

Université du Québec  
INRS-Eau

Modélisation et suivi complet du couvert nival, sur le sous-bassin LG4 de la rivière  
La Grande, à l'aide du modèle français CROCUS

Par

Stéphane Savary

Mémoire présenté  
pour l'obtention  
du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)  
en science de l'eau

Jury d'évaluation

Président du jury  
et examinateur interne

Eric Martin  
Centre d'étude de la neige  
Météo-France

Examineur externe

Ross Brown  
Service Météorologique du Canada  
Environnement Canada

Directeur de recherche

Jean-Pierre Fortin  
Université du Québec  
INRS-ETE

Codirectrice de recherche

Monique Bernier  
Université du Québec  
INRS-ETE

© droits réservés de Stéphane Savary

## DÉDICACES

*À mes parents et amis,  
pour leur support de tous les jours tout au long de cette aventure.  
Sans eux ce mémoire n'aurait pu exister.*

## REMERCIEMENTS

Je tiens, en premier lieu, à remercier mon directeur ainsi que ma codirectrice de recherche, M. Jean-Pierre Fortin et Mme Monique Bernier, pour le support professionnel, leur disponibilité et l'aide précieuse qu'ils ont su m'accorder et sans quoi la réalisation de ce mémoire n'aurait pu être possible.

J'aimerais également remercier messieurs Yves Gauthier et Alain Royer, respectivement agent de recherche et informaticien à l'INRS-ETE, pour leur aide et leurs conseils qui m'ont permis de mener à bien ce travail de recherche.

Je tiens également à remercier Hydro-Québec, plus précisément, Mme Marie-Josée Doray, pour son apport technique au projet et essentiel à sa réalisation.

Je désire aussi remercier monsieur Eric Martin d'avoir autorisé l'utilisation du modèle CROCUS et accepté de faire parti de mon jury d'évaluation. Mes remerciements vont aussi à monsieur Ross Brown d'avoir accepté de faire parti de mon jury d'évaluation.

Je souhaite remercier l'INRS-ETE, l'institution qui m'a accueilli, m'a offert un service appréciable, m'a apporté un support financier et au sein de laquelle j'ai pu approfondir ma démarche scientifique.

J'aimerais aussi remercier mes parents et amis qui m'ont supporté tout au long de cette aventure.

Ces remerciements seraient incomplets si j'omettais de mentionner la grande contribution financière de la fondation FCAR. Sans leur bourse d'études et l'argent offert par l'INRS-ETE, il m'aurait été grandement difficile de me consacrer entièrement à mon projet.

## RÉSUMÉ

Au Québec, l'accumulation de la neige au sol prend une grande importance dans bon nombre d'activités humaines. Par exemple, construction d'ouvrages d'art permettant la régularisation des débits des cours d'eau et la constitution de réservoirs servant à la production d'hydroélectricité doit aussi tenir compte des apports provenant de la fonte de la neige. Face à cette importance de la neige, il devient fort intéressant de faire appel à des outils de modélisation dans le but de faire le suivi du manteau neigeux par la simulation des différents processus physiques agissant sur le couvert nival.

En ce sens, la présente recherche vise à procéder à la simulation du couvert nival sur le sous-bassin LG4 de la rivière La Grande puisque la connaissance de l'évolution du processus de fonte du couvert nival est essentielle à la prévision d'écoulement contribuant à la recharge des réservoirs d'emménagement des grands barrages du Nord du Québec.

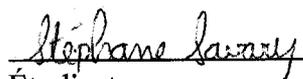
Plus précisément, la présente recherche vise à utiliser et à adapter aux conditions environnementales du Nord du Québec, le modèle français multicouches CROCUS de suivi et de fonte du couvert nival. Le choix du modèle réside dans le fait que CROCUS a été développé pour prendre en compte la plupart des phénomènes affectant l'évolution du couvert de neige. De plus, ce modèle présente bon nombre de coefficients empiriques pouvant être ajustés aux conditions environnementales du Nord du Québec.

