moyenne de la prévision est fortement négative (environ -2°C), la prévision a donc un biais relativement froid.

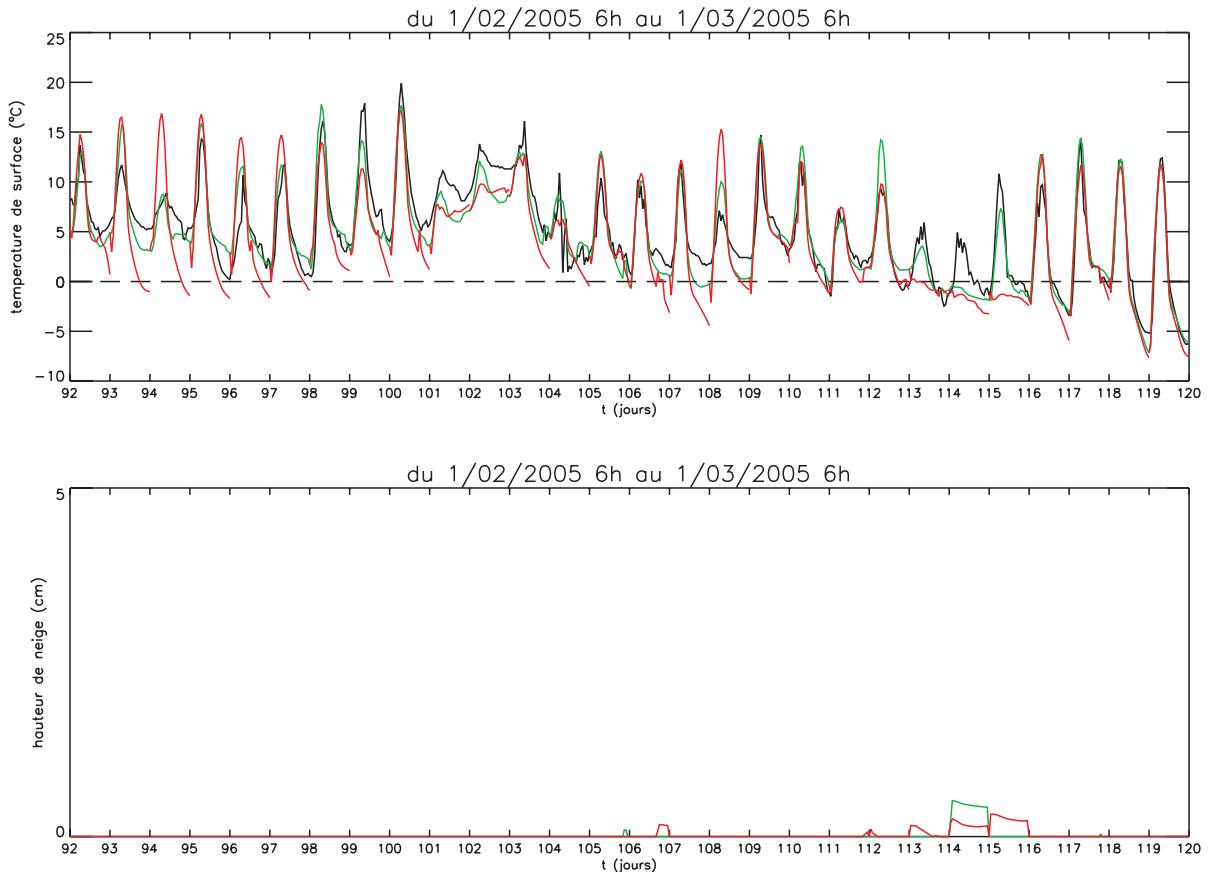


Figure 6.18 : a) Comparaison pour le mois de février 2005 de la température de surface mesurée sur l'autoroute A10 (—) avec la température de surface simulée avec le forçage analysé (—) et avec la prévision (—); **b)** Simulations des hauteurs de neige sur la chaussée avec le forçage analysé (—) et en prévision(—).

Le biais froid est confirmé par la figure 6.18. En effet, on voit que la prévision de température est relativement mauvaise pour certains jours. Par exemple, pour les périodes du 1 au 5 février (de $t=93$ à 98) ou du 15 au 18 février (de $t=106$ à 109), on voit que le modèle prévoit une température très inférieure à celle mesurée. De plus, la température prévue étant négative, la prévision devient très mauvaise du point de vue de l'exploitant, prévoyant un possible risque de gel infondé. La simulation avec le forçage analysé ne montre pas ces forts refroidissements. Ces mauvaises prévisions sont certainement dues à une mauvaise prévision de la nébulosité. En effet, l'analyse des données météorologiques nous montre au cours des nuits du 1 au 5 février, des nébulosités et des flux de rayonnement infrarouges très supérieurs dans le forçage analysé

(parfois supérieurs de plus de 100 W/m²). A l'inverse, le modèle prévoit bien les forts refroidissements de la fin du mois de février (de t=116 à 120).

On s'intéresse maintenant aux minimums de température de surface, afin d'apprécier la capacité du modèle à prévoir les températures négatives représentant un risque de gel. La figure 6.19 montre le minimum de température simulé en fonction du minimum mesuré.

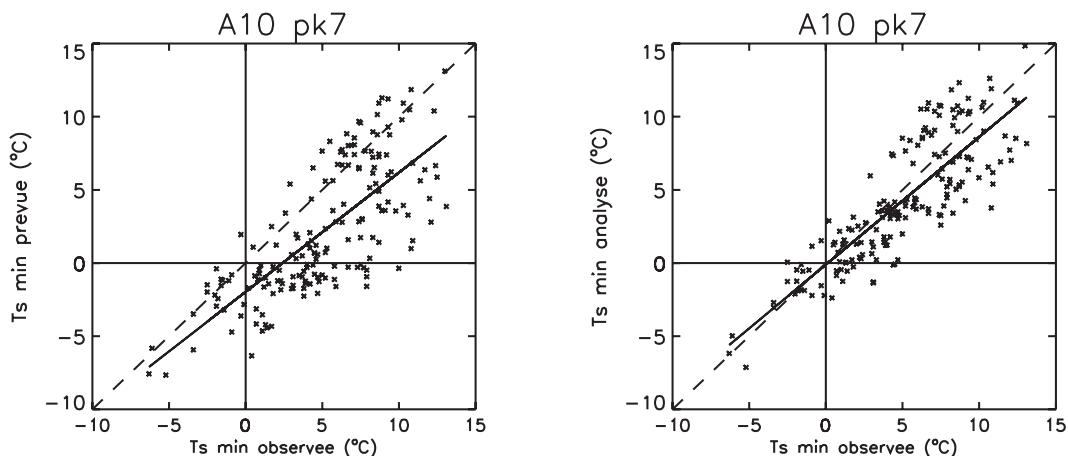


Figure 6.19 : minimum de température simulée (avec le forçage analysé et en prévision) en fonction du minimum mesuré.

La figure 6.19 confirme le biais froid de la prévision (densité importante de points à droite de la diagonale). Cependant, la simulation en analyse semble être plus précise, avec une répartition des points plus équilibrée autour de la diagonale. Ainsi, la mauvaise prévision de température de surface semble fortement liée à une mauvaise prévision des conditions météorologiques. Le tableau 6.8 confirme ces résultats. En effet, l'erreur moyenne et l'écart quadratique moyen sont beaucoup plus faibles pour la simulation en analyse. De même, les scores statistiques de prévision de l'événement "minimum de température de surface négatif" sont beaucoup plus satisfaisants avec la simulation en analyse, notamment le taux de fausses alarme qui est beaucoup moins élevé (environ 38% contre 74% en prévision).

	ME (°C)	RMS (°C)	R²	TD (%)	TFA (%)	TFD (%)
Station pk7 A10						
Prévision	-2.90	4.23	0.55	95.2%	74.0%	28.0%
Analyse	-0.75	2.46	0.71	85.7%	37.9%	6.9%

Tableau 6.8 : Statistiques sur la température de surface minimum simulée et mesurée sur la stations météoroutière du point kilométrique 7 de l'A10.

La prévision de la température de surface est satisfaisante dans son ensemble, avec des scores du même ordre de grandeur que pour les autres autoroutes. Cependant, la prévision montre un biais froid, dû à certaines mauvaises prévisions de refroidissements nocturnes (température prévue très inférieure à la mesure), ainsi dans le contexte autoroutier, où l'on s'intéresse principalement aux températures froides, cette prévision n'est pas satisfaisante. Cependant, la simulation en analyse montre que les mauvaises prévisions sont essentiellement dues à une mauvaise prévision des conditions atmosphériques. De plus, les données concernant l'autoroute A10 ne représentent qu'une seule station, ainsi il est impossible de tirer des conclusions sur la prévision à l'échelle du linéaire.

6.4.6 Aéroport de Paris-Orly

La plate-forme où est disposée la station de mesure de l'aéroport d'Orly n'est pas identique aux chaussées routières. Il s'agit d'une chaussée avec un revêtement en ciment, plus clair que les revêtements routiers, avec une hauteur de rugosité plus importante. Ainsi, la chaussée utilisée dans le modèle n'est pas identique à celle de la simulation sur la France. En absence de données précises sur la chaussée de l'aéroport, les propriétés de surface ont été obtenues à partir de tests de sensibilité, effectués au cours de deux périodes, l'une plutôt chaude (août) et l'autre plutôt froide (janvier). Les résultats de ces tests de sensibilité diffèrent selon les deux périodes. Afin d'optimiser l'intégralité de la simulation, l'albédo a été fixé à 0.2 et la rugosité a été fixée à 0.1 cm. Le tableau 6.9 montre les résultats de simulation sous forme statistique, pour la chaussée modifiée, et pour la chaussée routière.

	Analyse		Prévision	
	MEg ($^{\circ}\text{C}$)	RMSg ($^{\circ}\text{C}$)	MEg ($^{\circ}\text{C}$)	RMSg ($^{\circ}\text{C}$)
Chaussée routière	1.40	2.86	1.47	4.07
Chaussée modifiée	-0.35	2.42	-1.13	2.92

Tableau 6.9 : Comparaison des erreurs moyennes globales et des écarts quadratiques moyens globaux sur la température de surface de la station de l'aéroport d'Orly, pour la chaussée modifiée et pour la chaussée de type routière.

Sur le tableau 6.9, on peut voir que les résultats sont améliorés avec la chaussée modifiée. La figure 6.20 montre les résultats de simulation effectuée avec la chaussée modifiée. Cependant, l'erreur moyenne change de signe, ainsi le biais de la prévision devient négatif.

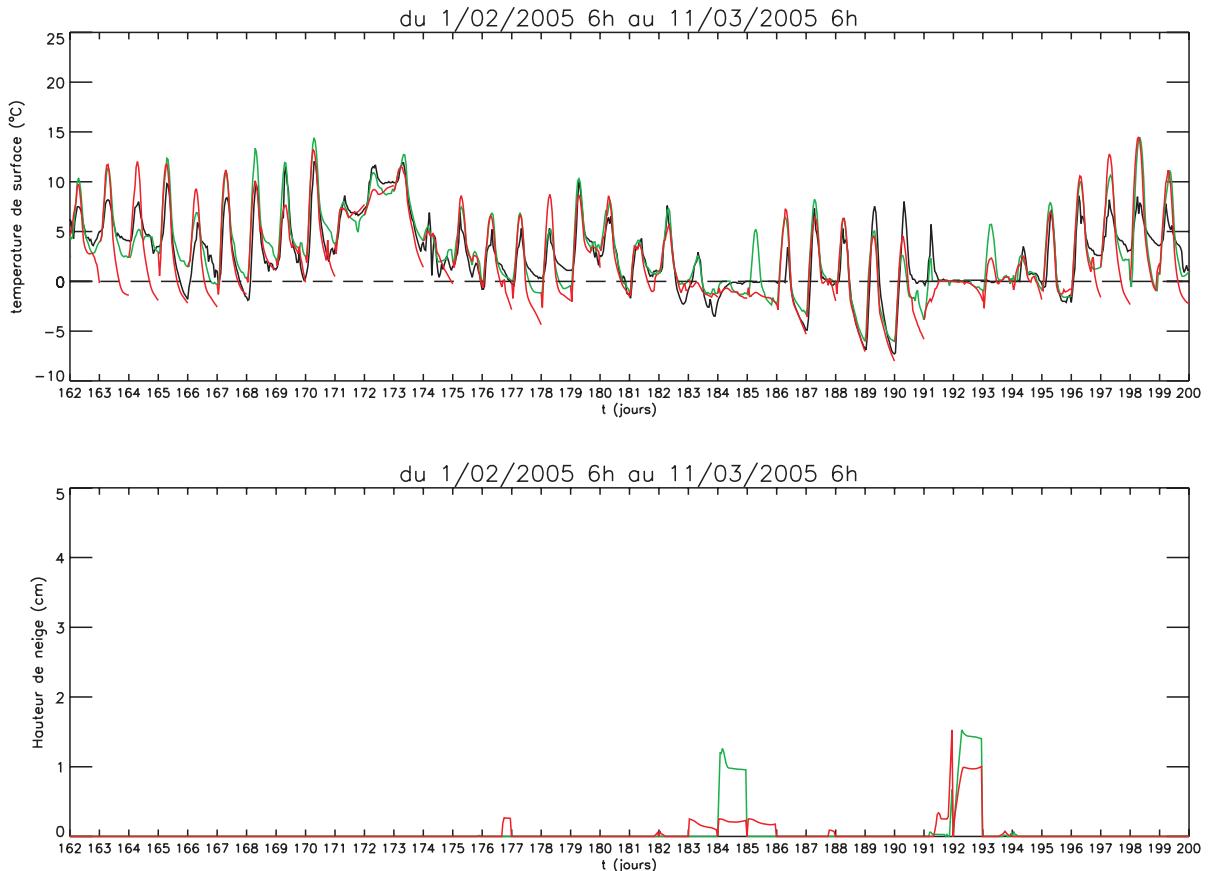


Figure 6.20 : a) Comparaison pour la période du 1 février 2005 au 11 mars 2005, de la température de surface mesurée sur l'aéroport d'Orly (—) avec la température de surface simulée avec le forçage analysé (—) et avec la prévision (—); b) Simulations des hauteurs de neige sur la chaussée avec le forçage analysé (—) et en prévision(—).

Sur la figure 6.20, on peut voir que l'évolution de température de surface est bien prévue par le modèle. Cependant, on peut voir de nombreux cas (essentiellement au début et à la fin de la période) où la température de surface prévue est négative, alors que celle mesurée est positive. On peut également voir entre le 25 février et le 1 mars ($t=186$ à 190 jours), une série de températures très négatives correctement prévues par le modèle. Concernant les mauvaises prévisions, elles sont essentiellement dues à une mauvaise prévision des conditions atmosphériques, en particulier la nébulosité. En effet, la simulation en analyse ne reproduit pas ces accidents. La nébulosité et le flux de rayonnement infrarouge sont largement supérieurs dans le forçage analysé pour les nuits correspondantes à ces mauvaises prévisions.

Deux épisodes neigeux se sont produits au cours de la période, du 22 au 25 février ($t=183$ à 186 jours), et du 2 au 4 mars ($t=191$ à 193 jours). La présence de neige prévue est confirmée par la température de surface mesurée, qui reste à 0°C , même si pour le premier épisode, la présence de neige semble se produire plus tard que la prévision. Contrairement aux autoroutes, la plate-forme de mesure n'a pas été déneigée, expliquant une présence de neige sur une durée plus importante que dans les simulations.

On s'intéresse maintenant aux minimums de température, afin d'apprécier la capacité du modèle à prévoir les températures négatives représentant un risque de gel. La figure 6.21 montre le minimum de température simulé en fonction du minimum mesuré.

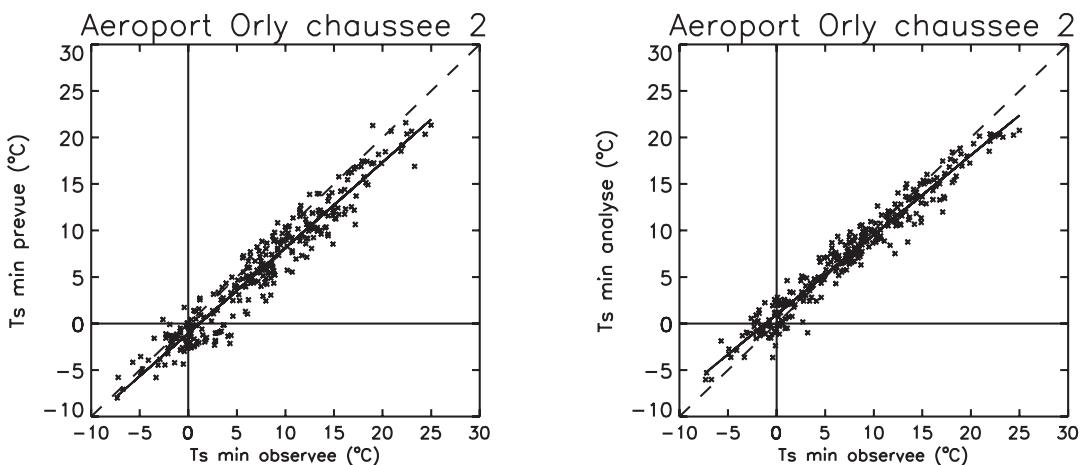


Figure 6.21 : minimum de température simulée (avec le forçage analysé et en prévision) en fonction du minimum mesuré.

La figure 6.21 confirme le biais froid de la prévision (77% de cas où la température minimale prévue est inférieure à celle mesurée), qui semble moins important pour la simulation en analyse. Ainsi, la mauvaise prévision de température semble fortement liée à une mauvaise prévision météorologique. Le tableau 6.10 confirme ces résultats. En effet, l'erreur moyenne et l'écart quadratique moyen sont beaucoup plus faibles pour la simulation en analyse. De même, les scores statistiques de prévision de l'événement "température de surface négative" sont beaucoup plus satisfaisants avec la simulation en analyse, notamment le taux de fausses alertes qui est beaucoup moins élevé (environ 23% contre 47% en prévision).

	ME (°C)	RMS (°C)	R ²	TD (%)	TFA (%)	TFD (%)
Aéroport d'Orly						
Prévision	-1.67	2.46	0.93	93.5%	46.9%	14.8%
Analyse	-0.12	1.64	0.95	71.7%	23.3%	3.9%

Tableau 6.10 : Statistiques sur la température de surface minimum simulée et mesurée sur la station météoroutière de l'aéroport d'Orly.

La prévision des minimums de température de surface est satisfaisante, bien que le taux de fausses alertes soit légèrement trop élevé. La plupart des cas sont dus à une mauvaise prévision des conditions atmosphériques. Cependant, pour les autres cas, la prévision peut certainement être améliorée. En effet, il ne s'agissait pas ici d'optimiser la prévision de température par rapport au minimum, mais par rapport à l'intégralité de l'année. Ainsi, l'amélioration de la chaussée a amélioré essentiellement les maximums de température et dégradé les minimums de température (changeant de signe de l'erreur moyenne). Une modélisation précise de la chaussée, combinée à une optimisation selon le but principal de l'exploitant (ici les minimums de température) améliorerait probablement ces résultats. Cependant, la prévision de l'évolution de température et de la présence de neige est satisfaisante.

6.4.7 Conclusion sur les prévisions ponctuelles

L'absence de capteurs de hauteur de neige empêche une validation approfondie des épisodes neigeux, cependant certains épisodes ont pu être validés de manière indirecte (présence sur site pour l'autoroute A40 et mesure de température de surface pour l'aéroport d'Orly). Concernant

les stations installées sur les autoroutes, la température de surface n'a pas permis de valider les épisodes neigeux. En effet, à cause des opérations de maintenance (déneigements et traitement avec des fondants), le comportement de la neige sur la chaussée, donc son influence sur la température de surface, est relativement différent des conditions naturelles effectives dans le modèle.

Cette section s'intéresse principalement à la prévision de la température de surface. L'écart quadratique moyen entre la température de surface prévue et la température de surface mesurée est de l'ordre de 4°C pour la plupart des stations, à l'exception de 2 stations de l'A40, où la prévision semble être relativement mauvaise. L'écart quadratique moyen des prévisions effectuées pour les stations météoroutières est inférieur à l'écart quadratique moyen obtenu sur le site du Col de Porte (environ 5°C). Ceci est dû à la présence d'arbres sur le site. La présence d'arbre génère d'importantes zones d'ombre qui peuvent masquer le rayonnement solaire une grande partie de la journée. Au cours de certaines périodes de l'hiver, l'ombre portée par les arbres empêche le réchauffement diurne. On observe dans les simulations des périodes de réchauffement diurne et au contraire un refroidissement (dû à l'absence de rayonnement) sur la température de surface mesurée. Ce phénomène se produit également dans les simulations effectuées avec un forçage prenant en compte les masques solaires, car les effets des ombres portées sont relativement difficiles à évaluer précisément. On peut notamment le voir sur la figure 4.3 ou encore sur les figures C.1 et C.2 en annexe. Ces périodes de plusieurs jours avec une mesure et une simulation de température en opposition de phase génèrent des erreurs moyennes et des écarts quadratiques journaliers très importants, expliquant les moins bons résultats obtenus au Col de Porte.

Lorsque l'on s'intéresse principalement au risque de gel, donc aux températures négatives, on voit que la qualité de prévision diffère selon les autoroutes. En effet, la prévision de l'événement "minimum de température de surface négatif" est relativement satisfaisante (taux de détection élevé et taux de fausses alarmes assez faible) sur les autoroutes A40, A20, A4 et sur l'aéroport d'Orly (bien que pour ce cas le taux de fausses alarmes soit légèrement élevé). Par contre, cette prévision est relativement mauvaise sur la station du point kilométrique 7 de l'A10, avec un taux de fausses alarmes d'environ 74%. Cependant, cette station étant la seule dont nous possédons les données sur cette autoroute, il est impossible de dire s'il s'agit d'un cas isolé ou si la prévision est mauvaise sur l'ensemble du réseau. Concernant les mauvaises prévisions, la simulation en analyse nous montre que ces mauvaises prévisions sont souvent

dues à une mauvaise prévision des conditions atmosphériques, essentiellement de la nébulosité (donc sa conséquence sur le flux de rayonnement infrarouge incident car le modèle ISBA-Route n'utilise pas la nébulosité).

6.5 Les épisodes neigeux de l'hiver 2004/05

6.5.1 Données de validation

Au cours de l'hiver 2004/05, de nombreux épisodes de présence de neige sur les routes ont eu lieu. Cependant, se pose le problème de la validation de ces épisodes à partir de données observées. La validation présentée ici reste en effet qualitative. Elle est effectuée à partir des renseignements obtenus dans la presse, et également à partir des informations issues des postes météorologiques de Météo-France. Ces postes sont essentiellement des stations automatiques de mesure, mais également les Centre Départementaux de la Météorologie qui fournissent des observations humaines en plus des mesures automatiques. Les informations de cette base de données sont légèrement éloignées du contexte de la viabilité hivernale, car les mesures ne sont pas effectuées sur la route.

Le premier paramètre utilisé ici pour la validation est l'occurrence quotidienne de neige (de 6h TU à 6h TU), disponible pour l'intégralité des postes. Cette occurrence vaut :

- 0 quand il n'a pas neigé
- 1 quand il a neigé avec certitude (chute de neige observée, neige au sol ou information donnée par un capteur).