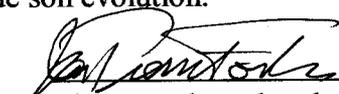
Le choix du site d'étude s'accorde avec la présence de stations d'acquisition de données sur le couvert nival et la disponibilité d'un large éventail de données météorologiques essentielles aux modélisations.

Préalablement aux modélisations, les données météorologiques ont été soumises à un prétraitement visant leur correction et leur mise en forme face aux exigences du modèle.

Suite au prétraitement des données d'entrée, le modèle CROCUS a pu être utilisé dans le but de reproduire les profils de densité et de température du couvert neige ainsi que son évolution. Afin d'améliorer les résultats obtenus, le modèle CROCUS a été ajusté aux conditions météorologiques du secteur d'étude par l'intermédiaire de certains paramètres ou calculs. Cet ajustement prend place dans : le tassement de la neige, le calcul de la densité de la neige fraîche, la fonte printanière, les précipitations, le calcul du rayonnement infrarouge

Finalement, le modèle a pu être vérifié sur l'ensemble des stations d'acquisition de données sur le couvert nival au cours de trois périodes hivernales. La qualité des modélisations suite à l'ajustement du modèle CROCUS démontre clairement son aptitude à la réalisation de simulation sur le sous-bassin LG4 dans le but de reproduire les profils de température et de densité du couvert de neige ainsi que son évolution.

  
Étudiant

  
Directeur de recherche

# TABLE DES MATIÈRES

<b>DÉDICACES.....</b>	<b>III</b>
<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>V</b>
<b>RÉSUMÉ.....</b>	<b>VII</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES.....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>XVII</b>
<b>1 INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
1.1 PROBLÉMATIQUE .....	1
1.2 OBJECTIFS DE LA RECHERCHE .....	4
1.3 PRÉSENTATION DE LA RECHERCHE.....	5
<b>2 CONCEPTS THÉORIQUES.....</b>	<b>7</b>
2.1 PRÉSENTATION DE CERTAINS MODÈLES.....	7
2.2 PRÉSENTATION DU MODÈLE CROCUS.....	11
2.2.1 Bilan massique et énergétique du couvert de neige utilisé par CROCUS .....	14
2.2.2 Solutions numériques du modèle CROCUS .....	20
2.2.3 Paramètres et équations d'ajustement du modèle CROCUS .....	23
2.2.3.1 Le tassement de la neige.....	23
2.2.3.2 Le calcul de la densité de la neige fraîche .....	25
2.2.3.3 Les transferts convectifs de chaleur sensible à l'interface neige-air ou flux turbulents.....	28
2.2.3.4 Ajustement des précipitations.....	29
2.2.3.5 Le calcul du rayonnement infrarouge.....	29
2.2.3.6 L'influence de la végétation sur le rayonnement infrarouge, solaire direct et diffus incident.....	30
<b>3 DESCRIPTION DU SECTEUR D'ÉTUDE ET DES DONNÉES.....</b>	<b>33</b>
3.1 LE SECTEUR D'ÉTUDE .....	33
3.1.1 Description et caractéristiques des stations .....	35
3.2 DESCRIPTION DES DONNÉES.....	39
3.2.1 Données de modélisation.....	40
3.2.2 Données de vérification.....	42
<b>4 ADAPTATION DU MODÈLE CROCUS À L'ENVIRONNEMENT WINDOWS.....</b>	<b>45</b>
<b>5 PRÉTRAITEMENT DES DONNÉES ET MÉTHODOLOGIE.....</b>	<b>47</b>
5.1 PRÉTRAITEMENT DES DONNÉES DE TEMPÉRATURE .....	47
5.2 PRÉTRAITEMENT DES DONNÉES DE PRÉCIPITATIONS.....	52
5.3 MISE EN FORME DES DONNÉES ET CORRECTION DES PRÉCIPITATIONS .....	58
<b>6 ÉTALONNAGE DU MODÈLE CROCUS ET AJUSTEMENT DES DONNÉES D'ENTRÉE.....</b>	<b>63</b>
6.1 INFLUENCE DE LA CORRECTION DES PRÉCIPITATIONS SUR LES MODÉLISATIONS.....	63
6.2 ANALYSE DES RÉSULTATS INITIAUX.....	68
6.3 ÉTALONNAGE DU MODÈLE CROCUS.....	70