Le second paramètre utilisé pour valider les épisodes neigeux est l'occurrence de neige au sol au cours de l'échéance. Cependant, ces informations ne sont disponibles que sur un nombre de postes limités : les Centre Départementaux de la Météorologie, qui représentent une centaine de postes sur les 5556 postes du réseau. Ces données permettent une information plus précise que l'occurrence de neige, mais restent éloignées du contexte. En effet, la présence de neige au sol est observée sur un sol naturel (moins dense et moins conducteur) et aucun critère de durée d'enneigement n'est associé. L'occurrence de neige au sol vaut :

- 0 quand aucune présence de neige au sol n'a été observée
- 1 quand une présence de neige au sol a été observée.

Contrairement à la grille de 9892 points sur laquelle le modèle a été utilisé, la grille correspondante aux postes d'observation n'est pas régulière et ainsi certaines mailles du modèle ne sont pas couvertes par un poste. C'est pourquoi, les résultats graphiques ne comportent que les points de grille avec un poste à proximité, dans un rayon de 6km. Le rayon correspond à une distance légèrement supérieure à la demi-diagonale de la maille. Pour les mailles intégrant plusieurs postes, le poste le plus proche du centre de la maille a été sélectionné.

Des graphiques comparant la présence de neige au sol dans les simulations et l'occurrence de neige au sol observée ont également été tracés. Cependant, ces graphiques ne sont tracés que pour une centaine de mailles (correspondant aux postes à observation humaine). Afin de faciliter la lecture graphique la valeur correspondante à la maille a été affectée aux mailles contigüës (lorsqu'elle font partie du domaine).

Concernant les résultats statistiques, l'inverse a été fait. Les observations de chaque poste sont comparées au résultat de prévision du point de grille le plus proche. Cependant, la densité des postes étant inégale, certaines zones comportent de nombreux postes situés sur la même maille (parfois une dizaine), rendant les résultats biaisés en donnant du poids aux prévisions effectuées sur les mailles à forte densité d'observations. De plus, les tables de contingence établies ont un intérêt limité. En effet, on ne compare pas le même résultat. On compare d'un côté les résultats de simulation de présence de neige sur la route (définie en section 5.2.2.3) et de l'autre l'observation d'occurrence de neige (sans aucune notion de présence au sol, de quantité ou de durée).

On définit les valeurs des tables de contingence par :

- PO est le nombre d'événements "présence de neige au sol" simulés et d'occurrence de neige observée
- PNO est le nombre d'événements prévus sans occurrence de neige observée
- NPO est le nombre d'événements non prévus avec occurrence de neige observée
- $NPNO$ est le nombre d'événements non prévus sans occurrence de neige observée.

La seule information présente dans la table de contingence permettant réellement de donner une information sur la qualité de la prévision est le nombre d'événements PNO. Le nombre d'événements non prévus avec occurrence de neige observée permet de conclure avec certitude à une mauvaise prévision.

Les nombres d'évènements PO et NPNO représentent une possible bonne prévision. En effet, le nombre PO ne prend pas en compte les cas où la précipitation observée n'a pas tenu sur le sol, et de la même manière, le nombre NPNO ne prend pas en compte les prévisions de précipitations n'ayant pas tenu sur le sol.

Le nombre d'évènements NPO ne permet pas de donner une indication sur la qualité de la prévision.

Ainsi, aucun score statistique n'a été établi avec les tables contingences comparant la présence de neige sur les routes avec l'occurrence de neige. Seuls les pourcentages d'évènements dans l'échantillon total ont été calculés. Le critère utilisé pour estimer la qualité de la prévision est un pourcentage de mauvaises prévision (PNO) le plus faible possible.

Une autre cause est source d'incertitude sur les résultats obtenus, les observations manquantes ne sont pas renseignées et sont assimilées à une occurrence nulle. On peut le voir sur les figures 6.22 à 6.25, où des discontinuités d'occurrence dans les observations existent, dans des zones relativement homogènes. Ainsi, ces statistiques ne sont pas très représentatives, elles permettent cependant de donner une indication sur la prévision spatiale de la présence de neige sur les routes.

Des scores statistiques (définis en section 5.3.2) ont quant à eux été calculés à partir de la table de contingence comparant la présence de neige sur les routes avec l'occurrence de neige au sol, pour la centaine de points où ces mesures sont disponibles. De même, ces scores ont également été établis pour comparer la prévision avec la simulation en analyse (considérée comme prévision parfaite).

Ainsi, en absence de données de validation plus pertinentes, sont présentés dans cette section 4 épisodes de présence de neige sur les routes ayant eu une très forte couverture géographique, et dont des traces ont pu être trouvées dans des archives de presse.

6.5.2 Episode 1 :du 28 au 29 décembre 2004

D'après un article en ligne du *NouvelObs*, de fortes perturbations du trafic routier ont été causées par les conditions météorologiques le 28 décembre, essentiellement en région Rhône-Alpes et dans le Massif Central. Un extrait de l'article est donné :

La circulation sur les axes routiers de la région Rhône-Alpes est perturbée mardi 28 décembre en raison de fortes chutes de neige tombées dans la journée, a-t-on appris auprès de la préfecture du Rhône. Ces difficultés se concentrent sur la Loire, la Drôme et le Rhône, notamment sur Lyon. La préfecture demande d'éviter "tout déplacement dans l'après-midi et la soirée, même pour un court trajet".

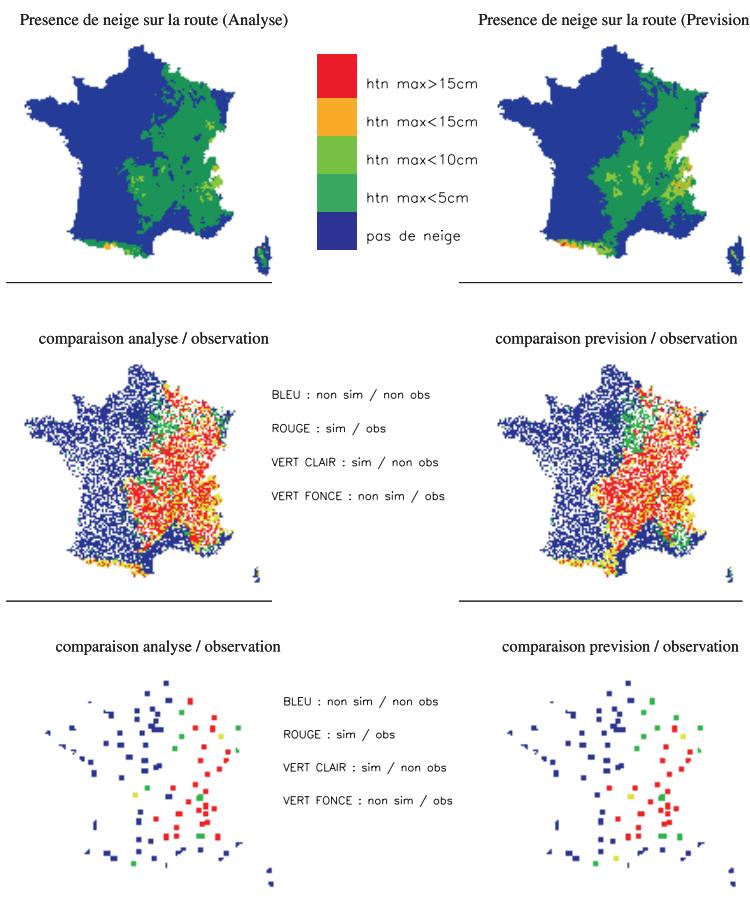


Figure 6.22 : Résultat des simulations de présence de neige sur les routes (en haut) avec le forçage analysé et de la prévision pour l'épisode du 28 au 29 décembre 2004. Comparaison de ces résultats avec les occurrences de neige (au milieu) et avec les occurrences de neige au sol (en bas) issues de la base de données climatologiques de Météo-France.

La simulation avec le forçage analysé, de même que la prévision, nous montrent que le modèle parvient à simuler la présence de neige sur les routes dans ces régions. Ces résultats sont confortés par la comparaison avec les observations d'occurrence de neige et de neige au sol. La prévision présence de neige sur les routes semble assez représentative de l'épisode, bien qu'il semble géographiquement moins important qu'il ne l'ait été réellement (essentiellement à l'est

de la région parisienne). Cependant, les informations issues des archives de presse en ligne du *NouvelObs* datent du 28 décembre à 18 heures local. A ce moment, l'article indique que la perturbation se déplace vers le Jura. La prévision correspond à la période du 28 au 29 décembre à 6h, ainsi l'épisode a certainement pu être géographiquement plus marqué vers l'Est de la France, comme il l'est avec la prévision ou l'analyse (figure 6.22). L'occurrence de neige au sol sur la partie Est de la France semble le confirmer.

La table de contingence et les scores statistiques correspondant à la comparaison entre les simulations et les observations de la base de données climatologiques pour l'épisode du 28 au 29 décembre 2004 sont donnés dans le tableau 6.11.

SIMULATION		OBSERVATION	
		Occurrence de neige	Pas d'occurrence de neige
forçage analysé	Neige au sol	1274 (22.9%)	1051 (18.9%)
	Pas de neige au sol	416 (7.5%)	2815 (50.7%)
prévision	Neige au sol	1296 (23.3%)	1098 (19.8%)
	Pas de neige au sol	394 (7.1%)	2768 (49.8%)

Tableau 6.11 : Table de contingence comparant l'occurrence de neige des 5556 postes de la base de données climatologiques avec les résultats des simulations, pour l'épisode du 28 au 29 décembre 2004.

Les scores statistiques concernant l'occurrence de neige au sol sont donnés dans le tableau 6.12.

Simulation	TD	TEM	SPE	TFD	TFA
ANALYSE	75.6%	24.4%	97.3%	2.7%	5.6%
PRÉVISION	68.9%	31.1%	94.6%	5.4%	11.4%

Tableau 6.12 : Scores statistiques comparant l'occurrence de neige au sol pour les postes avec observation humaine de la base de données climatologiques avec les résultats des simulations, pour l'épisode du 28 au 29 décembre 2004.

Les scores statistiques comparant la prévision de présence de neige au sol avec la simulation en analyse sont donnés dans le tableau 6.13.

Comparaison Prévision / Simulation en analyse

TD	TEM	SPE	TFD	TFA
88.7%	11.3%	88.6%	11.4%	16.0%

Tableau 6.13 : Scores statistiques comparant la prévision de présence de neige sur la route avec la simulation en analyse, pour l'épisode du 28 au 29 décembre 2004.

Le pourcentage de cas de mauvaises prévisions (de présence de neige sur la route simulée sans occurrence observée) est d'environ 20 % pour l'analyse et la prévision. Ce pourcentage est relativement faible. De plus, le taux de détection relativement élevé (environ 70%) et le taux de fausses alertes relativement faible (environ 11.5%) obtenus avec l'occurrence de neige au sol laissent penser à une bonne prévision de l'événement.

Les indications statistiques et les archives de presse nous permettent de penser que cet épisode a été assez bien prévu par le modèle.

6.5.3 Episode 2 : du 24 au 25 janvier 2005

D'après un article paru dans *Le Monde*, de nombreuses perturbations routières ont été constatées dans une demi-douzaine de régions, notamment dans l'Est et le Nord au cours du 24 janvier. Cependant, ces perturbations n'ont pas été causées uniquement par la neige, mais également par le verglas. Un extrait de l'article est donné :

Dans le Nord - Pas-de-Calais, la Picardie, la Haute-Normandie, en Rhône-Alpes, en Bourgogne, en Lorraine, en Franche-Comté, les perturbations neigeuses et la baisse de la température ont créé, lundi 24 janvier, des difficultés sur les routes, entraînant parfois des carambolages. Le plan grand froid a été déclenché dans huit départements. Des chutes de neige plus ou moins importantes étaient en cours, lundi 24 janvier au matin, sur le centre, le nord-est et l'est du pays, ainsi que sur les côtes de la Manche, occasionnant quelques difficultés de circulation, selon Météo France et les observations sur place.

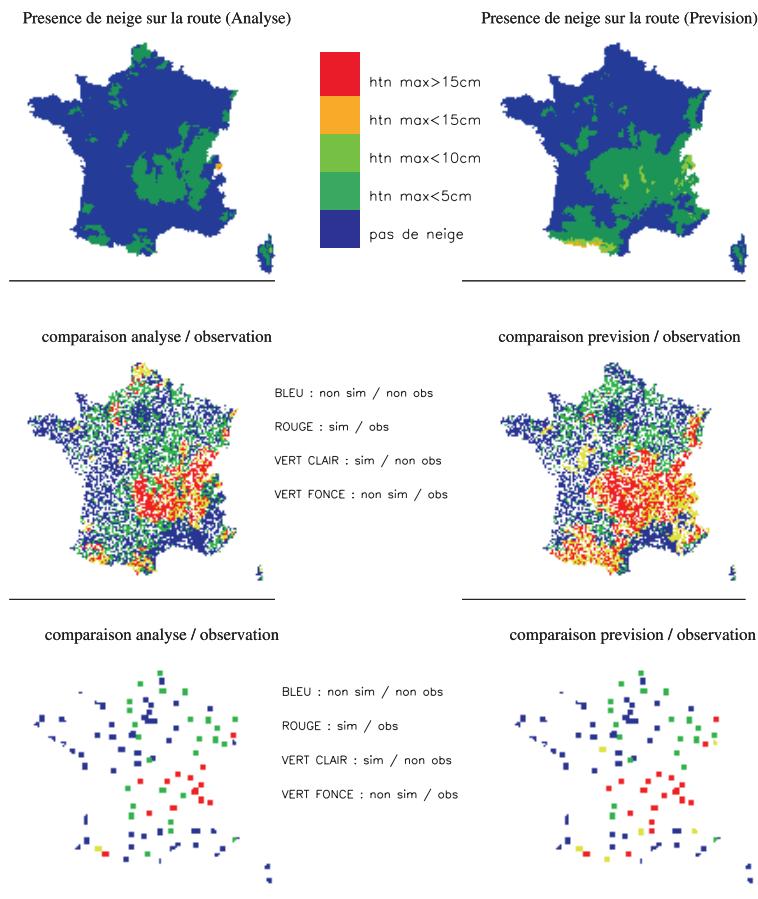


Figure 6.23 : Résultat des simulations de présence de neige sur les routes (en haut) avec le forçage analysé et de la prévision pour l'épisode du 24 au 25 janvier 2005. Comparaison de ces résultats avec les occurrences de neige (au milieu) et avec les occurrences de neige au sol (en bas) issues de la base de données climatologiques de Météo-France.

Les résultats de simulation (figure 6.23) indiquent une présence de neige sur les routes dans le Centre et l'Est de la France. Cependant la prévision s'étend à une zone plus large. La partie Nord de la France n'est pas atteinte par l'épisode de neige au sol. Cependant, les archives nous indiquent une circulation perturbée dans cette zone. La présence d'observations d'occurrence de neige et d'occurrence laisse penser que la prévision est mauvaise pour cette partie de la France. De même, l'observation d'occurrence de neige au sol dans le Nord tend à confirmer la mauvaise prévision dans cette zone.

La table de contingence et les scores statistiques correspondant à la comparaison entre les simulations et les observations de la base de données climatologiques pour l'épisode du 24 au 25 janvier 2005 sont donnés dans le tableau 6.14.

SIMULATION		OBSERVATION	
		Occurrence de neige	Pas d'occurrence de neige
forçage analysé	Neige au sol	696 (12.5%)	648 (11.7%)
	Pas de neige au sol	1348 (24.3%)	2864 (51.5%)
prévision	Neige au sol	1130 (20.3%)	1305 (23.5%)
	Pas de neige au sol	914 (16.5%)	2207 (39.7%)

Tableau 6.14 : Table de contingence comparant l'occurrence de neige des 5556 postes de la base de données climatologiques avec les résultats des simulations, pour l'épisode du 24 au 25 janvier 2005.

Les scores statistiques concernant l'occurrence de neige au sol sont donnés dans le tableau 6.15.

Simulation	TD	TEM	SPE	TFD	TFA
ANALYSE	34.0%	66.0%	97.3%	2.7%	10.5%
PREVISION	50.0%	50.0%	86.7%	13.3%	28.6%

Tableau 6.15 : Scores statistiques comparant l'occurrence de neige au sol pour les postes avec observation humaine de la base de données climatologiques avec les résultats des simulations, pour l'épisode du 24 au 25 janvier 2005.

Les scores statistiques comparant la prévision de présence de neige au sol avec la simulation en analyse sont donnés dans le tableau 6.16.

Comparaison Prévision / Simulation en analyse

TD	TEM	SPE	TFD	TFA
71.3%	28.7%	69.9%	30.1%	60.2%

Tableau 6.16 : Scores statistiques comparant la prévision de présence de neige sur la route avec la simulation en analyse, pour l'épisode du 24 au 25 janvier 2005.

La comparaison de la simulation en analyse et de la prévision laisse penser que la zone couverte par la prévision est trop vaste (notamment dans le Sud-Ouest et le Sud-Est de la France). En effet, le pourcentage de mauvaises prévisions est plus faible avec le forçage analysé que pour la prévision (respectivement 12% et 24%), et ces deux secteurs représentent les principales différences entre la prévision et la simulation en analyse.

Le pourcentage de mauvaises prévisions est relativement faible, il semblerait que la prévision soit plutôt satisfaisante sur une partie de la France (dans le Centre-Est de la France), mais que l'occurrence de neige sur les routes prévue soit trop légèrement trop vaste (essentiellement au Sud de la couverture géographique de l'épisode). De même, l'observation de l'occurrence de neige au sol ainsi que les scores statistiques calculés tendent à confirmer la bonne prévision partielle (taux de fausses alarmes assez faible) mais indiquent une couverture trop faible (taux de détection faible). La présence de neige sur les routes dans le Nord du pays n'a en effet pas été prévue.

6.5.4 Episode 3 : du 3 au 4 mars 2005

Selon un article paru dans *L'Humanité*, la neige a été responsable de fortes perturbations du trafic routier le 3 mars dans le Centre de la France, le Sud-Est et le Grand Ouest. Un extrait de l'article est donné :

Le centre et une grande partie de l'ouest du pays ont été fortement touchés par les chutes de neige qui ont perturbé la circulation. Le Centre et le Grand Ouest connaissaient les difficultés de circulation les plus importantes. À titre d'exemple, dans le Loir-et-Cher, la nationale 10 était coupée au nord et au sud de Vendôme. Une tempête de neige a ainsi entraîné la coupure de l'A84, dans le sens Rennes-Caen, à Saint-Martin-de-Besaces (Calvados). Dans le Sud-Est, on constatait, en zone de montagne, des « embûches plutôt normaux pour la saison ». Une « grande prudence » était recommandée dans les Bouches-du-Rhône, où tout le réseau était assez verglacé, en particulier du côté de Salon-de-Provence, Aix ou Gardanne, où l'on recommandait d'éviter les déplacements.

La figure 6.24 montre les résultats des simulations en analyse et en prévision pour cet épisode, ainsi que la comparaison avec l'occurrence de neige et l'occurrence de neige au sol observées.

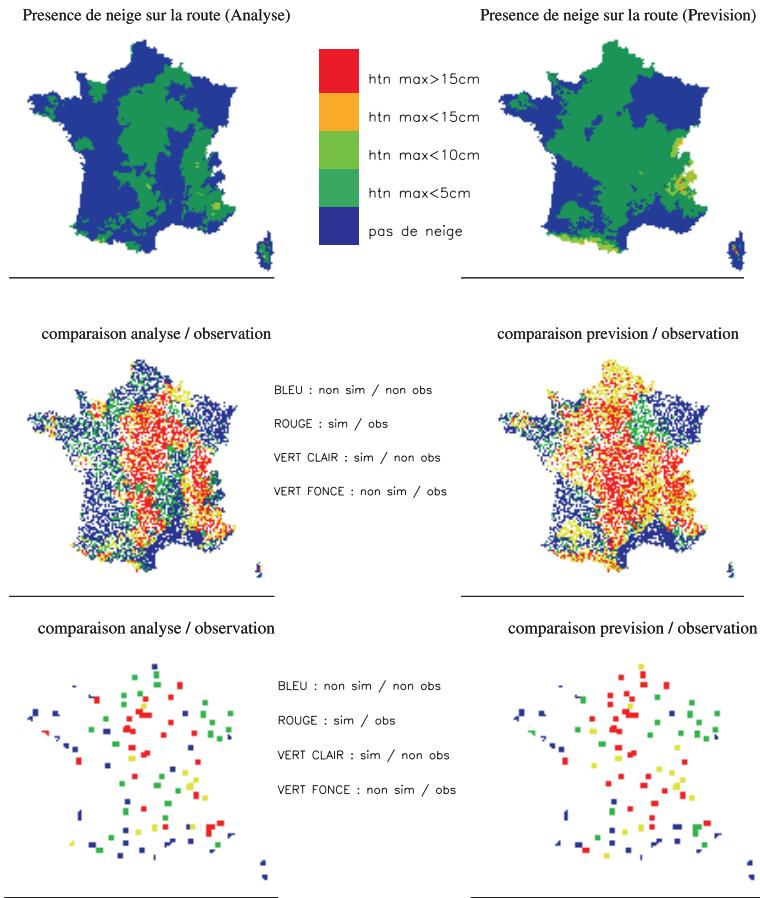


Figure 6.24 : Résultat des simulations de présence de neige sur les routes (en haut) avec le forçage analysé et de la prévision pour l'épisode du 3 au 4 mars 2005. Comparaison de ces résultats avec les occurrences de neige (au milieu) et avec les occurrences de neige au sol (en bas) issues de la base de données climatologiques de Météo-France.

La figure 6.24 montre une bonne concordance des prévisions avec les zones citées dans les archives. La table de contingence et les scores statistiques correspondant à la comparaison entre les simulations et les observations de la base de données climatologiques pour l'épisode du 3 au 4 mars 2005 sont donnés dans le tableau 6.17. Les scores statistiques concernant l'occurrence de neige au sol sont donnés dans le tableau 6.18, et ceux comparant la prévision avec la simulation en analyse sont donnés dans le tableau 6.19.

SIMULATION		OBSERVATION	
		Occurrence de neige	Pas d'occurrence de neige
forçage analysé	Neige au sol	1120 (20.2%)	986 (17.7%)
	Pas de neige au sol	876 (15.8%)	2574 (46.3%)
prévision	Neige au sol	1547 (27.8%)	1941 (34.9%)
	Pas de neige au sol	449 (8.1%)	1619 (29.1%)

Tableau 6.17 : Table de contingence comparant l'occurrence de neige des 5556 postes de la base de données climatologiques avec les résultats des simulations, pour l'épisode du 3 au 4 mars 2005.

Simulation	TD	TEM	SPE	TFD	TFA
ANALYSE	53.3%	46.7%	75.9%	24.1%	24.5%
PREVISION	61.3%	38.7%	64.8%	35.2%	29.2%

Tableau 6.18 : Scores statistiques comparant l'occurrence de neige au sol pour les postes avec observation humaine de la base de données climatologiques avec les résultats des simulations, pour l'épisode du 3 au 4 mars 2005.

Comparaison Prévision / Simulation en analyse

TD	TEM	SPE	TFD	TFA
77.1%	22.9%	53.5%	46.5%	53.0%

Tableau 6.19 : Scores statistiques comparant la prévision de présence de neige sur la route avec la simulation en analyse, pour l'épisode du 3 au 4 mars 2005.

Le pourcentage de cas de mauvaises prévisions est très élevé (environ 35%). L'occurrence de neige sur la route prévue couvre une zone trop importante. Ces résultats sont confirmés par les résultats de la simulation en analyse (simulation de présence de neige et pourcentage de mauvaises prévisions plus faibles, tableau 6.17). Cependant, le taux de détection de l'occurrence de neige au sol (environ 60%) assez élevé et le taux de fausses alarmes (environ 30%) nous montrent que la prévision reste acceptable. A l'inverse de l'épisode du 24 au 25 janvier 2005, on se trouve en présence d'une prévision trop vaste (taux de fausses détections plus élevé).

6.5.5 Episode 4 : du 5 au 6 mars 2005

D'après un article paru dans le *NouvelObs*, la neige et le verglas ont causé des difficultés de circulation en Normandie, dans le Centre et l'Est de la France au cours de la journée du 5 mars. Un extrait de l'article est donné :

Les conditions de circulation routière s'étaient quasi normalisées samedi 5 mars dans la journée, après une matinée que la neige et le verglas avaient rendue difficile dans plusieurs départements du Nord, du Centre et de la Normandie. Sur le quart nord-est de la France, des averses de neige rendaient la circulation délicate, voire difficile localement le matin.

La figure 6.25 montre les résultats des simulations en analyse et en prévision pour cet épisode, ainsi que la comparaison avec l'occurrence de neige observée.

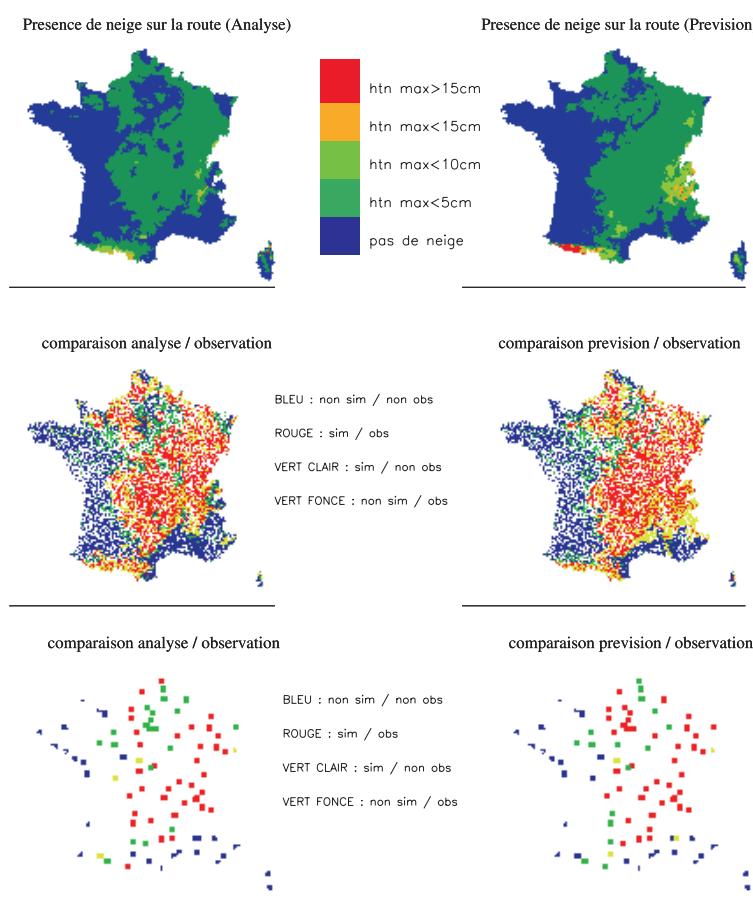


Figure 6.25 : Résultat des simulations de présence de neige sur les routes (en haut) avec le forçage analysé et de la prévision pour l'épisode du 5 au 6 mars 2005. Comparaison de ces résultats avec les occurrences de neige (au milieu) et avec les occurrences de neige au sol (en bas) issues de la base de données climatologiques de Météo-France.

La figure 6.25 montre une bonne concordance géographique entre les simulations (en analyse et en prévision) et les zones citées dans l'article de presse. De plus, les observations d'occurrence de neige confirment cette impression. La table de contingence et les scores statistiques correspondant à la comparaison entre les simulations et les observations de la base de données climatologiques pour l'épisode du 3 au 4 mars 2005 sont donnés dans le tableau 6.20. Les scores statistiques concernant l'occurrence de neige au sol sont donnés dans le tableau 6.21, et ceux comparant la prévision avec la simulation en analyse sont donnés dans le tableau 6.22.

SIMULATION		OBSERVATION	
		Occurrence de neige	Pas d'occurrence de neige
forçage analysé	Neige au sol	1491 (26.8%)	1265 (22.8%)
	Pas de neige au sol	657 (11.8%)	2143 (38.6%)
prévision	Neige au sol	1687 (30.4%)	1673 (30.1%)
	Pas de neige au sol	461 (8.3%)	1735 (31.2%)

Tableau 6.20 : Table de contingence comparant l'occurrence de neige des 5556 postes de la base de données climatologiques avec les résultats des simulations, pour l'épisode du 5 au 6 mars 2005.

Simulation	TD	TEM	SPE	TFD	TFA
ANALYSE	67.1%	32.9%	86.0%	14.0%	10.9%
PRÉVISION	72.6%	27.4%	88.4%	11.6%	8.6%

Tableau 6.21 : Scores statistiques comparant l'occurrence de neige au sol pour les postes avec observation humaine de la base de données climatologiques avec les résultats des simulations, pour l'épisode du 5 au 6 mars 2005.

Comparaison Prévision / Simulation en analyse

TD	TEM	SPE	TFD	TFA
85.1%	14.9%	71.1%	28.9%	23.8%

Tableau 6.22 : Scores statistiques comparant la prévision de présence de neige sur la route avec la simulation en analyse, pour l'épisode du 5 au 6 mars 2005.

Le pourcentage de mauvaises prévisions est assez élevé (environ 30%). Cependant, à l'inverse de l'épisode précédent, les mauvaises prévisions (en vert clair sur la figure 6.25) ne se concentrent pas sur des zones géographiques, mais sont situées essentiellement sur les bords de

la couverture neigeuse de l'épisode. De même, certaines observations d'occurrence manquantes sont probablement responsables de cas de mauvaises prévisions à l'intérieur de la zone couverte par l'épisode. Ces résultats sont confirmés avec la simulation en analyse, pour laquelle la zone géographique couverte par l'épisode est relativement similaire. De même, le taux de détection (environ 70%) assez élevé et le taux de fausses alertes assez faible (environ 10%) confirment ces résultats.

Il semblerait ainsi que la prévision de cet épisode soit satisfaisante.

6.5.6 Autres épisodes neigeux

En absence de documents de presse nécessaires à une validation qualitative, les autres épisodes neigeux répertoriés au cours de l'hiver 2004/05 sont donnés en annexe E.

6.5.7 Conclusion sur les épisodes neigeux

En l'absence de données de validation pertinentes, aucune conclusion ne peut être donnée avec certitude. Cependant, les articles de presse et les observations d'occurrence de neige et d'occurrence de neige au sol, permettent d'avoir une indication sur la qualité de la prévision. Dans les épisodes présentés, il est probable qu'une importante partie de la couverture géographique de l'occurrence de neige sur les routes ait été prévue. La prévision du premier épisode semble être relativement satisfaisante, avec un pourcentage de mauvaises prévisions assez faible (environ 20%). De même, la prévision de l'épisode 4 présente un taux de mauvaises prévisions plus élevé (environ 30%), cependant il semble que la couverture géographique de l'épisode soit prévue de manière satisfaisante. Ces résultats sont confirmés avec le taux de détection de l'occurrence de neige au sol assez élevé (environ 70%) et avec les taux de fausses alarmes et de fausses détections relativement faibles (de l'ordre de 10%).

Par contre, les prévisions effectuées pour le second et le troisième épisode semblent moins satisfaisantes. Pour le second épisode, la majeure partie de la couverture de l'épisode semble avoir été correctement prévue concernant la moitié sud du pays, sur zone cependant trop vaste. Par contre, l'épisode a également eu lieu sur la moitié nord du pays, et la présence de neige sur les routes dans cette partie du pays n'a pas été prévue. Le troisième épisode est quant à lui légèrement plus satisfaisant, bien que la prévision semble s'étendre sur une zone trop vaste également.

6.6 Conclusion du chapitre

Ce chapitre décrit l'utilisation du modèle à l'échelle de la France. Ainsi, le modèle a été spatialisé avec une résolution horizontale de 8km. L'hiver 2004/2005 a présenté un nombre important d'épisodes de présence de neige sur les routes, notamment en régions de plaine. Des prévisions à échéance 24h ont ainsi été effectuées sur cet hiver. L'absence de données de validations très pertinentes ne nous a pas permis de valider de manière approfondie les épisodes neigeux survenus au cours de cet hiver. Cependant, les archives de presse et les données dont nous disposions pour la validation (l'occurrence de neige et de neige au sol) nous ont permis de voir une bonne concordance entre les prévisions et les épisodes neigeux remarquables.

Les prévisions de température de surface ont quant à elle été validées plus précisément grâce à des données provenant de mesures de stations météoroutières d'exploitants autoroutiers ou aéroportuaires. Ces données n'ont pas permis une validation des prévisions sur l'intégralité de la France, cependant leur localisation assez dispersée (région parisienne, Ain, Haute-Savoie, Moselle, Bas-Rhône et Haute-Vienne) ont permis d'apprécier la représentativité spatiale des prévisions. Les prévisions de température de surface se sont montrées relativement homogènes pour l'intégralité des points de grille étudiés, avec un écart quadratique moyen de l'erreur de l'ordre de 4°C. Aucune dégradation des résultats n'est observée en conditions réelles (avec présence des fondants routiers et du trafic) par rapport aux résultats obtenus en conditions naturelles (Col de Porte ou aéroport d'Orly). L'effet du trafic et des fondants est peut être compensé par d'autres paramètres (par exemple compensation du réchauffement dû au trafic par la localisation de la station dans un endroit froid).

Les résultats des prévisions de température de surface nous prouvent que le modèle peut être envisagé dans un contexte de prévision et confirment l'intérêt d'un outil de prévision de température de surface utilisant uniquement les prévisions météorologiques, tel que la chaîne SAFRAN-ISBA-Route. La comparaison des résultats du modèle avec un modèle utilisant des données de stations météoroutières, tel que PREVIROUTE (Paumier et Arnal 1998, Yahia 2006), permettrait d'apprécier plus en détail l'applicabilité du modèle. En effet, la quantification de la dégradation des résultats due à l'absence de données in-situ permettrait de voir si l'utilité du modèle couplé ISBA-Route/CROCUS dans un but de prévision de température de surface n'est réservée qu'aux routes non équipées de stations et de voir si

l'utilité du modèle pour les grands itinéraires ne se situe pas uniquement dans la prévision de la présence de neige sur la route.

La validation des épisodes neigeux doit quant à elle être menée de manière plus approfondie, avec par exemple une prévision en temps réel au cours d'un hiver car les données de présence de neige sur les routes sont très peu archivées. De plus, l'utilisation de données d'archives précises nécessite de remonter à la source de tous les exploitants et Directions Départementales de l'Equipement, car aucun dispositif de centralisation des données n'existe. De même, une validation peut être envisagée localement. A titre d'exemple de validation, l'utilisation du modèle est envisagée à titre expérimental sur l'aéroport d'Orly.

De plus, les prévisions sont certainement améliorables. La première voie d'amélioration est relative aux entrées du modèle. En effet, de nombreux cas de mauvaises prévisions de l'état de surface sont liés à une mauvaise prévision des conditions météorologiques. Par exemple, une amélioration de la prévision de la nébulosité basse entraînerait une amélioration sensible de la prévision de température de surface, notamment lors des refroidissements nocturnes. De même, l'augmentation de la résolution des prévisions météorologiques (actuellement 8km) permettrait une amélioration des prévisions de température de surface avec une meilleure prise en compte des effets locaux. Une autre voie d'amélioration possible est l'apport de traitements statistiques visant à diminuer l'erreur.

Conclusion générale

Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'une coopération entre le Centre d'Etudes de la Neige, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, les Centres d'Etudes Techniques de l'Equipement de l'Est et de Lyon, le Service d'Etudes Technique des Routes et Autoroutes et la Direction Départementale de l'Equipement de l'Isère : le projet Gelcro. L'objectif de cette thèse était le développement d'un modèle de prévision de l'état des routes en conditions hivernales, à l'échelle de la France, et en conditions naturelles (hors trafic et fondants routiers).

Un modèle unidimensionnel permettant de simuler le comportement d'une couche de neige déposée sur une chaussée a été développé à partir du couplage de deux modèles existants : les modèles de sol ISBA (Noilhan et Planton 1989, Noilhan et Mahfouf 1996) et de neige CROCUS (Brun et al. 1989, 1992). Le couplage réalisé permet de gérer les transferts hydriques et thermiques entre la chaussée et la neige. Une attention particulière a été portée sur les transferts thermiques et hydriques à l'interface, qui sont dépendants du type de chaussée et du type de neige. Ainsi, le flux de conduction entre la chaussée et la neige est calculé à partir d'un schéma implicite de résolution du profil de température chaussée/neige, prenant en compte la configuration de l'interface et son évolution. Les multiples types d'interface ont nécessité parfois plusieurs résolutions du profil en fonction de l'interface (regel, fonte). De nouvelles paramétrisations ont également dû être apportées pour les besoins du projet, comme les remontées d'eau par ascension capillaire de la chaussée vers le manteau neigeux, et la formation d'une couche de neige saturée en eau liquide à la base du manteau neigeux.

L'importante base de données constituée lors de l'expérimentation du projet Gelcro (Borel 2000, Muzet et al. 2000), effectuée sur le site expérimental de Météo-France situé au Col de Porte (1320m, Isère), a permis une validation détaillée du modèle. La comparaison des simulations effectuées avec les données météorologiques mesurées et des épisodes neigeux observés au cours des hivers 1997/1998, 1998/1999 et 1999/2000 a montré que le modèle parvient à reproduire avec précision l'évolution de température d'une chaussée, avec un écart quadratique moyen de l'erreur d'environ 3°C. Les statistiques calculées par rapport à la mesure de hauteur de neige déposée sur les chaussées ne sont pas représentatives du fait des nombreuses erreurs de mesure (pannes, incertitude sur les manteaux neigeux de faible épaisseur associée à la précision du capteur de ± 1 cm), cependant la comparaison des hauteurs de neige

simulées et mesurées, parfois complétée par l'observation des enregistrements vidéos ont permis de conclure que le modèle parvient à reproduire avec précision le comportement d'une couche de neige se déposant sur la chaussée. De la même manière, le modèle est capable de simuler le type de neige à l'interface, en particulier la présence d'une couche de neige saturée en eau liquide. Cette couche de neige saturée en eau liquide à l'interface est relativement importante dans le contexte de la viabilité hivernale, car elle est source d'accidents et de difficulté de déneigement par les services d'exploitation en cas de regel. La validation a également permis de mettre en avant les limites du modèle. En effet, le processus de fonte naturelle est difficilement reproduit dans le modèle. Cette difficulté est due à l'hétérogénéité spatiale du processus de fonte, qui fait intervenir des transferts latéraux non pris en compte dans le modèle. Cependant, on se situe hors du contexte du problème de la viabilité hivernale, où les chaussées sont rapidement déneigées par les services d'exploitation.

La sensibilité du modèle au revêtement a été étudiée à partir des mesures effectuées sur le site du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Nancy, où différents types de revêtements (d'épaisseur 4cm) ont été installés sur le parking. Le modèle est parvenu à simuler des différences dans le comportement thermique des revêtements (température de surface et à 4 cm de profondeur). Cependant ces différences de comportement sur la température de surface se montrent moins significatives que l'erreur (un écart quadratique moyen d'environ 2°C entre les deux revêtements au comportement le plus éloigné contre un écart quadratique moyen de l'erreur d'environ 3°C). Concernant la présence de neige, le modèle s'est montré peu sensible au type de revêtement. Cependant, les principales différences de comportement observées se situent au niveau de la fonte, dont la difficulté de reproduction du processus par le modèle a été mise en avant, et non au niveau de l'enneigement. L'intérêt de la paramétrisation de différents types de revêtements dans un contexte opérationnel doit être étudié de façon plus significative, avec par exemple une étude sur des structures de chaussées complètement différentes, et non uniquement des différences sur le revêtement.

La base de données expérimentale du projet Gelcro a également permis la validation du modèle dans un contexte de prévision. La faisabilité de la prévision a été étudiée à partir des épisodes neigeux du Col de Porte. La prévision a été effectuée sur une échéance de 24 heures, de 6h TU à 6h TU, à partir des prévisions atmosphériques du modèle SAFRAN (Durand et al. 1993). La majorité des cas de présence de neige sur la chaussée expérimentale a été prévue par le modèle (le taux de détection et le taux de fausses alarmes sont respectivement de 70% et 30%). Les

mauvaises prévisions sont essentiellement dues à une mauvaise prévision des données météorologiques. La prévision de température de surface s'est montrée également relativement précise (avec un écart quadratique moyen de l'erreur d'environ 5°C).

Les prévisions effectuées sur le site expérimental étant relativement satisfaisantes, le modèle a été spatialisé à l'échelle de la France, dans un cadre proche des systèmes opérationnels de Météo-France, utilisés pour la prévision hydrologique (chaîne SAFRAN/ISBA/MODCOU) et pour la prévision de température de surface (chaîne SAFRAN/ISBA-Route), donc avec une résolution horizontale identique (environ 8km). Une simulation de l'hiver 2004/2005 a été réalisée, hiver au cours duquel de nombreux épisodes de présence de neige sur les routes se sont produits, notamment en régions de plaine. La validation des prévisions de la température de surface des routes a été effectuée grâce à des mesures provenant de stations météoroutières de diverses autoroutes (A40, A20, A4, A10) ou de l'Aéroport d'Orly. Les prévisions de température de surface se sont montrées relativement satisfaisantes et homogènes pour l'intégralité des stations, avec un écart quadratique moyen de l'erreur de l'ordre de 4°C. De même, la prévision de l'événement "minimum de température de surface négatif", paramètre qui intéresse fortement l'exploitant autoroutier, s'est montrée relativement satisfaisante.

Les épisodes de présence de neige sur les routes survenus au cours de l'hiver n'ont pas été validés de manière approfondie, par manque de données de validation pertinentes. Cependant, les archives de presse et l'observation d'occurrence de neige ont permis de voir une bonne concordance entre les prévisions et les épisodes neigeux remarquables.

Perspectives d'utilisation du modèle couplé ISBA-Route/CROCUS

La validation d'épisodes neigeux doit être effectuée de manière approfondie, mais ces premiers résultats laissent entrevoir une utilisation intéressante dans un cadre de prévision à échelle globale. Le problème de la validation à grande échelle est relativement difficile. Les stations météoroutières sont rarement équipées de capteurs de hauteur de neige en surface de la chaussée et de plus la fiabilité de ces mesures est discutable (techniquement et pratiquement à cause du masquage de l'information par la présence de saumure). Une prévision en temps réel au cours d'un hiver permettrait certainement de valider précisément les épisodes neigeux car les données de présence de neige sur les routes sont très peu archivées. De plus, l'utilisation de données d'archives précises nécessite de remonter à la source de tous les exploitants et Directions Départementales de l'Equipement, car aucun dispositif de centralisation des données

n'existe. Ce travail de synthèse nécessite de remonter à l'ensemble des mains courantes des exploitants de la route qui rassemblent les observations sur le terrain (présence de neige, de verglas) et les mesures d'exploitation (déneigements, épandage de fondants). Il s'agit d'une tâche relativement lourde, mais cette voie semble à l'heure actuelle celle qui permettrait une validation approfondie. En absence de technologie fiable des capteurs de hauteur de neige intégrés aux stations météoroutières, les instruments qui permettraient une validation approfondie sont les caméras vidéo. La validation effectuée au Col de Porte en a montré l'intérêt. Il semble impossible d'équiper l'intégralité des stations du réseau en caméras vidéo, ainsi ce type de validation se devra d'être ponctuelle et effectuée sur des endroits stratégiques. Une utilisation du modèle est envisagée à titre expérimental sur l'aéroport d'Orly. L'aéroport n'est pas soumis fréquemment à des épisodes neigeux, mais ce type de validation peut être mené en collaboration avec d'autres exploitants.

Ces travaux de thèse ont permis de développer un modèle de prévision de l'état des routes en conditions hivernales. Ce modèle pourrait à terme devenir un outil d'aide à la décision pour les services d'exploitation hivernale. Les perspectives relatives à cet outil sont intéressantes. En effet, l'approche réalisée dans ce projet permet de combler un manque : la prévision explicite de l'occurrence de neige sur une chaussée. Les modèles de prévision s'intéressent principalement à la température de surface de chaussées. Pour l'exploitant, la prévision de la présence de neige se limite à la prévision de la précipitation neigeuse. Le modèle couplé ISBA-Route/CROCUS pourrait donc fournir une indication supplémentaire pour l'exploitant. L'utilisation du modèle en contexte opérationnel nécessite des informations simples qui peuvent aisément être mises en place à partir des résultats du modèle. Par exemple, des résultats fournis sous forme de carte de l'itinéraire permettent une visualisation rapide des résultats sur l'ensemble du réseau. Par contre, une contrainte relative au contexte opérationnel serait à mettre en œuvre : le réseau de calcul des prévisions. Les prévisions effectuées sur le réseau 6h–6h sont inadaptées. En effet, la prise de décision est effectuée par l'exploitant en fin d'après-midi (gestion du matériel, des astreintes), ainsi un réseau plus tardif, par exemple 12h–12h serait beaucoup plus adapté au contexte. A l'heure actuelle, ce réseau ne peut pas être mis en œuvre pour le modèle SAFRAN car les précipitations sont mesurées à 6h TU. Ce réseau reste envisageable ultérieurement avec l'utilisation de radars pour la mesure des précipitations. La solution envisagée actuellement pour la chaîne opérationnelle SAFRAN-ISBA-Route est une augmentation de l'échéance à 48h.

Le second intérêt de ce modèle est son contexte d'utilisation. Le modèle n'utilise que les prévisions météorologiques pour fournir une prévision de l'état des routes (température de surface, occurrence et hauteur de neige, type d'interface). Concernant la température de surface, l'intérêt peut sembler limité pour les grands axes de circulation, équipés de stations météoroutières et d'outils de prévision plus précis (avec un écart quadratique moyen de l'erreur de l'ordre de 1 à 2°C). Cependant, la prévision de température de surface relativement correcte en comparaison aux mesures de stations météoroutières, peut s'avérer très utile pour les zones non équipées de stations, et notamment les réseaux secondaires. De plus, comme pour les prévisions associées aux stations météoroutières, les prévisions du modèle peuvent être combinées avec une descente d'échelle, afin d'extrapoler les résultats entre les différents points de grille. Par exemple, l'utilisation du véhicule Thermoroute permettrait une extrapolation de la prévision à l'échelle de l'itinéraire. L'échelle utilisée ici permet une cartographie de la prévision sur la France entière. Ainsi, ces résultats d'ensemble peuvent avoir un intérêt important pour des organismes responsables de territoires vastes, comme les Directions Interdépartementales des Routes.