6.3.1	Ajustement du tassement.....	71
6.3.2	Ajustement du calcul de la densité de la neige fraîche.....	77
6.3.3	Ajustement de la fonte printanière.....	82
6.3.4	Ajustement régional des précipitations.....	86
6.3.5	Étude et correction de la température du couvert de neige.....	92
6.3.5.1	Modifications du calcul du rayonnement infrarouge.....	98
6.3.5.2	Intégration de la végétation dans le calcul du rayonnement infrarouge.....	102
<b>7</b>	<b>VÉRIFICATION DU MODÈLE CROCUS.....</b>	<b>115</b>
7.1	PÉRIODE ALLANT DU 1 SEPTEMBRE 1997 AU 31 MAI 1998.....	115
7.1.1	Modélisation à la station Hydro-Québec 02s.....	115
7.1.2	Modélisation à la station Hydro-Québec 11e.....	120
7.1.3	Modélisation à la station Hydro-Québec 19e.....	125
7.2	PÉRIODE ALLANT DU 1 SEPTEMBRE 1998 AU 31 MAI 1999.....	130
7.2.1	Modélisation à la station Hydro-Québec 02s.....	130
7.2.2	Modélisation à la station Hydro-Québec 11e.....	136
7.3	PÉRIODE ALLANT DU 1 SEPTEMBRE 1999 AU 31 MAI 2000.....	138
7.3.1	Modélisation à la station Hydro-Québec 02s.....	138
7.4	SYNTHÈSE DES RÉSULTATS.....	144
<b>8</b>	<b>CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....</b>	<b>145</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>149</b>
	<b>ANNEXE 1.....</b>	<b>155</b>
	<b>DÉTAIL DES DONNÉES D'ENTRÉE ET DE SORTIE DU MODÈLE CROCUS.....</b>	<b>155</b>
	<b>ANNEXE 2.....</b>	<b>163</b>
	<b>GRAPHIQUES DES TEMPÉRATURES MOYENNES JOURNALIÈRES.....</b>	<b>163</b>
	<b>ANNEXE 3.....</b>	<b>167</b>
	<b>GRAPHIQUES DES TEMPÉRATURES MOYENNES JOURNALIÈRES CORRIGÉES.....</b>	<b>167</b>
	<b>ANNEXE 4.....</b>	<b>171</b>
	<b>GRAPHIQUES RELATIFS AUX PRÉCIPITATIONS TOTALES JOURNALIÈRES.....</b>	<b>171</b>
	<b>ANNEXE 5.....</b>	<b>185</b>
	<b>LISTE DES CODES DE PRÉCIPITATIONS AINSI QUE LEURS PHASES ET POIDS RESPECTIFS.....</b>	<b>185</b>
	<b>ANNEXE 6.....</b>	<b>189</b>
	<b>TEXTE ET CODE DU PROGRAMME UTILITAIRE À LA CRÉATION DU FICHIER MET.....</b>	<b>189</b>
	<b>ANNEXE 7.....</b>	<b>211</b>
	<b>RÉSULTATS INITIAUX OBTENUS À L'AIDE DU MODÈLE CROCUS.....</b>	<b>211</b>