Préalablement à une utilisation opérationnelle, l'utilisation du modèle dans un contexte de recherche est indispensable. Cette étude a été effectuée dans des conditions naturelles qui restent éloignées du contexte opérationnel (traitement de la chaussée par les fondants, influence du trafic). A l'heure actuelle, la recherche sur les fondants progresse et laisse penser à terme à une connaissance précise du cycle de vie des fondants routiers. Ainsi, une paramétrisation des fondants routiers et du trafic au sein du modèle sera nécessaire. Les données de température de surface fournies par les exploitants autoroutiers sont mesurées sur des voies circulées. Aucun biais n'est apparu sur la prévision de température de surface pour ces stations, par rapport à des mesures provenant de voies sans trafic et sans utilisation de fondants (Col de Porte et Aéroport d'Orly). L'effet du trafic et des fondants est peut être compensé par d'autres paramètres (par exemple compensation du réchauffement dû au trafic par la localisation de la station dans un endroit froid). La sensibilité du modèle aux fondants et au trafic devra ainsi être appréciée et permettre de conclure à un éventuel intérêt de la paramétrisation de ces facteurs dans un contexte opérationnel. Ainsi l'amélioration du modèle est liée à l'avancement de la recherche sur le cycle de vie des fondants routiers. Concernant les aspects liés au trafic, une voie d'amélioration du modèle est une campagne expérimentale effectuée sur une voie circulée. Les résultats des prévisions effectuées avec le modèle ont montré que la qualité des prévisions était fortement liée à la qualité des données météorologiques d'entrée. Ainsi, l'amélioration des

prévisions météorologiques engendrera une amélioration de la prévision de la température de surface et de la présence de neige sur les chaussées. L'incertitude associée aux prévisions du modèle couplé ISBA-Route/CROCUS doit également être étudiée de manière fine, avec par exemple des techniques de prévisions d'ensemble.

L'état des routes ne concerne pas uniquement la température de surface et la présence de neige. La présence de glace en surface est un facteur de risque relativement important. L'apprécier uniquement à partir de la température de surface semble insuffisant. Les multiples types de glace en surface ne peuvent pas être tous gérés par le modèle couplé ISBA-Route/CROCUS, cependant le modèle présente certaines perspectives sur ce sujet, à partir du réservoir de surface. De la même manière, le modèle comporte certaines perspectives sur l'étude du bilan hydrique de surface. En effet, même en hiver, la pluie reste le facteur accidentogène le plus important. La simulation des transferts hydriques au sein du revêtement de surface rend le modèle utilisable pour des recherches liées à l'hydrologie des routes concernant l'étude des pertes d'adhérence associées.

Annexe A : Les chaussées expérimentales

La localisation des différentes chaussées expérimentales installées sur le site du Col de Porte est donnée sur la Figure A.1.

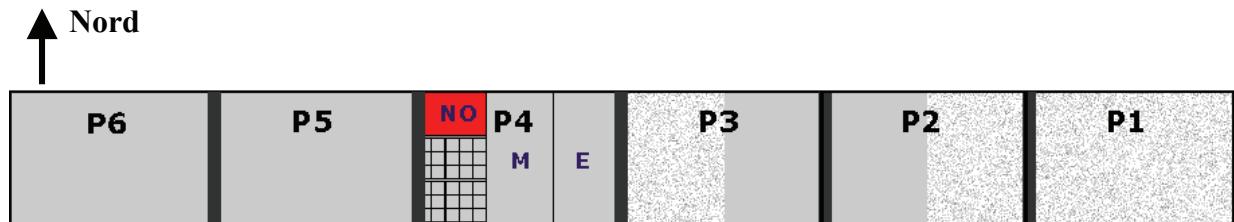


Figure A.1 : Localisation des différentes chaussées expérimentales installées sur le site du Col de Porte.

Les descriptions détaillées de chaque chaussée sont données sur les figures A.2 à A.9. Les acronymes utilisés sur les figures représentent :

- BBSG : Béton Bitumineux Semi-Grenus
- BBDR : Béton Bitumineux Drainant
- BBTM : Béton Bitumineux très Mince

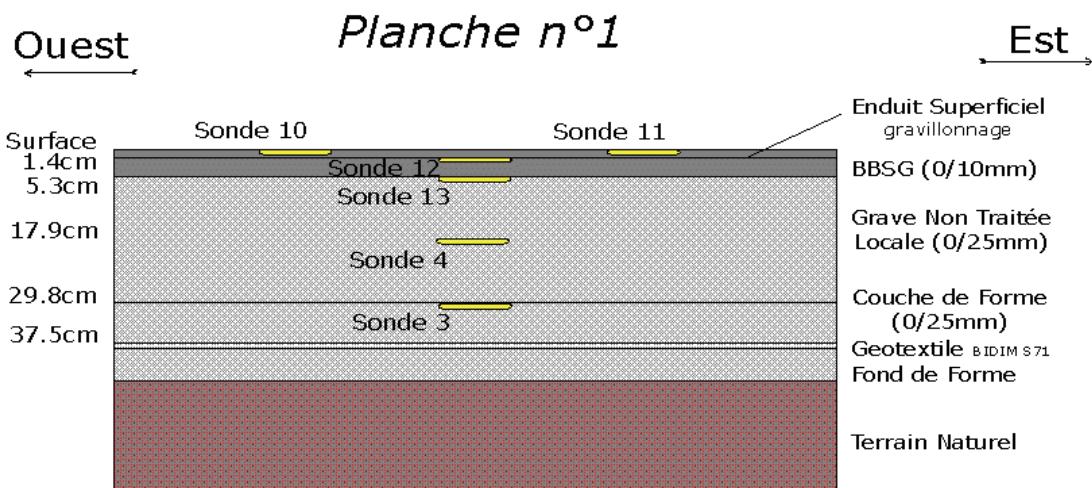


Figure A.2 : Description de la structure de la chaussée n°1.

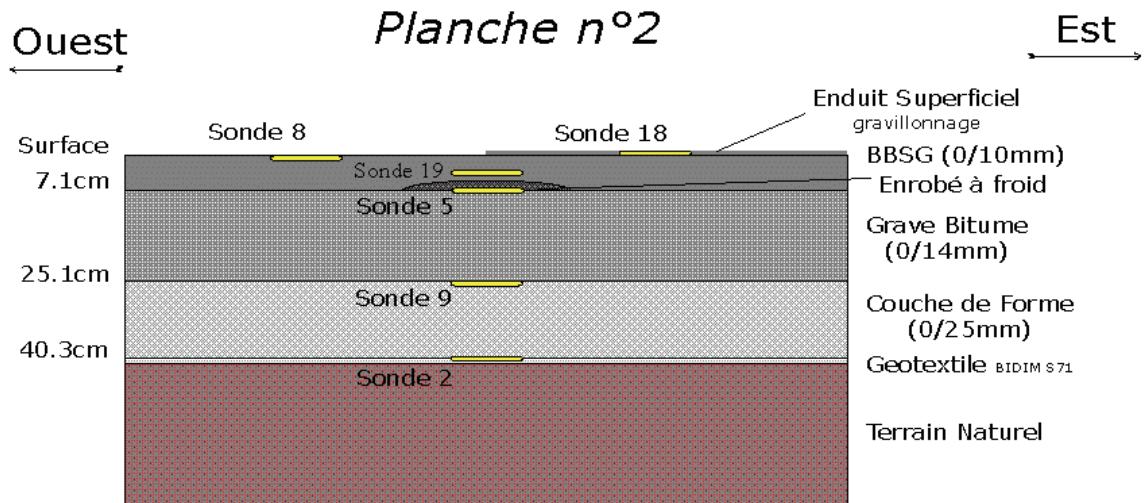


Figure A.3 : Description de la structure de la chaussée n°2.

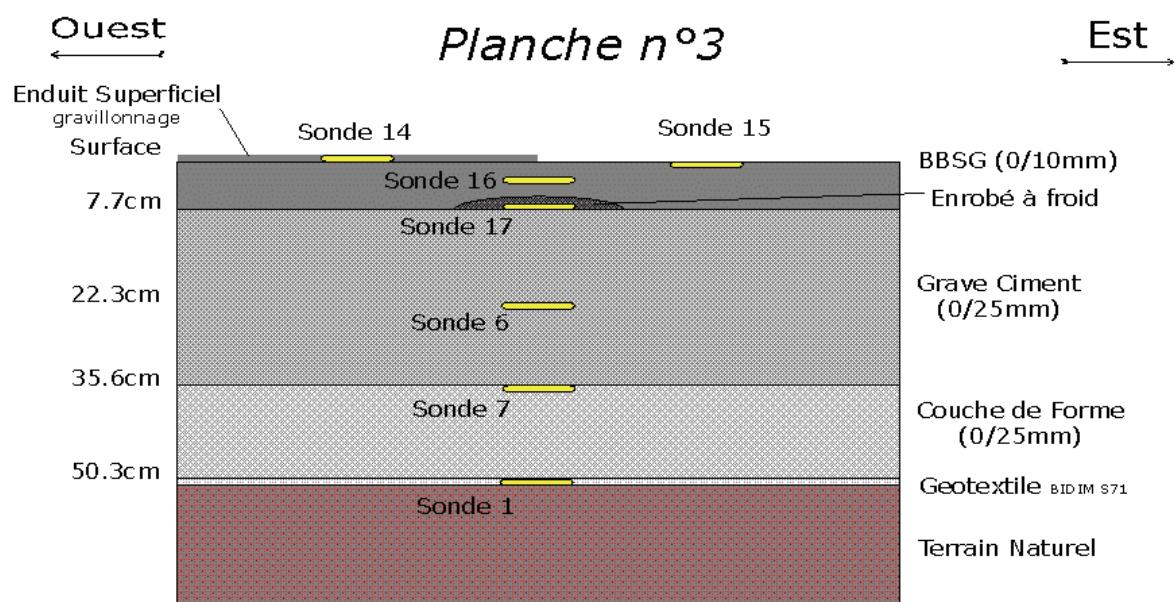


Figure A.4 : Description de la structure de la chaussée n°3.

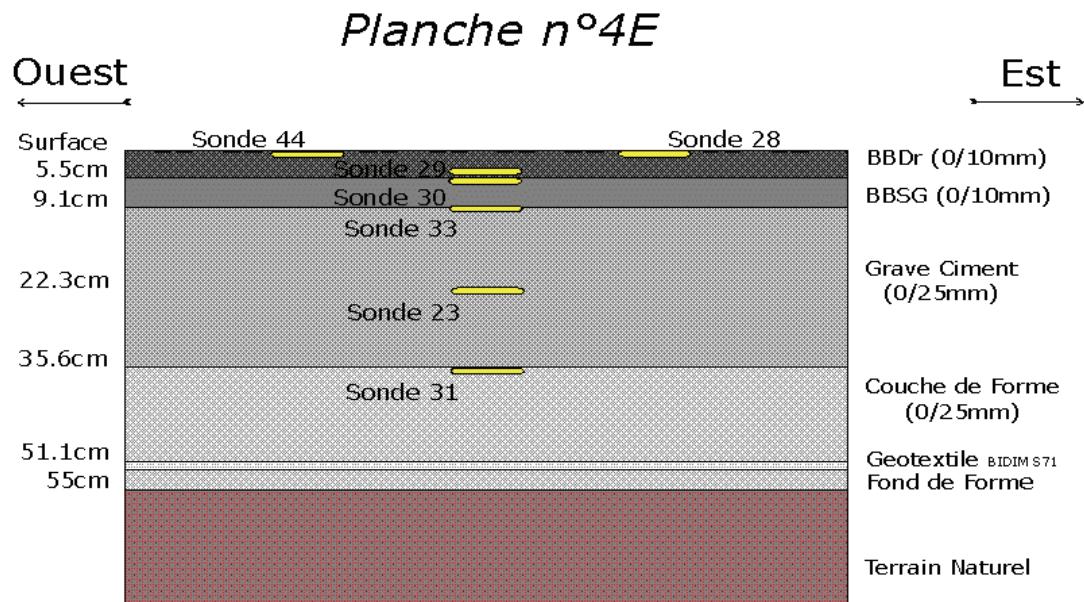


Figure A.5 : Description de la structure de la chaussée n°4E.

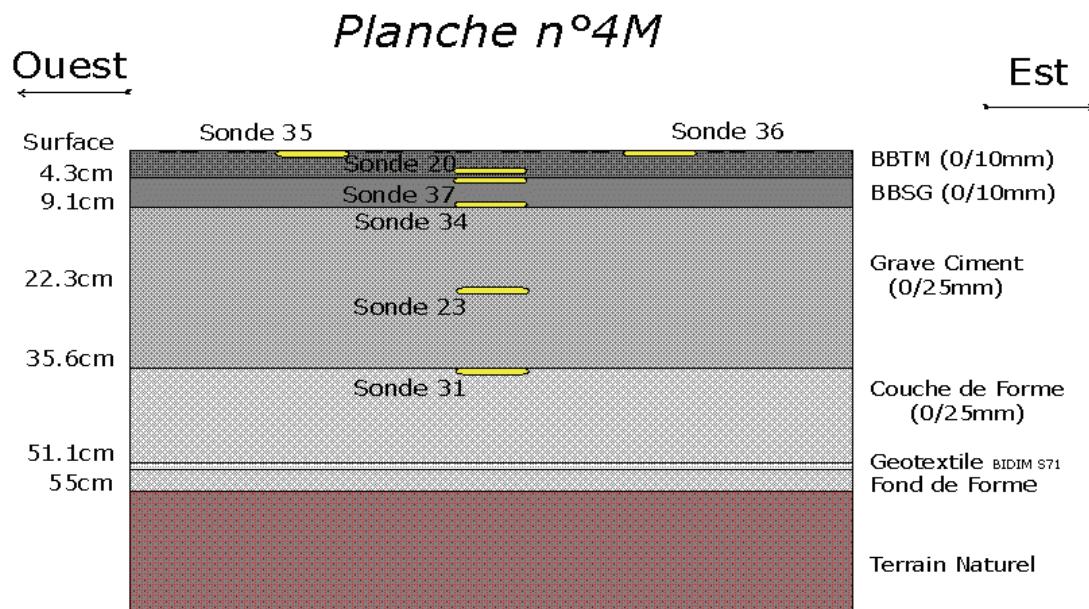


Figure A.6 : Description de la structure de la chaussée n°4M.

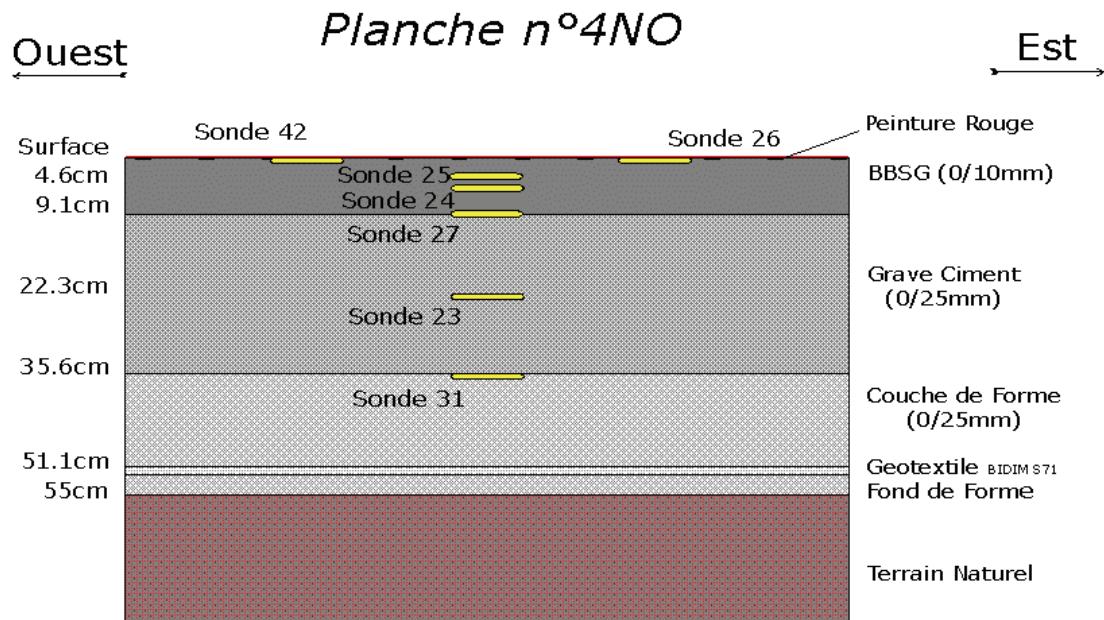


Figure A.7 : Description de la structure de la chaussée n°4NO.

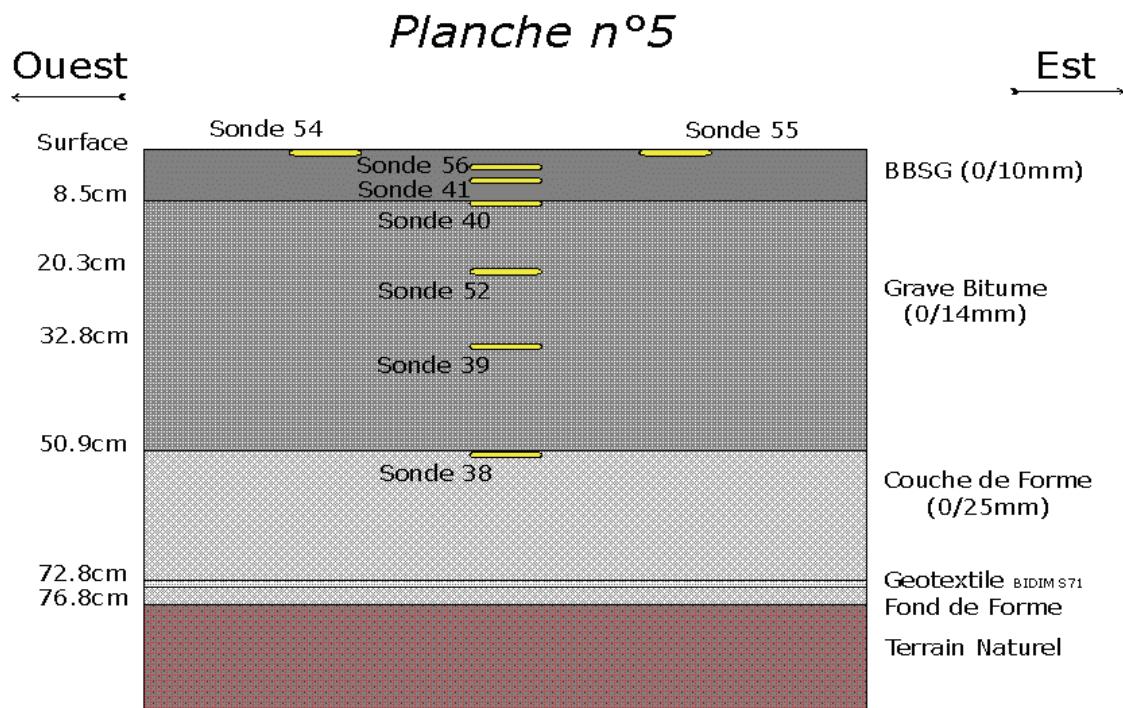


Figure A.8 : Description de la structure de la chaussée n°5.

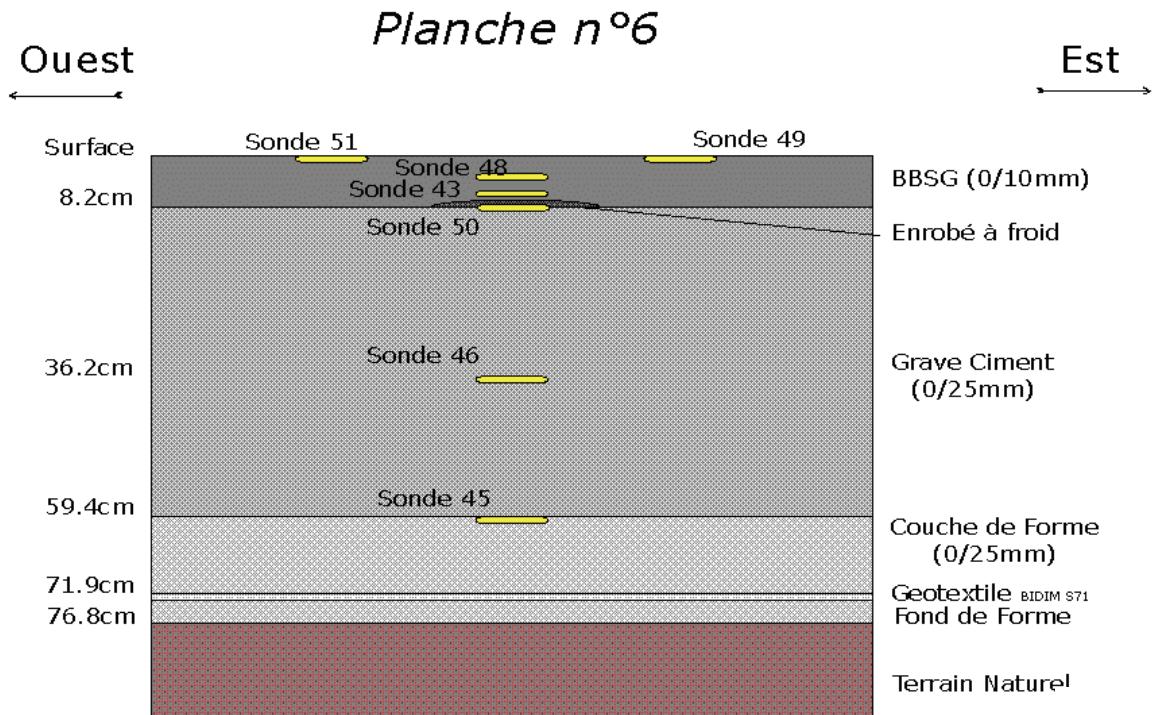


Figure A.9 : Description de la structure de la chaussée n°6.