## LISTE DES FIGURES

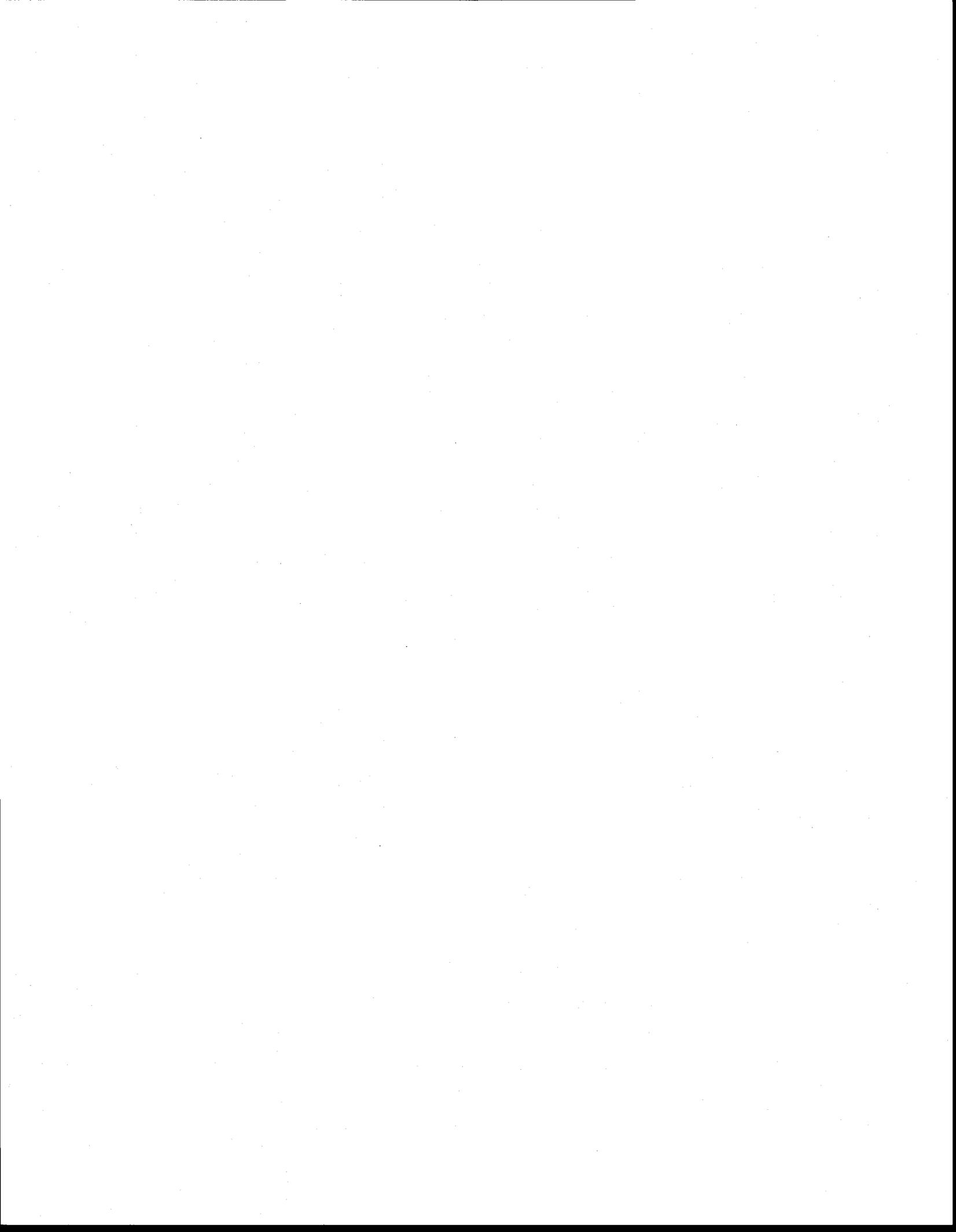
Figure 2.1 Processus physiques affectant l'évolution du couvert de neige pris en compte par le modèle CROCUS .....	14
Figure 2.2 Représentation graphique du calcul original de la densité de la neige fraîche effectué par CROCUS en fonction de la température et du vent.....	27
Figure 3.1 Localisation du site d'étude .....	35
Figure 3.2 Exemple d'une station de données sur le profil du couvert nival et d'un profil de températures à l'intérieur du couvert de neige.....	36
Figure 5.1 Températures moyennes journalières originales aux stations Hydro-Québec 02s, 11e, 19e et YAH pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998 .....	48
Figure 5.2 Températures moyennes journalières corrigées aux stations Hydro-Québec 02s, 11e, 19e et YAH pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998 .....	52
Figure 5.3 Précipitations totales journalières à la station LG4-Sud pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998 .....	53
Figure 5.4 Précipitations totales journalières à la station YAH pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998 .....	54
Figure 5.5 Intercomparaison des précipitations totales journalières entre les stations LG4-Sud et YAH pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1999 .....	54
Figure 5.6 Intercomparaison des précipitations totales journalières entre les stations LG4-Sud et YAH pour la période allant du 1 septembre 1998 au 31 mai 1999 .....	55
Figure 5.7 Précipitations cumulées pour les stations LG4-Sud et YAH pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998 .....	55
Figure 5.8 Précipitations cumulées pour les stations LG4-Sud et YAH pour la période allant du 1 septembre 1998 au 31 mai 1999 .....	56
Figure 6.1 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 02s après correction des précipitations.....	64
Figure 6.2 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 02s après correction des précipitations.....	65
Figure 6.3 Profil de densité modélisée et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 3 février 1998.....	66
Figure 6.4 Profil de températures modélisées et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date du 3 février 1998.....	66
Figure 6.5 Profil de densité modélisée et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 18 mars 1998 .....	67
Figure 6.6 Profil de températures modélisées et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date du 18 mars 1998.....	67
Figure 6.7 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 02s après l'intégration dans CROCUS de l'équation de tassement utilisée par SNTHRM.....	73