Annexe B : Résolution du profil de température

Le système tridiagonal (équation 3.93) obtenu après discréétisation est :

$$\begin{bmatrix} b_1 & c_1 & & & & \\ a_2 & b_2 & c_2 & & & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & & \\ & a_s & b_s & c_s & & \\ & & a_{N1} & b_{N1} & c_{n1} & \\ & & & \dots & \dots & \dots \\ & & & & a_{K+L} & b_{K+L} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_1^{t+\Delta t} \\ T_2^{t+\Delta t} \\ \dots \\ T_s^{t+\Delta t} \\ \dots \\ T_{N1}^{t+\Delta t} \\ \dots \\ T_{K+L}^{t+\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \dots \\ d_s \\ \dots \\ d_{N1} \\ \dots \\ d_{K+L} \end{bmatrix}$$

Les coefficients sont définis par

$$a_i = -\frac{1}{\frac{\Delta z_i}{\lambda_i} + \frac{\Delta z_{i-1}}{\lambda_{i-1}}}$$

$$b_i = \frac{1}{\frac{\Delta z_i}{\lambda_i} + \frac{\Delta z_{i-1}}{\lambda_{i-1}}} + \frac{1}{\frac{\Delta z_i}{\lambda_i} + \frac{\Delta z_{i+1}}{\lambda_{i+1}}} + \frac{\Delta z_i \rho_i C p_i}{\Delta t}$$

$$c_i = -\frac{1}{\frac{\Delta z_i}{\lambda_i} + \frac{\Delta z_{i+1}}{\lambda_{i+1}}}$$

$$d_i = \frac{1}{\frac{\Delta z_i}{\lambda_i} + \frac{\Delta z_{i-1}}{\lambda_{i-1}}} T_{i-1}^t + \left(\frac{\Delta z_i \rho_i C p_i}{\Delta t} - \frac{1}{\frac{\Delta z_i}{\lambda_i} + \frac{\Delta z_{i-1}}{\lambda_{i-1}}} - \frac{1}{\frac{\Delta z_i}{\lambda_i} + \frac{\Delta z_{i+1}}{\lambda_{i+1}}} \right) T_i^t + \frac{1}{\frac{\Delta z_i}{\lambda_i} + \frac{\Delta z_{i+1}}{\lambda_{i+1}}} T_{i+1}^t + F_{sol}$$

Condition limite inférieure

La condition de flux nul permet d'écrire

$$a_1 = 0$$

$$b_1 = \frac{1}{\frac{\Delta z_1}{\lambda_1} + \frac{\Delta z_2}{\lambda_2}} + \frac{\Delta z_1 \rho_1 C p_1}{\Delta t}$$

$$c_1 = -\frac{1}{\frac{\Delta z_1}{\lambda_1} + \frac{\Delta z_2}{\lambda_2}}$$

$$d_1 = \left(\frac{\Delta z_1 \rho_1 C p_1}{\Delta t} - \frac{1}{\frac{\lambda_1}{\lambda_1} + \frac{\Delta z_2}{\lambda_2}} \right) T_1^t + \frac{1}{\frac{\lambda_1}{\lambda_1} + \frac{\Delta z_2}{\lambda_2}} T_2^t$$

Condition limite supérieure

La condition limite supérieure représente le bilan énergétique de surface. Les coefficients sont définis par

$$a_{K+L} = -\frac{1}{\frac{\Delta z_{K+L}}{\lambda_{K+L}} + \frac{\Delta z_{K+L-1}}{\lambda_{K+L-1}}} - 2 \varepsilon_N \sigma T_{surf}^t \left(\frac{\Delta z_{K+L}}{\Delta z_{K+L} + \Delta z_{K+L-1}} \right)^3 - C_h \left(\frac{\Delta z_{K+L}}{\Delta z_{K+L} + \Delta z_{K+L-1}} \right)^{0.5}$$

$$- C_h a \left(\frac{\Delta z_{K+L}}{\Delta z_{K+L} + \Delta z_{K+L-1}} \right)^{0.5}$$

$$b_{K+L} = \frac{1}{\frac{\Delta z_{K+L}}{\lambda_{K+L}} + \frac{\Delta z_{K+L-1}}{\lambda_{K+L-1}}} + \frac{\Delta z_{K+L} \rho_{K+L} C p_{K+L}}{\Delta t} + 2 \varepsilon_N \sigma T_{surf}^t \left(\frac{\Delta z_{K+L}}{\Delta z_{K+L} + \Delta z_{K+L-1}} + 1 \right)$$

$$+ C_h \left(\frac{\Delta z_{K+L}}{\Delta z_{K+L} + \Delta z_{K+L-1}} + 1 \right)^{0.5} + C_h a \left(\frac{\Delta z_{K+L}}{\Delta z_{K+L} + \Delta z_{K+L-1}} + 1 \right)^{0.5}$$

$$c_{K+L} = 0$$

$$d_{K+L} = A T_{K+L-1}^t - B T_{K+L}^t + 3 \varepsilon_N \sigma T_{surf}^t \left(\frac{\Delta z_{K+L}}{\Delta z_{K+L} + \Delta z_{K+L-1}} \right)^4 + C_h T_a + C_h (q_{sat}(T_a) h_u - b) + F_{sol} + R_A + F_{precip}$$

où les coefficients A et B sont définis par :

$$A = \frac{1}{\frac{\Delta z_{K+L}}{\lambda_{K+L}} + \frac{\Delta z_{K+L-1}}{\lambda_{K+L-1}}} + 2 \varepsilon_N \sigma T_{surf}^t \left(\frac{\Delta z_{K+L}}{\Delta z_{K+L} + \Delta z_{K+L-1}} \right)^3 + C_h \left(\frac{\Delta z_{K+L}}{\Delta z_{K+L} + \Delta z_{K+L-1}} \right)^{0.5}$$

$$+ C_h a \left(\frac{\Delta z_{K+L}}{\Delta z_{K+L} + \Delta z_{K+L-1}} \right)^{0.5}$$

$$B = -\frac{1}{\frac{\Delta z_{K+L}}{\lambda_{K+L}} + \frac{\Delta z_{K+L-1}}{\lambda_{K+L-1}}} + \frac{\Delta z_{K+L} \rho_{K+L} C p_{K+L}}{\Delta t} - 2 \varepsilon_N \sigma T_{surf}^t \left(\frac{\Delta z_{K+L}}{\Delta z_{K+L} + \Delta z_{K+L-1}} + 1 \right)$$

$$- C_h \left(\frac{\Delta z_{K+L}}{\Delta z_{K+L} + \Delta z_{K+L-1}} + 1 \right)^{0.5} - C_h a \left(\frac{\Delta z_{K+L}}{\Delta z_{K+L} + \Delta z_{K+L-1}} + 1 \right)^{0.5}$$

Les symboles utilisés sont explicités dans le chapitre "Liste des symboles", à l'exception des coefficients a et b , qui sont des coefficients résultants de la linéarisation de la tension de vapeur saturante de surface, ainsi que le terme T_{surf} qui est la température de surface du manteau neigeux.

Coefficients à l'interface

La prise en compte du type d'interface nécessite la modifications du terme

$$\frac{1}{\frac{\Delta z_s}{\lambda_s} + \frac{\Delta z_{N1}}{\lambda_{N1}}}$$

par

$$\frac{1}{2R_{th}}$$

dans les coefficients : b_s , c_s , d_s , a_{NI} , b_{NI} et d_{NI} .

Annexe C : Résultats de simulation au Col de Porte

Sont présentés dans cette annexe, les résultats de simulation de l'hiver 1998/99. Les simulations présentées sur les figures C.1 à C.6 ont été effectuées avec le forçage météorologique mesuré sur le site.

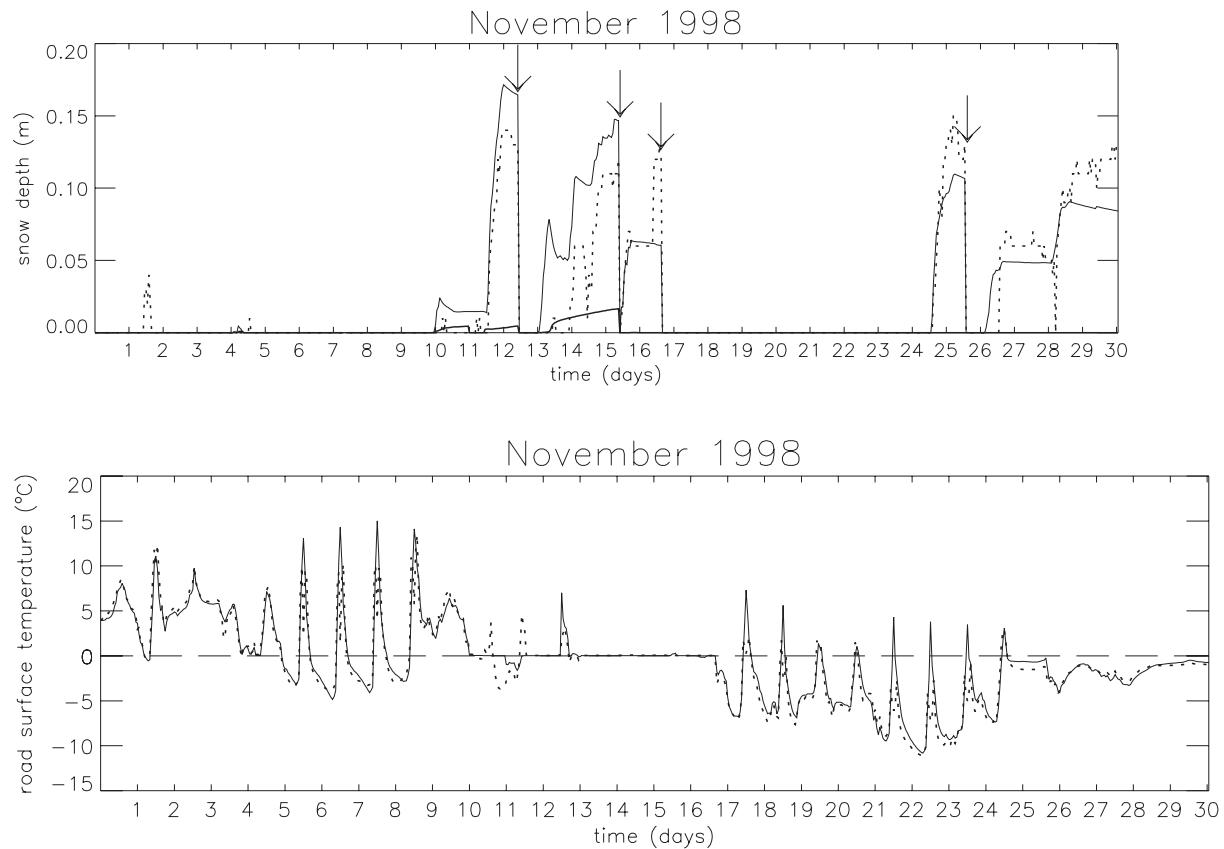


Figure C.1 : Comparaison pour le mois de novembre 1998 a) des hauteurs de neige simulées (trait continu) et mesurées (trait discontinu), simulation de la hauteur de neige saturée en eau liquide (trait épais) et déneigement manuel (↓) b) des températures de surface simulées (trait continu) et mesurées (trait discontinu).

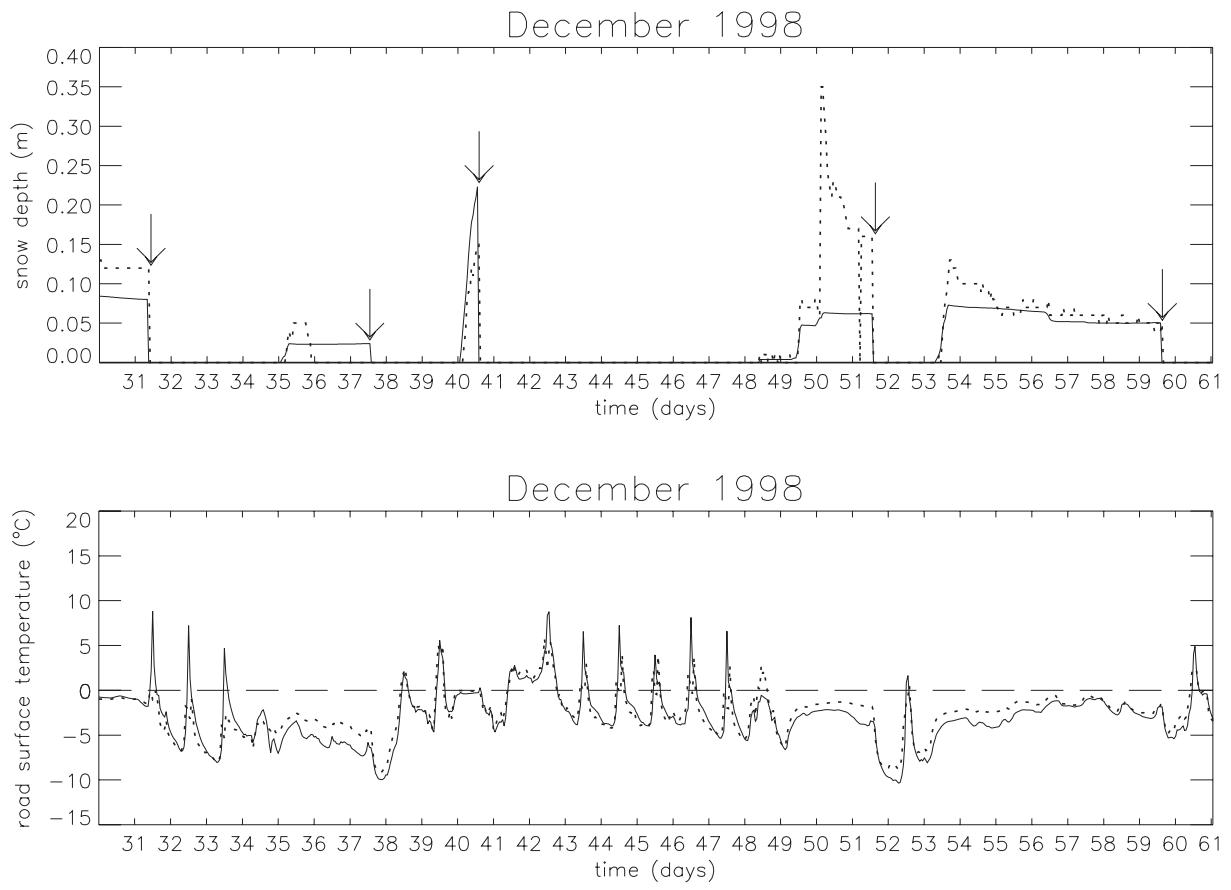


Figure C.2 : Identique à la figure C.1, pour le mois de décembre 1998.

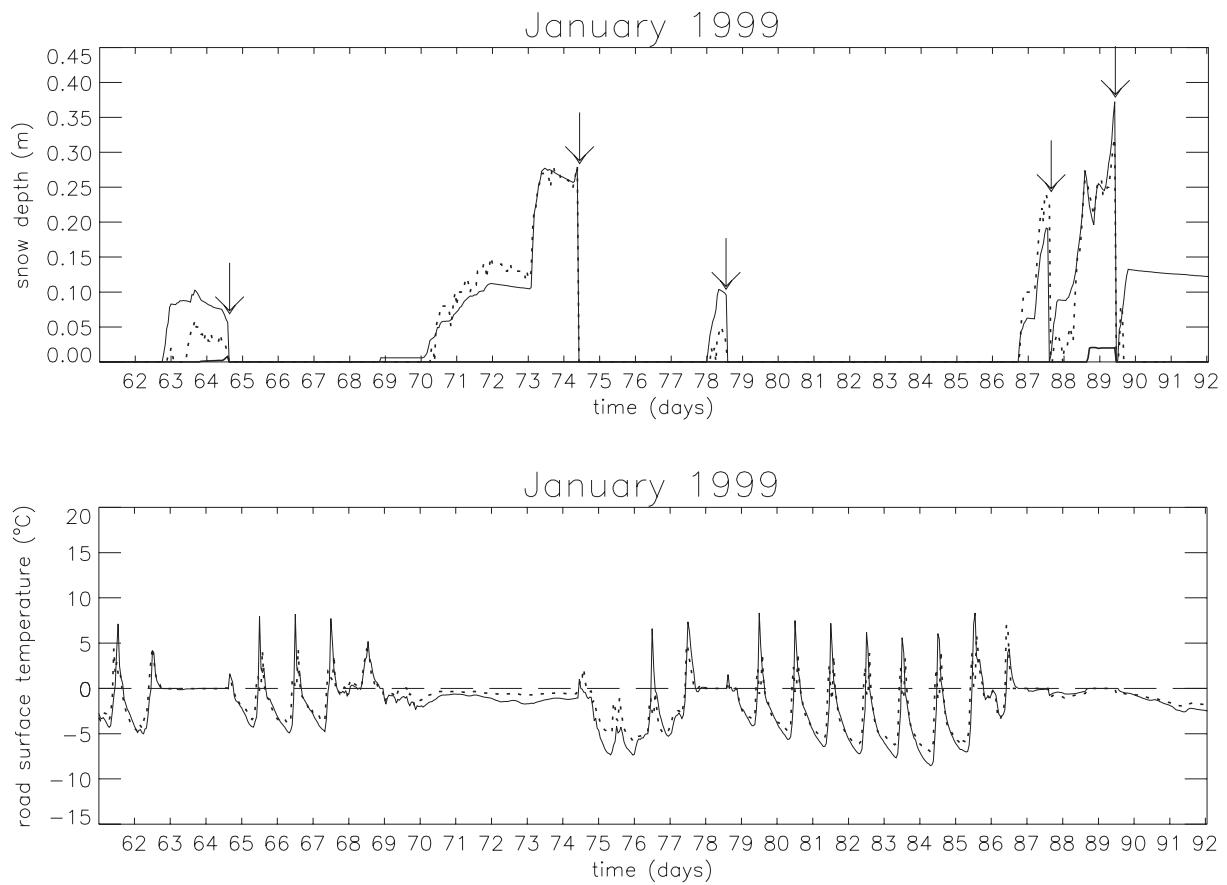


Figure C.3 : Identique à la figure C.1, pour le mois de janvier 1999.

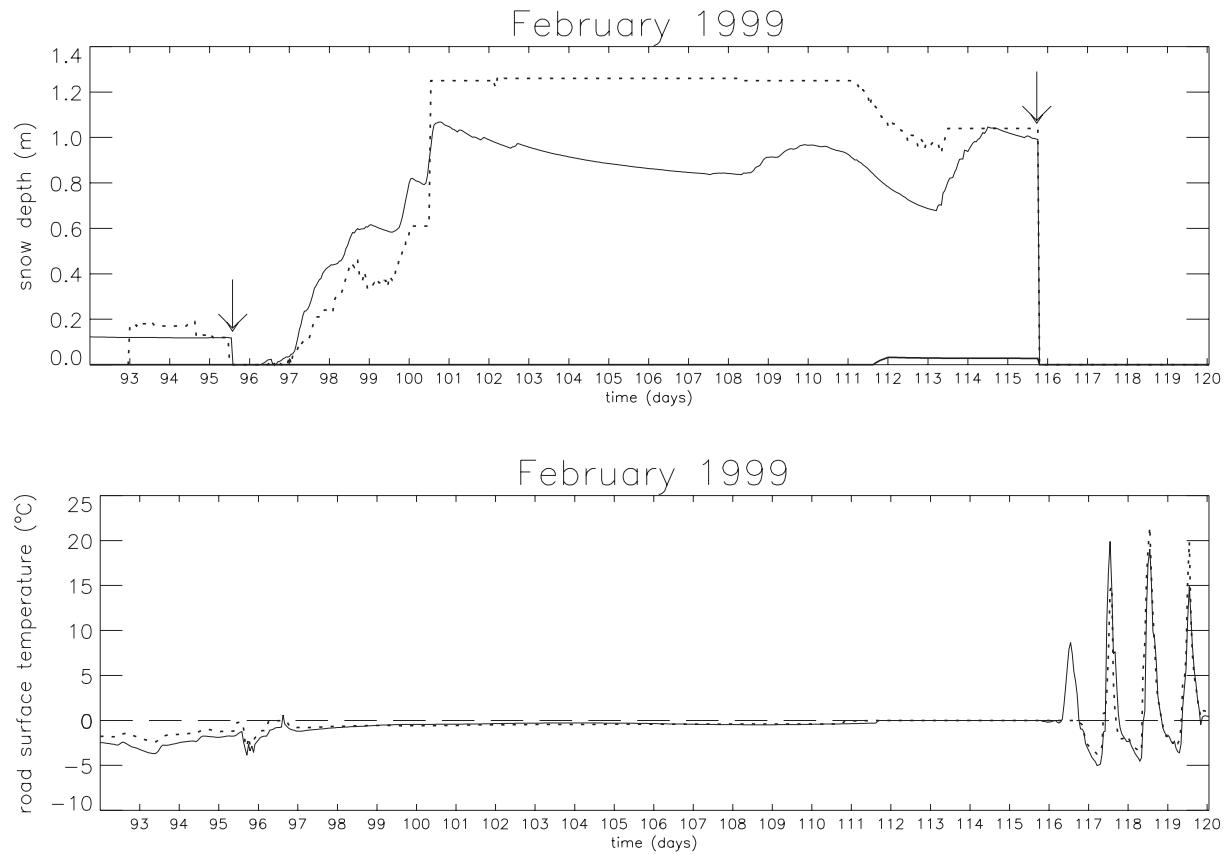


Figure C.4 : Identique à la figure C.1, pour le mois de février 1999.

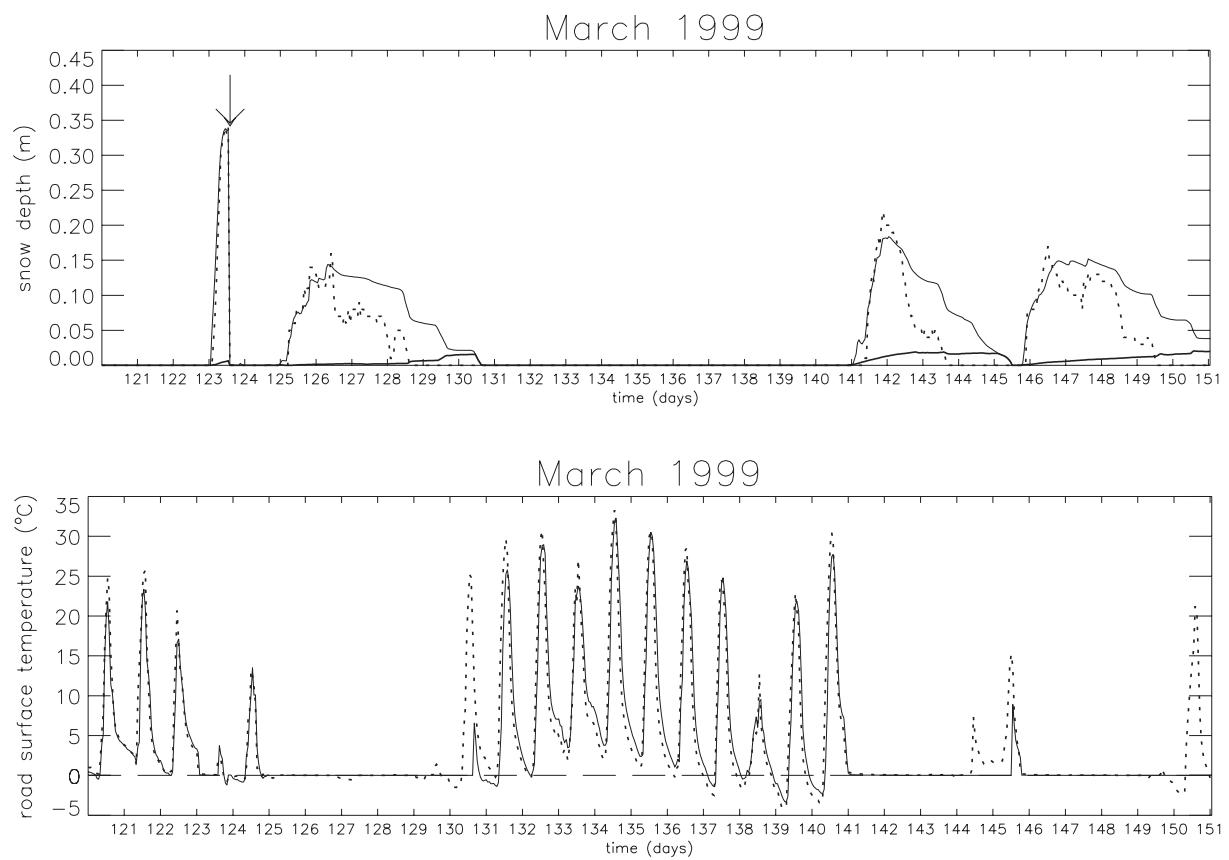


Figure C.5 : Identique à la figure C.1, pour le mois de mars 1999.

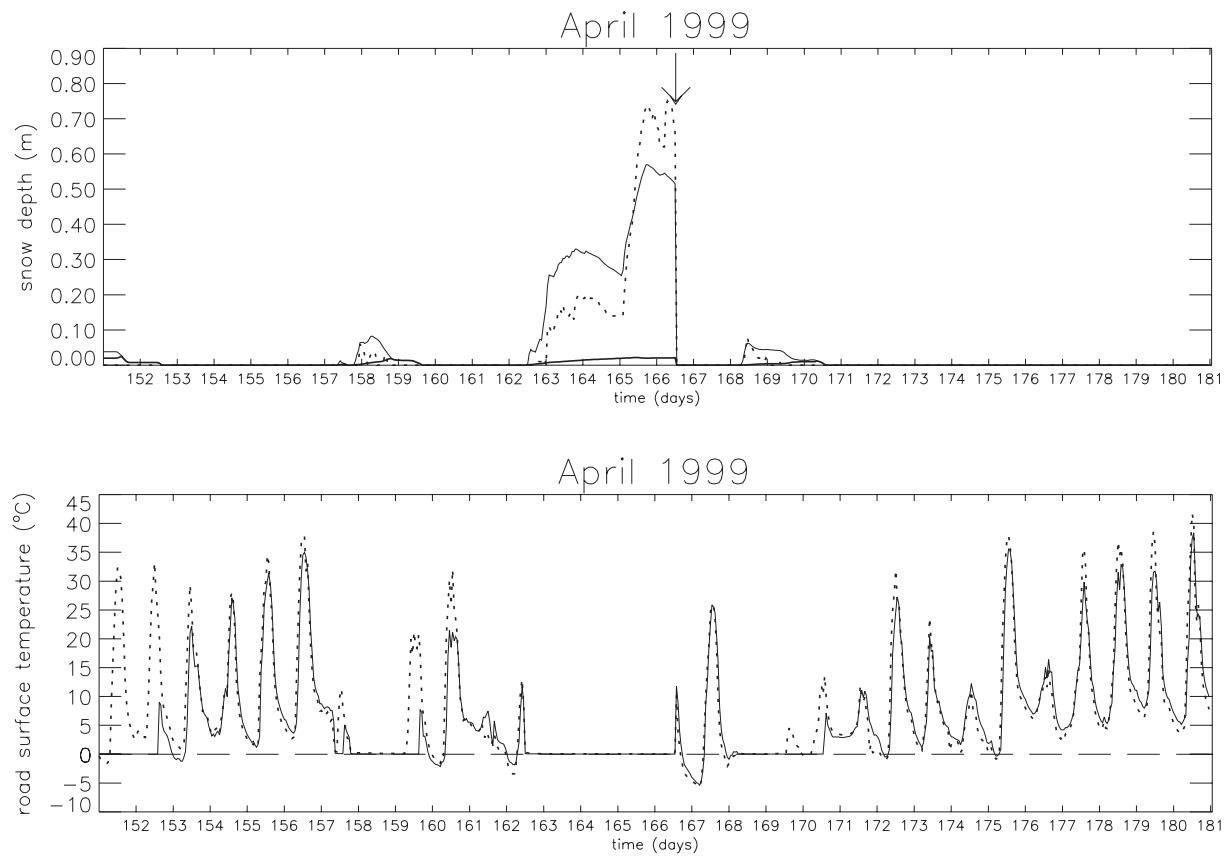


Figure C.6 : Identique à la figure C.1, pour le mois d'avril 1999.

Annexe D : Résultats de simulation sur le site du LRPC de Nancy

Sont présentés dans cette annexe, les résultats de simulation de l'hiver 2003/04 pour la période du 13 décembre 2003 au 31 mars 2004 (figures D.1 à D.4).

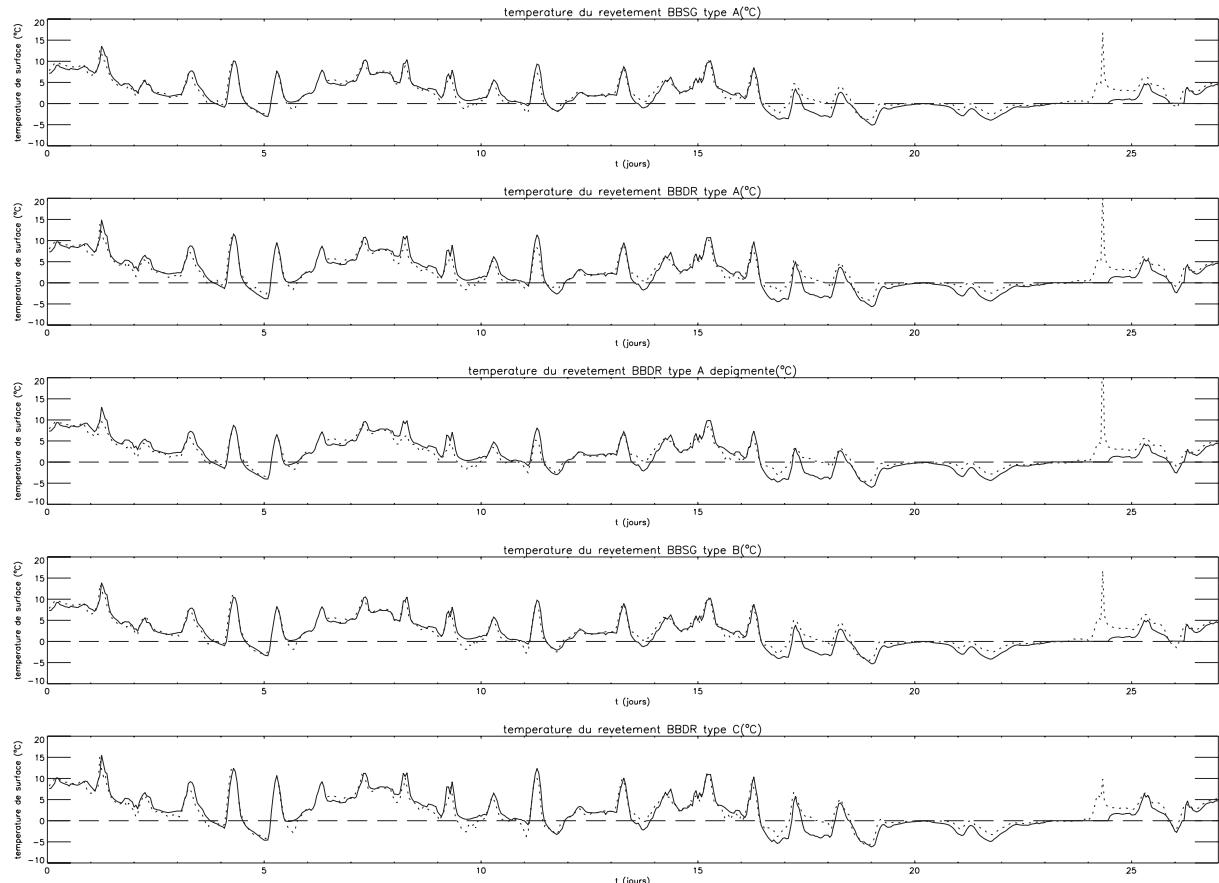


Figure D.1 : Comparaison pour la période du 13 décembre 2003 au 9 janvier 2004 des températures de surface simulées (trait continu) et mesurées (trait discontinu).

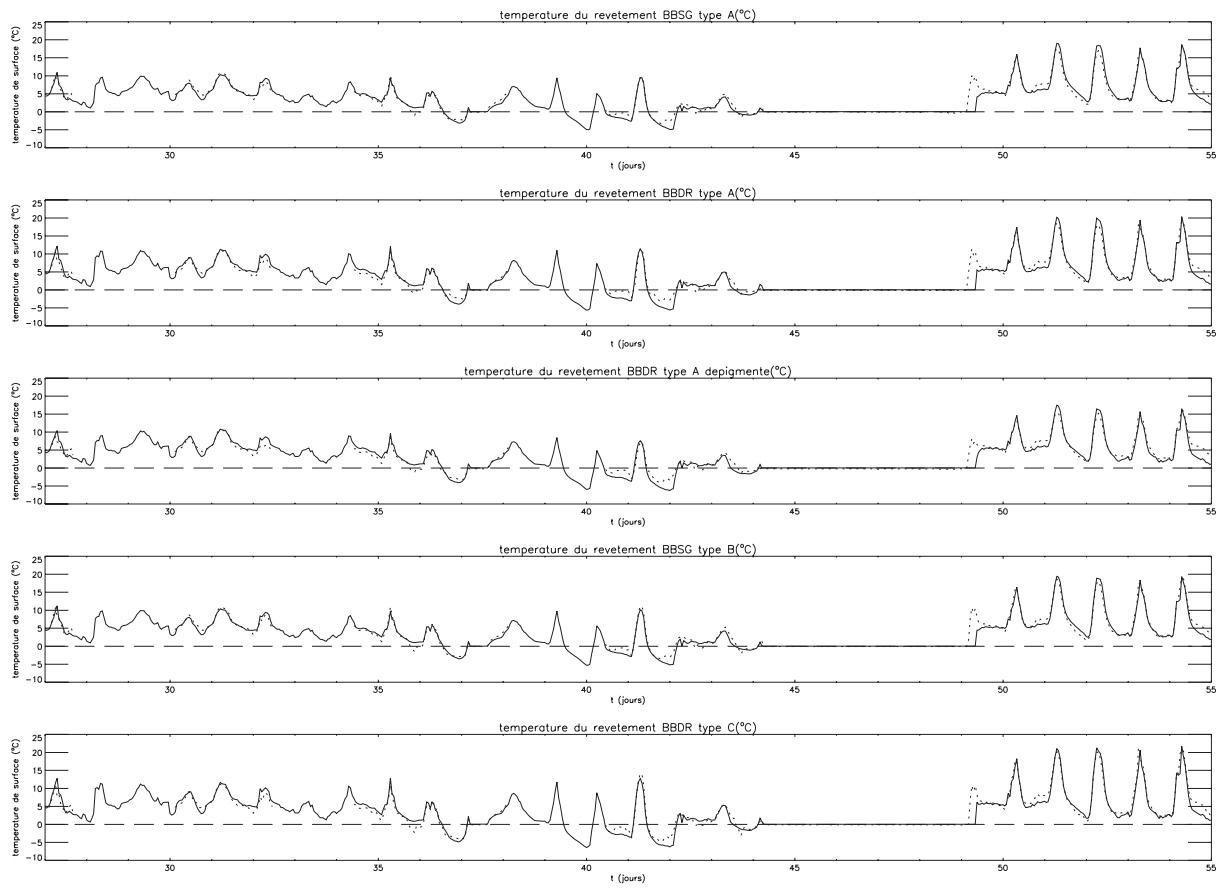


Figure D.2 :Comparaison pour la période du 9 janvier 2004 au 6 février 2004 des températures de surface simulées (trait continu) et mesurées (trait discontinu).

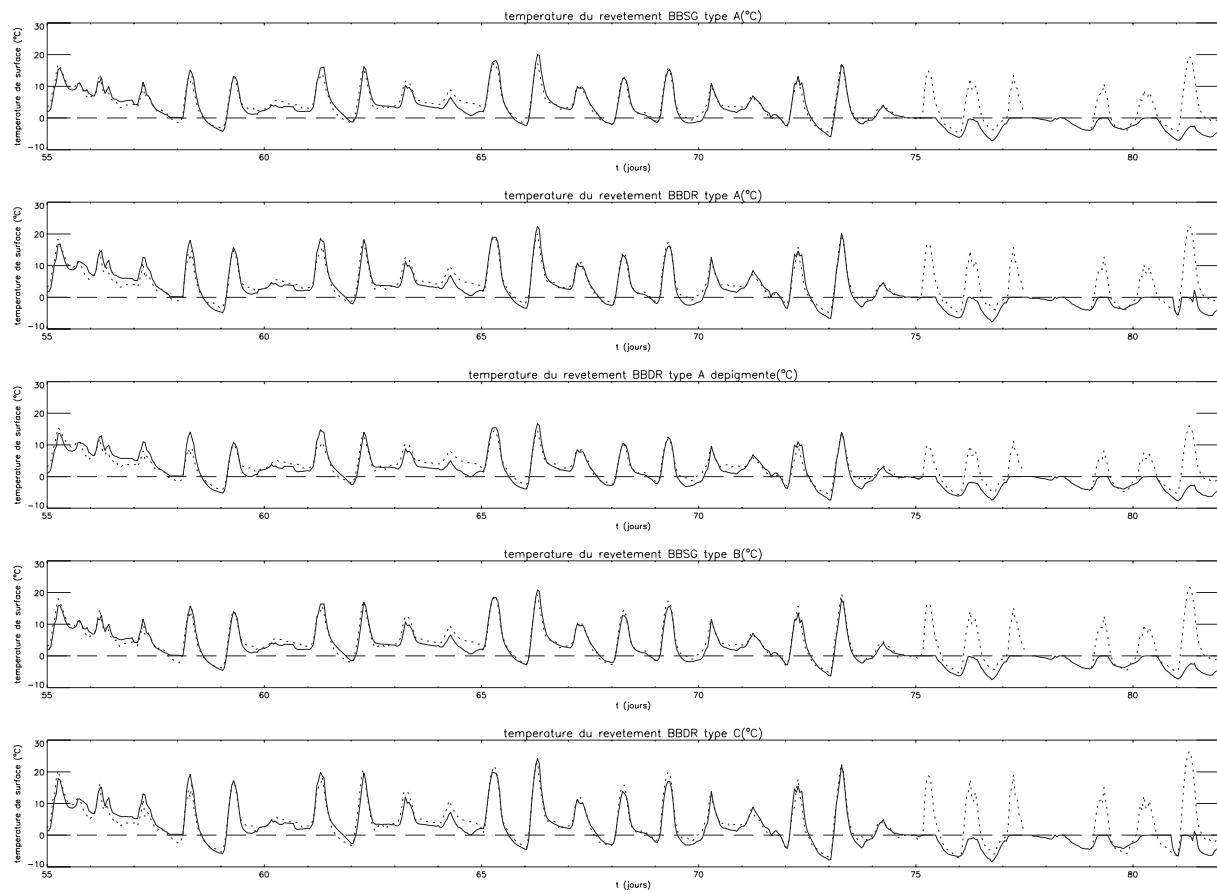


Figure D.3 :Comparaison pour la période du 6 février au 4 mars 2004 des températures de surface simulées (trait continu) et mesurées (trait discontinu).

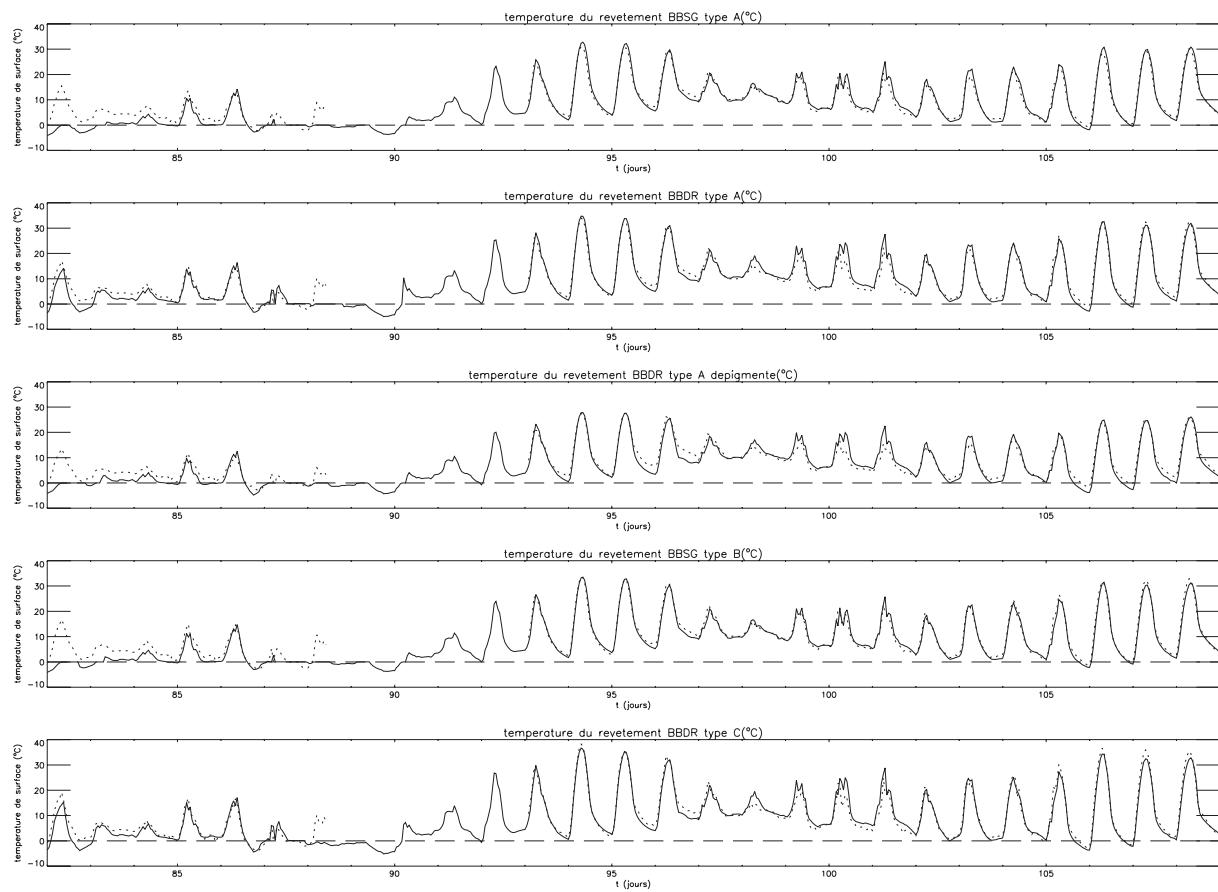
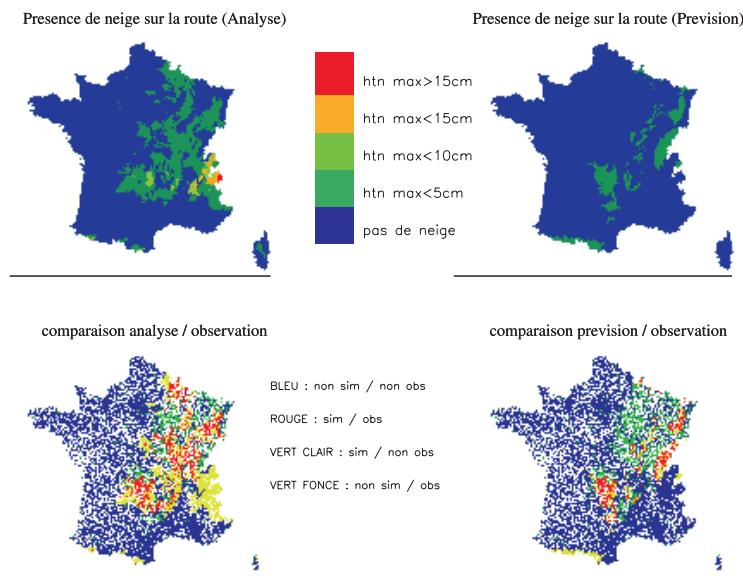


Figure D.4 :Comparaison pour la période du 4 au 31 mars 2004 des températures de surface simulées (trait continu) et mesurées (trait discontinu).

Annexe E : Les épisodes neigeux de l'hiver 2004/05

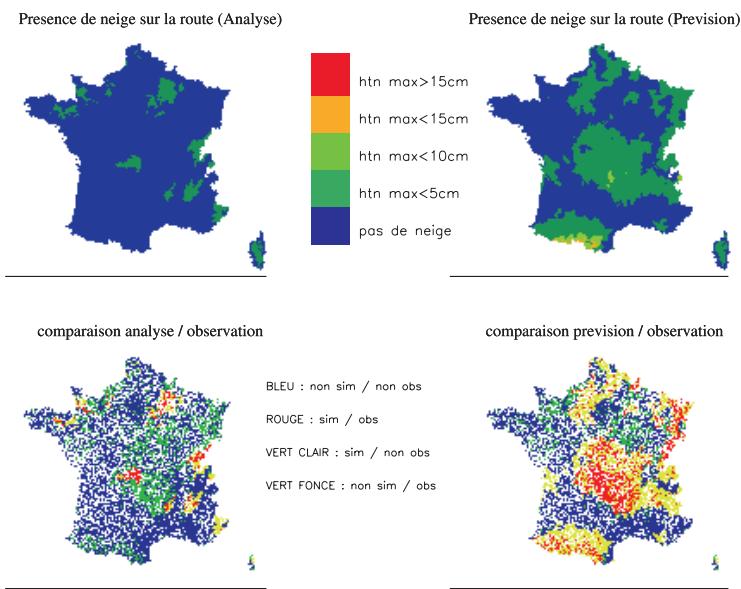
Sont présenté ici les épisodes neigeux de l'hiver 2004/05. Les résultats graphiques de simulations en prévision et en analyse sont présentés, de même que les comparaisons avec l'occurrence de neige observée sur les 5556 postes du réseau de mesure de Météo-France. Les résultats statistiques (définis en section 5.3.2) sont établis à partir des observations humaines d'occurrence de neige au sol. Ces observations sont effectuées sur une centaine de points de grille.