Figure 6.8 Évolution l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 02s après l'intégration dans CROCUS de l'équation de tassement utilisée par SNTHRM.....	73
Figure 6.9 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 02s après ajustement du tassement dans le modèle CROCUS .....	75
Figure 6.10 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 02s après ajustement du tassement dans le modèle CROCUS .....	75
Figure 6.11 Profil de densité modélisée, après ajustement du tassement dans CROCUS, et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 3 février 1998.....	76
Figure 6.12 Profil de densité modélisée, après ajustement du tassement dans CROCUS, et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 18 mars 1998.....	77
Figure 6.13. Représentation graphique du calcul modifié de la densité de la neige fraîche effectué par CROCUS en fonction de la température et du vent .....	79
Figure 6.14 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 02s après ajustement du calcul de la densité de la neige fraîche dans CROCUS.....	80
Figure 6.15 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 02s après ajustement du calcul de la densité de la neige fraîche dans CROCUS.....	80
Figure 6.16 Profil de densité modélisée, après ajustement du calcul de la densité de la neige fraîche dans CROCUS, et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 3 février 1998 .....	81
Figure 6.17 Profil de densité modélisée, après ajustement du calcul de la densité de la neige fraîche dans CROCUS, et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 18 mars 1998 .....	81
Figure 6.18 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 02s après ajustement des flux turbulents.....	84
Figure 6.19 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 02s après l'ajustement des flux turbulents.....	85
Figure 6.20 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 02s après l'ajustement régional des précipitations .....	88
Figure 6.21 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 02s après l'ajustement régional des précipitations .....	88
Figure 6.22 Profil de densité modélisée, après ajustement intermédiaire du modèle CROCUS, et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 02 février.....	90
Figure 6.23 Profil de températures modélisées, après ajustement intermédiaire du modèle CROCUS, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date du 03 février.....	90
Figure 6.24 Profil de densité modélisée, après ajustement intermédiaire du modèle CROCUS, et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 18 mars 1998.....	91
Figure 6.25 Profil de températures modélisées, après ajustement intermédiaire du modèle CROCUS, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date du 18 mars 1998 .....	91
Figure 6.26. Évolution hebdomadaire de la température extérieure mesurée et de celles modélisées en surface et à 5cm sous la surface du couvert de neige à la station Hydro-Québec 02s entre le 8 décembre 1998 et le 13 avril 1999 .....	94
Figure 6.27 Évolution journalière de la température extérieure mesurée et de celles modélisées en surface et à 5cm sous la surface du couvert de neige à la station Hydro-Québec 02s entre le 09 et le 23 février 1999 .....	94