Episode du 22 au 23 décembre 2004



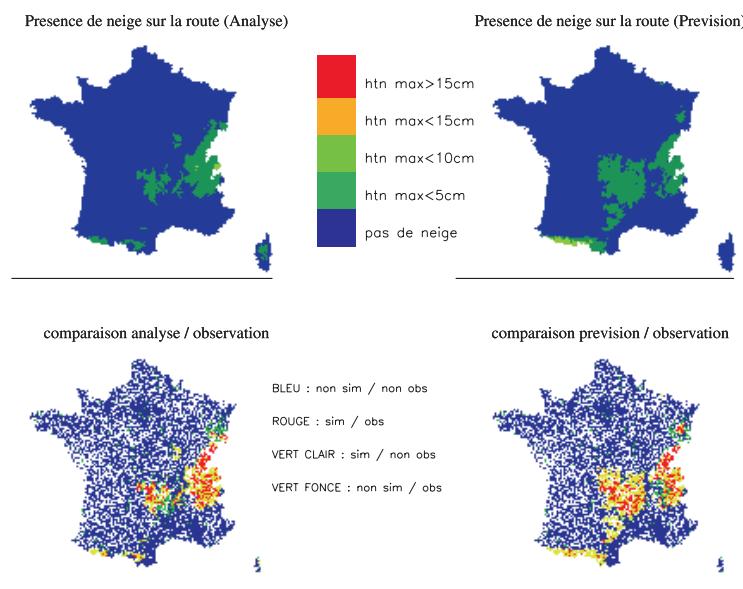
Simulation	TD	TEM	SPE	TFD	TFA
ANALYSE	33.3%	66.7%	93.2%	6.8%	58.3%
PREVISION	13.3%	86.7%	94.2%	5.8%	75.0%

Episode du 25 au 26 janvier 2005



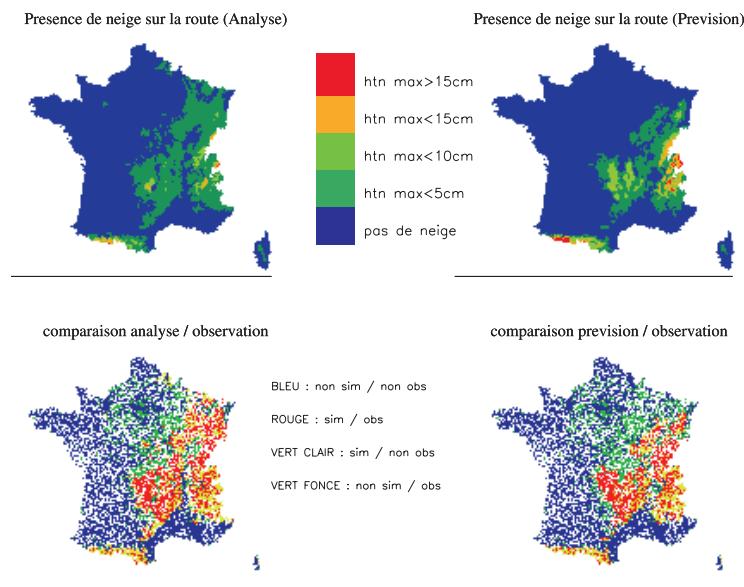
Simulation	TD	TEM	SPE	TFD	TFA
ANALYSE	5.8%	94.2%	98.6%	1.4%	25.0%
PREVISION	51.9%	48.1%	78.1%	21.9%	37.2%

Episode du 1 au 2 février 2005



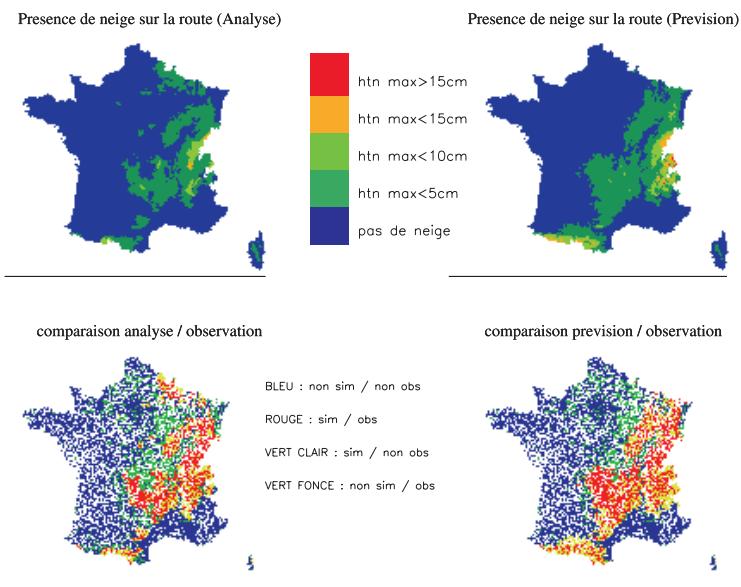
Simulation	TD	TEM	SPE	TFD	TFA
ANALYSE	23.1%	76.9%	96.4%	3.6%	57.1%
PREVISION	38.5%	61.5%	94.6%	5.4%	54.5%

Episode du 13 au 14 février 2005



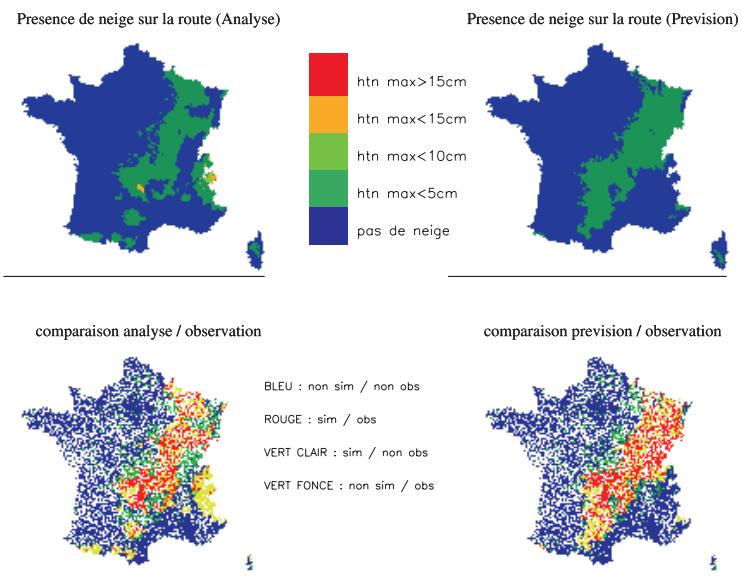
Simulation	TD	TEM	SPE	TFD	TFA
ANALYSE	70.0%	30.0%	92.4%	7.6%	33.3%
PREVISION	55.0%	45.0%	94.6%	5.4%	31.3%

Episode du 14 au 15 février 2005



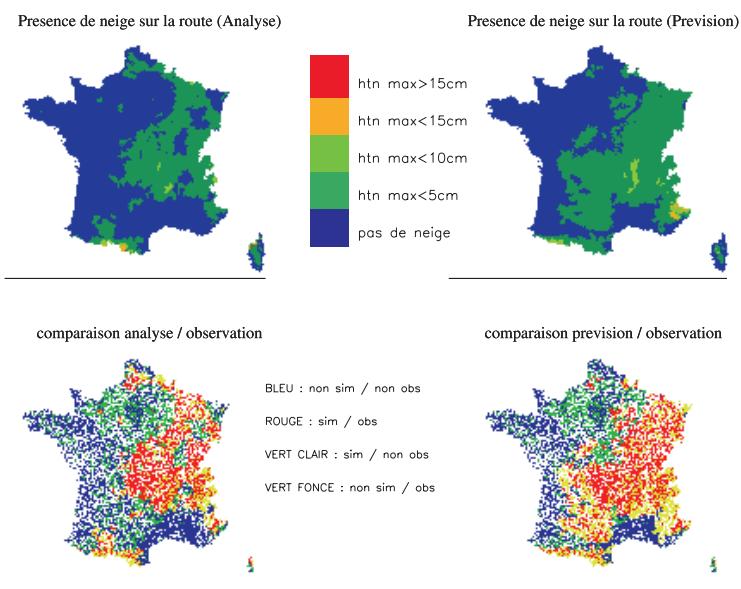
Simulation	TD	TEM	SPE	TFD	TFA
ANALYSE	63.3%	36.7%	95.8%	4.2%	17.4%
PREVISION	76.7%	23.3%	95.8%	4.2%	14.8%

Episode du 18 au 19 février 2005



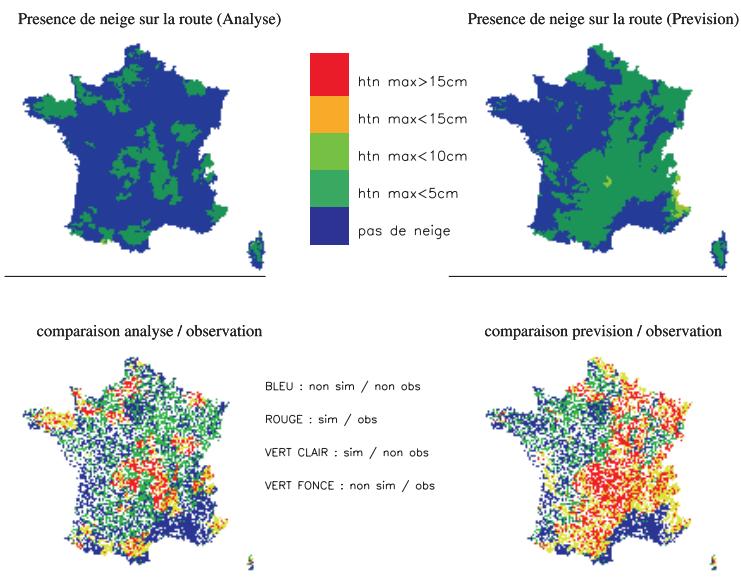
Simulation	TD	TEM	SPE	TFD	TFA
ANALYSE	47.4%	52.6%	89.4%	10.6%	55.0%
PRÉVISION	63.2%	36.8%	86.5%	13.5%	53.8%

Episode du 20 au 21 février



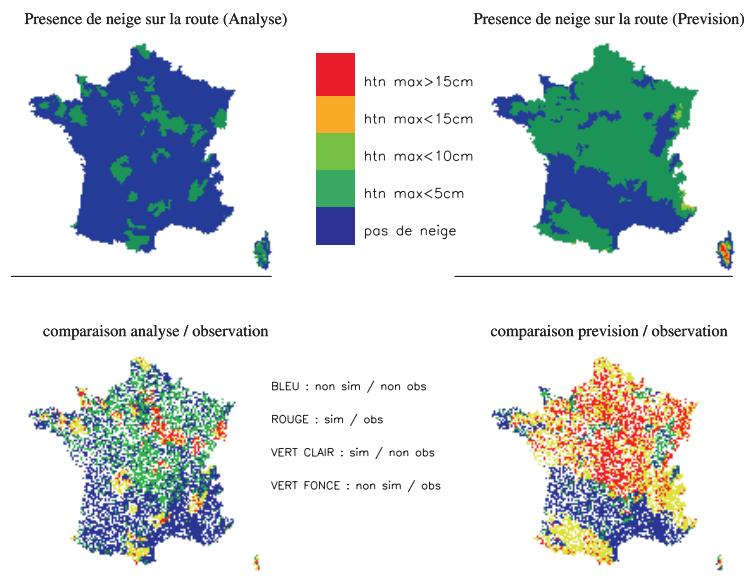
Simulation	TD	TEM	SPE	TFD	TFA
ANALYSE	52.0%	48.0%	97.1%	2.9%	7.1%
PREVISION	66.0%	34.0%	79.4%	20.6%	29.8%

Episode du 21 au 22 février 2005



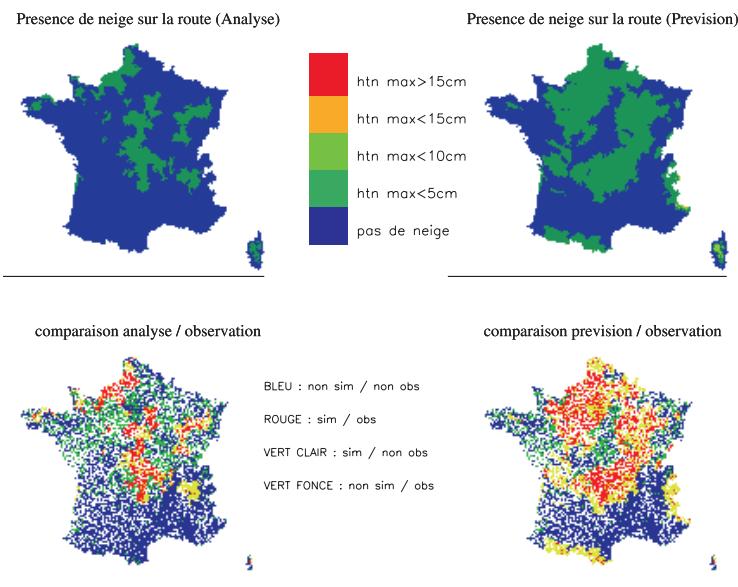
Simulation	TD	TEM	SPE	TFD	TFA
ANALYSE	18.3%	81.7%	95.5%	4.5%	21.4%
PREVISION	60.0%	40.0%	84.8%	15.2%	21.7%

Episode du 22 au 23 février 2005



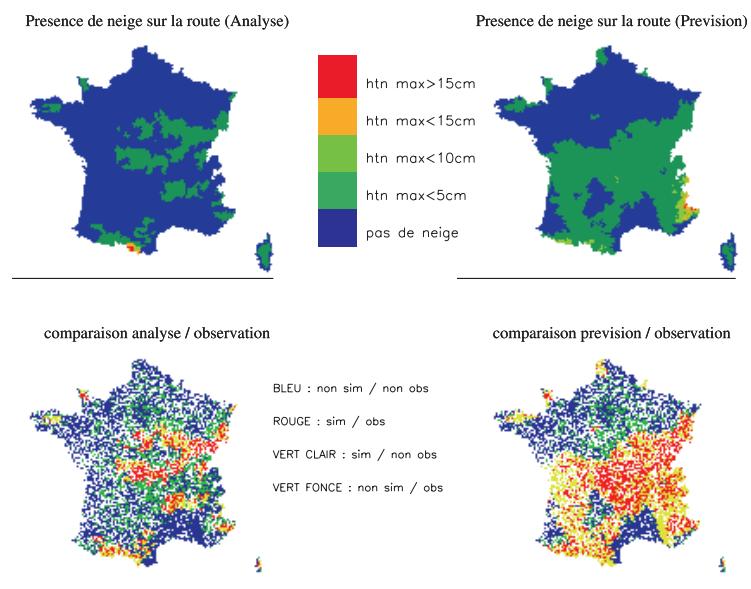
Simulation	TD	TEM	SPE	TFD	TFA
ANALYSE	19.4%	80.6%	94.2%	5.8%	17.6%
PREVISION	68.1%	31.9%	55.8%	44.2%	31.9%

Episode du 24 au 25 février



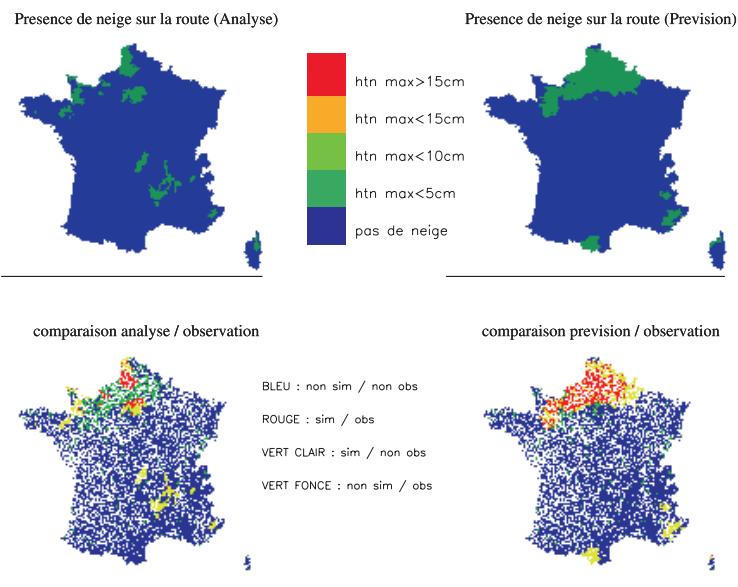
Simulation	TD	TEM	SPE	TFD	TFA
ANALYSE	27.3%	72.7%	91.7%	8.3%	21.7%
PRÉVISION	62.1%	37.9%	78.3%	21.7%	24.1%

Episode du 27 au 28 février 2005



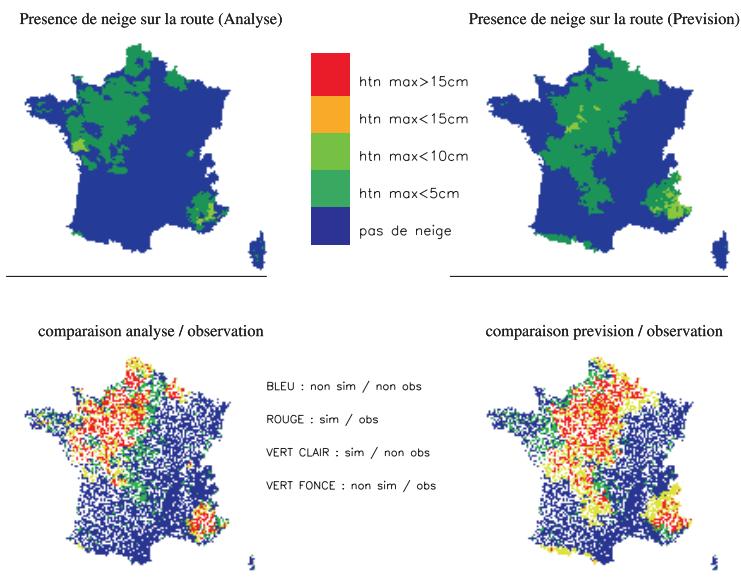
Simulation	TD	TEM	SPE	TFD	TFA
ANALYSE	16.7%	83.3%	91.8%	8.2%	26.7%
PREVISION	36.4%	63.6%	69.4%	30.6%	38.5%

Episode du 1 au 2 mars 2005



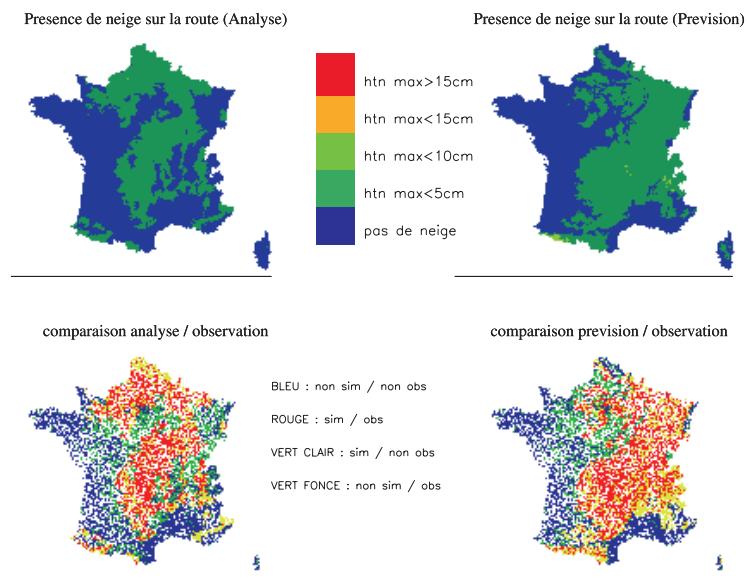
Simulation	TD	TEM	SPE	TFD	TFA
ANALYSE	11.4%	88.6%	96.6%	3.4%	42.9%
PREVISION	31.4%	68.6%	93.2%	6.8%	35.3%

Episode du 2 au 3 mars 2005



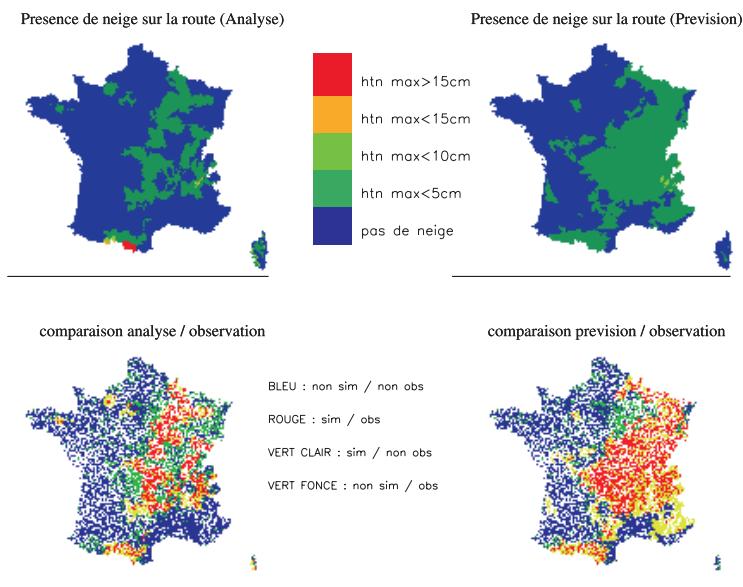
Simulation	TD	TEM	SPE	TFD	TFA
ANALYSE	34.6%	65.4%	88.6%	11.4%	22.2%
PRÉVISION	67.9%	32.1%	80.0%	20.0%	20.3%

Episode du 4 au 5 mars 2005



Simulation	TD	TEM	SPE	TFD	TFA
ANALYSE	50.8%	49.2%	79.3%	20.7%	26.7%
PREVISION	61.5%	38.5%	74.1%	25.9%	27.3%

Episode du 6 au 7 mars 2005



Simulation	TD	TEM	SPE	TFD	TFA
ANALYSE	26.7%	73.3%	98.2%	1.8%	5.9%
PREVISION	56.7%	43.3%	94.6%	5.4%	8.1%

Liste des symboles

b		pente de la courbe de rétention à l'eau
c_i	$\text{J K}^{-1} \text{m}^{-3}$	capacité calorifique de la glace
c_w	$\text{J K}^{-1} \text{m}^{-3}$	capacité calorifique de l'eau liquide
C_a	$\text{J K}^{-1} \text{m}^{-3}$	capacité calorifique de l'air
C_s	$\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$	capacité calorifique massique sèche d'une couche de sol
C_G	$\text{K m}^{-2} \text{J}^1$	inertie thermique du sol nu
C_h		coefficient d'échange turbulent
C_n	$\text{K m}^{-2} \text{J}^1$	inertie thermique de la neige
c_T	$\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$	capacité calorifique d'une couche de sol
C_T	$\text{K m}^{-2} \text{J}^1$	inertie thermique de surface
C_V	$\text{K m}^{-2} \text{J}^1$	inertie thermique de la végétation
C_{ret}		coefficient de rétention en surface de la chaussée
d	m	diamètre optique des grains de neige
$D_{\psi\nu}$	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$	conductivité de la phase vapeur
F	m s^{-1}	flux vertical d'eau liquide
F_{adv}	W m^{-2}	flux d'advection en surface de la chaussée
$F_{cond\ n/ch}$	W m^{-2}	flux de conduction neige/chaussée
$F_{cond\ ch/n}$	W m^{-2}	flux de conduction chaussée/neige
F_{precip}	W m^{-2}	flux de chaleur apporté par les précipitations
G	W m^{-2}	flux de conduction dans le sol
G_o	W m^{-2}	flux de surface net
H	W m^{-2}	flux de chaleur sensible
h_u		humidité relative de surface
h_n	m	hauteur de neige
h_{max}	m	hauteur maximale de saturation
I	m s^{-1}	infiltration
k	m s^{-1}	conductivité hydraulique
k_{sat}	m s^{-1}	conductivité hydraulique à saturation
Ke		nombre adimensionnel de Kersten