Figure 6.28 Évolution horaire de la température extérieure mesurée et modélisée à la surface du couvert de neige à la station Hydro-Québec 02s entre 10 février 1999 à 06H00 et le 12 février 1999 à 06H00.....	95
Figure 6.29 Évolution horaire de la température mesurée et modélisée à 5cm sous la surface du couvert de neige à la station Hydro-Québec 02s entre 10 février 1999 à 06H00 et le 12 février 1999 à 06H00.....	95
Figure 6.30 Données d'entrée de rayonnement et de nébulosité à la station Hydro-Québec 02s pour la période d'étude des températures des couches supérieures de neige comprise entre le 10 février 1999 à 06H00 et le 12 février 1999 à 06H00.....	96
Figure 6.31 Données d'entrée de précipitations à la station Hydro-Québec 02s pour la période d'étude des températures des couches supérieures de neige comprise entre le 10 février 1999 à 06H00 et le 12 février 1999 à 06H00.....	97
Figure 6.32 Comparaison des rayonnements infrarouge descendants (IR) calculés à l'aide des méthodes de Berlianda (Berl) et de Satterlund (Satt) pour un ciel clair et des températures comprises entre -50°C et 0°C .....	100
Figure 6.33 Comparaison des rayonnements infrarouge descendants (IR) calculés à l'aide des méthodes de Berlianda (Berl) et de Satterlund (Satt) pour un ciel couvert et des températures comprises entre -50°C et 0°C .....	101
Figure 6.34 Données d'entrée de rayonnement infrarouge modifié et de nébulosité à la station Hydro-Québec 02s pour la période d'étude des températures des couches supérieures de neige.....	104
Figure 6.35 Évolution horaire de la température extérieure mesurée et modélisée à la surface du couvert de neige à la station Hydro-Québec 02s après ajustement du rayonnement infrarouge incident à la surface du couvert de neige.....	105
Figure 6.36 Évolution horaire de la température extérieure mesurée et modélisée à 5cm sous la surface du couvert de neige à la station Hydro-Québec 02s après ajustement du rayonnement infrarouge incident à la surface du couvert de neige.....	106
Figure 6.37 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 02s après l'ajustement du rayonnement infrarouge incident à la surface du couvert de neige .....	107
Figure 6.38 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 02s après l'ajustement du rayonnement infrarouge incident à la surface du couvert de neige.....	107
Figure 6.39 Profil de températures modélisées, après ajustement du rayonnement infrarouge, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date 03 février 1998 .....	108
Figure 6.40 Profil de températures modélisées, après ajustement du rayonnement infrarouge, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date 26 janvier 1999.....	108
Figure 6.41 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 02s après l'ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée .....	110
Figure 6.42 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 02s après l'ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée .....	110
Figure 6.43 Profil de densité modélisée, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date du 03 février 1998 .....	111
Figure 6.44 Profil de températures modélisées, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date 03 février 1998.....	111