LE	W m^{-2}	flux de chaleur latente
L_f	J kg^{-1}	chaleur latente de fusion de la glace
L_v	J kg^{-1}	chaleur latente de vaporisation de l'eau
p_{ng}		fraction de neige sur le sol nu
p_{nv}		fraction de neige sur la végétation
p_n		fraction de neige totale
p_t		proportion de présence de neige au cours du pas de temps
P	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	porosité de la neige
q_a	$\text{kg}^{-1} \text{kg}^{-1}$	humidité spécifique de l'air
q_{sat}	$\text{kg}^{-1} \text{kg}^{-1}$	humidité spécifique à saturation
Q_{cond}	W m^{-2}	flux de conduction entre deux couches de neige
Q_r	m s^{-1}	ruissellement sous-maille
r_m	m	rayon convexe moyen des grains de neige
R_A	W m^{-2}	flux infrarouge incident
R_G	W m^{-2}	flux solaire incident
R_{IR}	W m^{-2}	flux infrarouge net
R_{sol}	W m^{-2}	flux solaire visible net
R_t	m s^{-1}	taux d'eau liquide atteignant la surface
R_{int}	$\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$	résistance thermique d'interface
R_{th}	$\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$	résistance thermique entre la surface de la chaussée et la couche de neige au sol
R_{N1}	$\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$	résistance thermique de la couche de neige au sol
R_s	$\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$	résistance thermique de la couche de surface de chaussée
S_i	$\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$	flux de sublimation de la glace
S_l	$\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$	flux latéral d'eau liquide
S_w		degré de saturation du sol
T	K	température d'une couche de sol
T_s	K	température de surface
T_a	K	température de l'air
T_N	K	température de surface de la neige
T_{N1}	K	température de la couche de neige au sol
T_o	K	température de fusion de la glace
u_a	m s^{-1}	vitesse de l'air

veg		fraction de végétation
V_{pores}	m^3	volumes des pores de la neige
V_{ret}	m^3	volume de rétention en surface de la chaussée
w	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$	contenu en eau volumétrique total
w_{\min}	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$	contenu minimum en eau liquide (volumétrique)
w_i	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$	contenu en eau solide (volumétrique)
w_l	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$	contenu en eau liquide (volumétrique)
w_{sat}	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$	porosité de la couche
W	kg m^{-2}	masse d'eau liquide dans la neige
W_n	kg m^{-2}	équivalent en eau du manteau neigeux
W_{crn}	kg m^{-2}	équivalent en eau critique du manteau neigeux
W_s	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$	teneur en eau liquide de la couche de surface de chaussée
W_{N1}	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$	teneur en eau liquide de la couche de neige au sol
W_{ret}	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$	teneur en eau liquide de rétention de la couche de neige au sol
z	m	profondeur du nœud
z_0	m	rugosité de la maille
α_i		albédo de la neige dans la bande spectrale i
α_s		albédo de la surface du sol
α_t		albédo de la partie déneigée de la maille
β_i	m^{-1}	coefficent d'extinction de la bande spectrale i
ε_N		émissivité de la neige
ε_S		émissivité de la surface du sol
ε_t		émissivité de la partie déneigée de la maille
λ	$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	conductivité thermique
λ_e	$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	conductivité thermique effective de la neige
λ_o	$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	conductivité thermique des minéraux
λ_{dry}	$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	conductivité thermique sèche d'une couche de sol
λ_i	$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	conductivité thermique de la glace
λ_q	$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	conductivité thermique du quartz
λ_{sat}	$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	conductivité thermique saturée d'une couche de sol
λ_{soil}	$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	conductivité thermique des particules solides
λ_w	$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	conductivité thermique de l'eau liquide
ρ_a	kg m^{-3}	densité de l'air

ρ_{dry}	kg m^{-3}	densité sèche d'une couche de sol
ρ_n	kg m^{-3}	densité de la neige
ρ_{soil}	kg m^{-3}	densité sèche d'une couche de sol
ρ_{solids}	kg m^{-3}	poids unitaire des particules de sol
ρ_w	kg m^{-3}	densité de l'eau liquide
Φ	$\text{J m}^{-3} \text{s}^{-1}$	terme source/puit de chaleur associé au changement de phase de l'eau
Δz	m	épaisseur d'une couche de sol
ΔU	W m^{-2}	variation d'énergie interne d'une couche de neige
σ	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$	constante de Boltzmann
ψ	m	potentiel hydrique
ψ_{sat}	m	potentiel hydrique à saturation
φ		coefficient d'impédance de la glace

Références bibliographiques

- Adams, E.E., Mc Kittrick, L.R., Gauer, P., Curran, A.R., 2004 : A first principles pavement thermal model for topographically complex terrain. *Proceedings of the 6th International Symposium on Snow Removal and Ice Control Technology, 7-9 juin 2004, Washington, U.S.A*
- Anderson, E. A., 1976 : A point energy and mass balance model of a snow cover. NOAA Tech. Rep. NWS 19, 150 pp.
- Backström, M., Bergström, A., 2000 : Draining function of porous asphalt during snowmelt and temporary freezing. *Can. J. Civ. Eng.*, **27**, 594-598
- Baker, D.G., Ruschy, D.L., Wall, D.B., 1990 : The albedo decay of prairie snows. *J. Appl. Meteor.*, **29**, 179-187
- Baraer, F., 2003 : Prévision de température de chaussée sur la région ouest. Rapport interne Météo-France
- Blackburn, R.R., Amsler, D.E., Bauer, K.M., 2004 : Guidelines for snow and ice control materials and methods. *Proceedings of the 6th International Symposium on Snow Removal and Ice Control Technology, 7-9 juin 2004, Washington, U.S.A*
- Blomqvist, G., Gustafsson, M., 2004 : Patterns of residual salt on road surface – case study. *Proceedings of the 6th International Symposium on Snow Removal and Ice Control Technology, 7-9 juin 2004, Washington, U.S.A*
- Bogren, J., Gustavsson, T., 2000 : Site specific road surface temperature forecast improvements by use of radiation measurements. *Proceedings of the 12th SIRWEC Conference, 16-18 juin 2004, Bingen, Germany*
- Borel, S., 2000 : Etude du comportement de la neige déposée sur une chaussée : Caractérisation de l'interface neige/chaussée. *Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble*.
- Borel, S., Brzoska, J.B., 2000 : A method for sectioning natural snow/pavement samples. *Cold Regions Science and Technology*, **00**, 107-117
- Boone, A., 2000 : Modélisation des processus hydrologiques dans le schéma de surface ISBA : Inclusion d'un réservoir hydrologique, du gel et modélisation de la neige. *Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse*.
- Boone, A., Etchevers, P., 2001 : An intercomparison of three snow schemes of varying complexity coupled to the same land surface model : local-scale evaluation at an Alpine Site. *J. hydrometeor.*, **2**, 374-394
- Boone, A., Masson, V., Meyers, T., Noilhan, J., 2000 : The influence of the inclusion of soil freezing on simulations by a soil-atmosphere-transfer scheme. *J. Appl. Meteor.*, **9**, 1544-1569

- Bouilloud, L., 2003 : Validation et amélioration du couplage d'un modèle de sol et d'un modèle de neige, *Rapport de DEA, Université Joseph Fourier, Grenoble*
- Braud, I., Noilhan, J., Bessemoulin, P., Mascart, P., Havercamp, R., Vauclin, M., 1993 : Bareground surface heat and water exchanges under dry conditions : observations and parameterization. *Bound.-Layer Meteor.*, **66**, 173-200
- Brooks, R.H., Corey, A.T., 1966 : Properties of porous media affecting fluid flow. *J. Irrig. Drain. American Soc. Civil Eng.*, IR **2**, 61-88
- Brun, E., 1989 : Investigation on wet-snow metamorphism in respect of liquid-water content. *Ann. Glaciol.*, **13**, 22-26
- Brun, E., Martin, E., Simon, V., Gendre, C., Coléou, C., 1989 : An energy and mass model of snow cover for operational avalanche forecasting. *J. of Glaciol.*, **35**, 333-342
- Brun, E., David, P., Sudul, M., Brunot, G., 1992 : A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting. *J. of Glaciol.*, **38**, 13-22
- Chapman, L., Thornes, J.E., Bradley, A.V., 2001 : Modelling of road surface temperature from a geographical parameter database. Part 2 : Numerical. *Meteorol. Appl.*, **8**, 421-436
- Chapman, L., Thornes, J.E., Bradley, A.V., 2002 : Sky-view factor approximation using GPS receiver. *Int. J. Climatol.*, **22**, 615-621.
- Chapman, L., Thornes, J.E., 2004 : Road ice prediction using geomatics. *Proceedings of the 12th SIRWEC Conference, 16-18 juin 2004, Bingen, Allemagne*
- Clapp, R., Hornberger, G., 1978 : Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water Resour. Res.*, **14**, 601-604
- Colbeck, S.C., 1973 : Theory of metamorphism of wet snow. *CRREL Res. Rep.*, **313**
- Coléou, C., Lesaffre, B., 1998 : Irreducible water saturation in snow : experimental results in cold laboratory. *Ann. Glaciol.*, **26**, 64-68
- Coléou, C., Ke, X., Lesaffre, B., Brzoska, J.B., 1999 : Capillary rise in snow. *Hydrol. Process.*, **13**, 1721-1732
- Cosby, B.J., Hornberger, G.M., Clapp, R.B., Ginn, T.R., 1984 : A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soil. *Water Resour. Rec.*, **20**, 682-690
- Crevier, L.P., Delage, Y., 2001 : METRo : A new model for road-condition forecasting in Canada. *J. Appl. Meteor.*, **40**, 2026-2037
- Deardoff, J.W., 1968 : Dependence of air-sea transfer coefficients on bulk stability. *J. Geophys. Res.*, **73**, 2549-2577

- Deardoff, J.W., 1977 : A parameterization of ground-surface moisture content for use in atmosphere prediction model. *J. Appl. Meteor.*, **16**, 1182-1185
- Deardoff, J.W., 1978 : Efficient prediction of ground temperature and moisture with inclusion of a layer of Vegetation. *J. Geophys. Res.*, **83**, 1889-1903
- Denoth, A., Seidenbusch, W., Blumthaler, M., Kirchlechner, P., Ambach, W., Colbeck, S.C., 1979 : Study of water drainage from columns of snow. *CRREL Rep.*, 79-1
- Di Benedetto, H., Jouni, M. 1996 : Ecoulement de solutions salines dans les BBD. *Revue générale des routes et des aérodromes*, **741**, 34-38
- Douville, H., Royer, J.F., Mahfouf, J.F., 1995 : A new snow parameterization for the Meteo-France climate model. Part 1: validation in stand alone experiments. *Clim. Dyn.*, **12**, 37-52
- Dubois, C., 2006 : Contribution of the road weather monitoring technologies to the improvement of winter viability management. *Proceedings of the 12th International Winter Road Congres, 27-30 mars 2006, Torino, Italie.*
- Durand, Y., Brun, E., Merindol, L., Guyomarc'h, G., Lesaffre, B., Martin, E., 1993 : A meteorological estimation of relevant parameters for snow models. *Ann. Glaciol.*, **18**, 65-71
- Durand, Y., Giraud, G., Brun, E., Mérindol, L., Martin, E., 1999 : A computer-based system simulating snowpack structures as a tool for regional avalanche forecasting. *J. of Glaciol.*, **45**, 469-484
- Frémont, M., Williams, P., 1979 : Gels des sols et des chaussées. (Soils and roads freezing). *Presse des Ponts et Chaussées*.
- Fujimoto, A., Watanabe, H., Fukuhara, T., 2006 : Effects of tire frictional heat on snow covered road surface. *Proceedings of the 13th SIRWEC Conference, 25-27 mars 2006, Torino, Italie.*
- Guide technique, 1994 : Conception et dimensionnement des structures de chaussée. Édité conjointement par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et le Service d'Etudes Technique des Routes et Autoroutes.
- Habets, F., Noilhan, J., Golaz, C., Goutorbe, J.P., Lacarrère, P., Leblois, E., Ledoux, E., Martin, E., Ottlé, C., Vidal-Madjar, D., 1999 : The ISBA surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the HAPEX-MOBILITY area Part 1 : Model and database. *J. Hydrol.*, **217**, 75-96
- Hertl, S., Schaffar, G., 1998 : An autonomous approach to road temperature prediction. *Meteorol. Appl.*, **5**, 227-238
- Iivavainen, T., Pettersson, M., 2004 : Quality management for road weather data. *Proceedings of the 6th International Symposium on Snow Removal and Ice Control Technology, 7-9 juin 2004, Washington, U.S.A*

- Isenring, T., Köster, H., Scazziga, I., 1990: Experiences with porous asphalt in Switzerland, *Transportation Research Record*, **1265**, 41-53
- Jacobs, W., Raatz, W.E., 1996 : Forecasting road-surface temperatures for different site characteristics. *Meteorol. Appl.*, **3**, 243-256
- Johansen, O., 1975 : Thermal conductivity of soils. *PhD Thesis, Trondheim, Norway.* (CRREL Draft Translation 637, 1977) ADA 044002
- Johnson, H., Lundin, L.C., 1991 : Surface runoff and soil water percolation as affected by snow and soil frost. *J. Hydrol.*, **122**, 141-158
- Karlson, M., 2001 : Prediction of hoar-frost by use of a Road Weather Information System. *Meteorol. Appl.*, **8**, 95-105
- Ketcham, S.A., Minsk, L.D., Blackburn, R.R., Fleege, E.J., 1966 : Manual of practice for an effective anti-icing program : a guide for highway winter maintenance personnel. *U.S. Department of Transportation – Federal Highway Administration*. 63 pp.
- Knollhoff, D.S., Tackle, E.S., Gallus Jr, W.A., Burckheimer, D., McCauley, D., 2003 : Evaluation of a frost accumulation model. *Meteorol. Appl.*, **10**, 337-343
- Kobayashi, T., Sato, T., Kosugi, K., Mochizuki, S., Sato, A., 2006 : Consolidation, melting and refreezing process of snow on roads by vehicles. *Proceedings of the 13th SIRWEC Conference, 25-27 mars 2006, Torino, Italie.*
- Kok Chiew Chai, S.A. Tan, T. F. Fwa, 2004 : Finite element analysis of runoff flow within porous pavement system. *Journal of The Institution of Engineers*, **44-2**, 10-28
- Lassoued, R., 2000 : Comportement hivernal des chaussées : modélisation thermique. *Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.*
- Leclaire, P, Suarez, M, 2005 : Evaluation de la chaîne de prévision de la température de surface de chaussée Safran Isba-Route, et étude de la cohérence entre cette chaîne et la méthode empirique élaborée par la Direction Interrégionale Ouest. *Rapport de stage de fin d'études. Ecole nationale de la Météorologie*. 106 pp.
- Livet, J., 1998 : Fondants routiers – Journée thématique. *Rapport du Ministère de l'Equipement, des Transports et du Logement*. 21pp.
- Louis, J.F, 1979 : A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. *Bound.-Layer Meteor.*, **17**, 187-202
- Lundin, L.C., 1990 : Hydraulic properties in an operational model of frozen soil. *J. Hydrol.*, **118**, 289-310
- Mahfouf, J.-F., Noilhan, J., 1991 : Comparative study of various formulations of evaporation from bare soil using in situ data. *J. Appl. Meteor.*, **30**, 351-362.
- Mahoney, W., Myers, W., Pisano, P., Hallowell, R., Stern, A, 2006 : The US Federal Highway Administration winter road Maintenance Decisions Support System (MDSS) project :

- overview and results. *Proceedings of the 12th International Winter Road Congres, 27-30 mars 2006, Torino, Italie.*
- Marchetti, M., Livet, J., Poissonnier, S., 2006a :Behaviour of different bitumen with a reduced winter risk. Winters 2003/2004 and 2004/2005. *Proceedings of the 12th International Winter Road Congres, 27-30 mars 2006, Torino, Italie.*
- Marchetti, M., Livet, J., Poissonnier, S., Diop, I., 2006b : Brines concentration evolution with climatic conditions : effect of temperature and relative humidity, precipitations and traffic. *Proceedings of the 12th International Winter Road Congres, 27-30 mars 2006, Torino, Italie.*
- Martin, E., Lejeune, Y, 1998 : Turbulent fluxes above the snow surface. *Ann. Glaciol.* , **26**, 179-183
- Mimura, Y., Yoshitake, I., Tsuji, K., Tanimoto, T., hamada, S., 2004 : Influence of heating pipe on snow melting and mechanical properties. *Proceedings of the 12th SIRWEC Conference, 16-18 juin 2004, Bingen, Allemagne.*
- Ministère des Transports, de l'Equipement, du Tourisme et de la Mer : *Circuler en hiver : Campagne sur la viabilité hivernale 2005/2006*. Dossier de Presse
- Muzet, V., 2000 : *Winter maintenance in France*. Rapport du Ministère des Transports, de l'Equipement, du Tourisme et de la Mer, 26 pp.
- Muzet, V., Borel, S., Lassoued, R., 2000 : Study of the snow pavement interface : GELCRO project. *Proceedings of the 10th SIRWEC Conference, 22-24 mars 2000, Davos, Suisse.*
- Muzet, V., Livet, J., 2000 : Projet GELCRO : Campagne 99-00, Influence du compactage de la neige. Rapport LCPC
- Navarre, J.P., 1975 : Modèle unidimensionnel d'évolution de la neige déposée. Modèle Perce-Neige. *La Météorologie*, **4**, 103-120
- Noilhan, J., Planton, S., 1989 : A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 536-549
- Noilhan, J., Mahfouf, J. F., 1996 : The ISBA land surface parameterization scheme. *Global and Planetary Change*, **13**, 145-159
- Norrman, J., 2000 : Slipperiness on roads – an expert system classification. *Meteorol. Appl.*, **7**, 27-36
- Ouadi, I., Muzet, V., Pfeiffer, L., Livet, J., 2000 : Systèmes drainants à risque hivernal réduit. Site expérimental de la RN 420. Dossier 19996446. Juin 2000. 112p.
- Paumier, J.L., Arnal, M., 1998 : Expérimentation Préviroute sur l'autoroute A75 dans le Cantal. *Revue générale des routes et des aérodromes*, **758**, 44-51

- Peters-Lidard, C.D., Blackburn, E., Liang, X., Wood, E. F., 1998 : The effect of soil thermal conductivity parameterization on surface energy fluxes and temperatures. *J. Atmos. Sci.*, **55**(7), 1209-1224.
- Pilli-Sihvola, Y., Lähesmaa, J., 2004 : Projected state of road weather monitoring in Finland in 2007. *Proceedings of the 6th International Symposium on Snow Removal and Ice Control Technology, 7-9 juin 2004, Washington, U.S.A*
- Pisano, P.A., Stern, A.D., Mahoney, W.P., 2004 : The U.S. Federal Highway Administration Winter Maintenance Decision Support System (MDSS) Project. *Proceedings of the 12th SIRWEC Conference, 16-18 juin 2004, Bingen, Allemagne.*
- Pitman, A.J., Yang, Z.L., Cogley, J.G., Henderson-Sellers, 1991 :Description of bare essentials of surface transfer for the bureau of meteorology research centre AGCM. *BMRC Research Report No32.*
- Pitre, R., Muzet, V., Livet, J., 2003 : Campagne GELCRO 2001/2002, Action des fondants sur l'interface neige/revêtement. Rapport LCPC
- Pitre, R., Muzet, V., Livet, J., 2002 : Campagne GELCRO 2000/2001, Influence du compactage de la neige. Rapport LCPC
- Prusa, J. M., 2002 : Conceptual and Scaling Evaluation of Vehicle Traffic Thermal Effects on Snow/Ice-Covered Roads. *J. Appl. Meteor.*, **41**, 1225-1240.Rayer, P.J., 1987 : The meteorological office forecast road surface temperature model. *Meteor. Mag.*, **116**, 180-191.
- Raatz, W., Niebrügge, L., 2002 : Road weather forecasts for a winter road maintenance information center. *Proceedings of the 11th SIRWEC Conference, 2002, Sapporo, Japan.*
- Rohn, M., Raatz, W.E., 2004 : Providing an optimized dataset for road weather forecasts. *Proceedings of the 12th SIRWEC Conference, 16-18 juin 2004, Bingen, Allemagne.*
- Rousseau, D., 1980: A new skill score for the evaluation of yes/no forecast. *WMO symposium on probabilistic and statistical methods in weather forecasting, September 1980, Nice, France*
- Sass, B.H., 1992 : A numerical model for prediction of road temperature and ice. *J. Appl. Meteor.*, **31**, 1499-1506.
- Sass, B.H., 1997 : A numerical forecasting system for the prediction of slippery roads. *J. Appl. Meteor.*, **36**, 801-817.
- Sergent, C., Pougatch, E., Sudul, M., Boudelles, B, 1993 : Experimental investigation of optical snow properties. *Ann. Glaciol.* , **17**, 281-287
- Shao, J., 1990 : A winter road surface temperature prediction model with comparison to others. PhD thesis, The University of Birmingham, 245 pp.

- Shao, J., Lister, P.J., Mc Donald, A., 1994 : A surface-temperature prediction model for porous asphalt pavement and its validation. *Met. Apps.*, **1**, 129-134
- Shao, J., Lister, J., 1995 : The prediction of road surface state and simulation of the shading effect. *Bound.-Layer Meteor.*, **73**, 411-419
- Shao, J., Lister, J., 1996 : An automated nowcasting model of road surface temperature and state for winter road maintenance. *J. Appl. Meteor.*, **35**, 1352-1361.
- Shao, J., 1999 : Fuzzy categorization of weather conditions for thermal mapping. *J. Appl. Meteor.*, **39**, 1784-1790.
- Snow & Ice Databook, 2006. Rapport du comité technique de l'association mondiale de la route (AIPCR) sur la viabilité hivernale.
- Speth, B., Muzet, V., 2000 : Analyse des épisodes neigeux à partir du CD-ROM GELCRO sur les différents types de chaussées du Col de Porte. Campagnes hivernales 97/98 et 98/99. Rapport LCPC
- Sun, S., Jin, J., Xue, Y., 1999 : A simple snow-atmosphere-soil transfer (SAST) model. *J. Geophys. Res.*, **104**, 19579-19587
- Takle, E. S., 1990 : Bridge and roadway frost : occurrence and prediction by use of an expert system. *J. Appl. Meteor.*, **29**, 727-734.
- Thornes, J.E., 1984 : The prediction of ice formation on motorways. PhD thesis, University College, London, 392 pp.
- Thornes, J.E., Cavan, G., Chapman, L., 2004 : The use of GIS and Icemiser to predict winter road surface temperatures in Poland. *Proceedings of the 12th SIRWEC Conference, 16-18 juin 2004, Bingen, Allemagne*.
- Vaa, T, 2004 : Implementation of a new sanding method in Norway. *Proceedings of the 6th International Symposium on Snow Removal and Ice Control Technology, 7-9 juin 2004, Washington, U.S.A*
- Vaa, T, 2006 : Implementation of the new sanding method in Norway. *Proceedings of the 12th International Winter Road Congres, 27-30 mars 2006, Torino, Italie*.
- Verseghy, D.L., 1991 : CLASS – A Canadian land surface scheme for GCMs – I. Soil Model. *Int. J. Climatol.*, **11**, 111-133
- Wallman, C.G., 2004 : The winter model : a winter maintenance management system. *Proceedings of the 6th International Symposium on Snow Removal and Ice Control Technology, 7-9 juin 2004, Washington, U.S.A*
- Yahia, J.C., 2006 : Validation d'un modèle physique de prévision de la température de surface du revêtement de la chaussée. *Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand*.

Yamagiwa, Y., Kajiya, Y., Uemura, T. , 2004 : Development of an advanced winter road management support system for Greater Sapporo. *Proceedings of the 6th International Symposium on Snow Removal and Ice Control Technology, 7-9 juin 2004, Washington, U.S.A*

Yen, Y.C., 1981 : Review of thermal properties of snow, ice and sea ice. *CRREL Report.*, 81-10