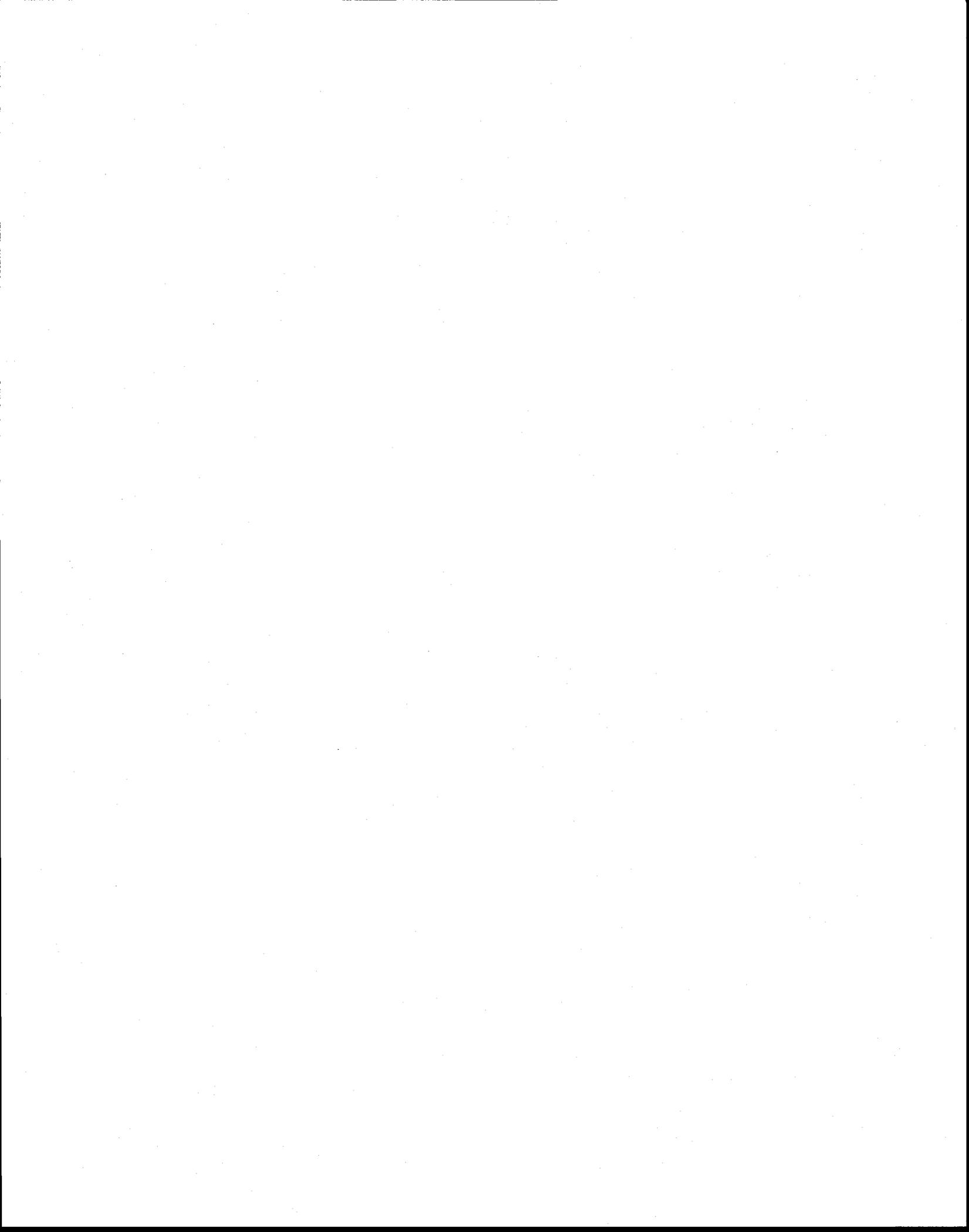
Figure 6.45 Profil de densité modélisée, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date du 18 mars 1998.....	112
Figure 6.46 Profil de températures modélisées, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date 18 mars 1998 .....	112
Figure 7.1 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 02s après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998.....	116
Figure 7.2 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 02s après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998.....	116
Figure 7.3 Profil de densité modélisée, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 03 février 1998.....	118
Figure 7.4 Profil de températures modélisées, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date du 03 février 1998.....	119
Figure 7.5 Profil de densité modélisée, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 18 mars 1998.....	119
Figure 7.6 Profil de températures modélisées, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date du 18 mars 1998.....	120
Figure 7.7 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 11e après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998.....	121
Figure 7.8 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 11e après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998.....	121
Figure 7.9 Profil de densité modélisée, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurée à la station Hydro-Québec 11e en date du 04 février 1998.....	123
Figure 7.10 Profil de températures modélisées, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurées à la station Hydro-Québec 11e en date du 04 février 1998.....	124
Figure 7.11 Profil de densité modélisée, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurée à la station Hydro-Québec 11e en date du 17 mars 1998 .....	124
Figure 7.12 Profil de températures modélisées, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurées à la station Hydro-Québec 11e en date du 17 mars 1998 .....	125
Figure 7.13 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 19e après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998.....	126
Figure 7.14 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 19e après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998.....	126
Figure 7.15 Profil de densité modélisée, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurée à la station Hydro-Québec 19e en date du 02 février 1998.....	128
Figure 7.16 Profil de températures modélisées, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurées à la station Hydro-Québec 19e en date du 02 février 1998.....	128

Figure 7.17 Profil de densité modélisée, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurée à la station Hydro-Québec 19e en date du 16 mars 1998 .....	129
Figure 7.18 Profil de températures modélisées, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurées à la station Hydro-Québec 19e en date du 16 mars 1998.....	129
Figure 7.19 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 02s après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée pour la période allant du 1 septembre 1998 au 31 mai 1999.....	131
Figure 7.20 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 02s après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée pour la période allant du 1 septembre 1998 au 31 mai 1999.....	132
Figure 7.21 Profil de densité modélisée, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 26 janvier 1999.....	134
Figure 7.22 Profil de températures modélisées, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date du 26 janvier 1999.....	134
Figure 7.23 Profil de densité modélisée, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 09 mars 1999.....	135
Figure 7.24 Profil de températures modélisées, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date du 09 mars 1999.....	135
Figure 7.25 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 11e après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée pour la période allant du 1 septembre 1998 au 31 mai 1999.....	137
Figure 7.26 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 11e après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée pour la période allant du 1 septembre 1998 au 31 mai 1999.....	137
Figure 7.27 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 02s après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée pour la période allant du 1 septembre 1999 au 31 mai 2000.....	139
Figure 7.28 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 02s après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée pour la période allant du 1 septembre 1999 au 31 mai 2000.....	140
Figure 7.29 Profil de densité modélisée, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 01 février 2000 .....	141
Figure 7.30 Profil de températures modélisées, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date du 01 février 2000 .....	142
Figure 7.31 Profil de densité modélisée, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 21 mars 2000.....	142
Figure 7.32 Profil de températures modélisées, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date du 21 mars 2000.....	143



## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 Exemple des données fournies par la station YAH.....	40
Tableau 3.2 Exemple de mesures de précipitations fournies par différentes stations .....	41
Tableau 3.3 Exemple de mesures de températures de l'air fournies par différentes stations .....	42
Tableau 3.4 Exemple de mesures d'épaisseur de neige fournies par différentes stations .....	43
Tableau 6.1 Valeurs finales du coefficient VRR3 aux différentes stations et périodes de modélisations .....	89
Tableau 6.2 Valeurs de paramètre de Bolz (a) pour b égale à 2 pour différents types de couverts nuageux d'après Bolz (1949).....	100
Tableau 6.3 Valeurs de couverture de la voûte céleste par la canopée de la végétation aux stations Hydro-Québec 02s, 11e et 19e.....	104
Tableau 7.1 Synthèse des résultats en fonction de l'erreur absolue moyenne entre les paramètres modélisés et mesurés aux différentes stations.....	144



# **1 INTRODUCTION**

---

## **1.1 Problématique**

Il est clairement reconnu que, dans plusieurs pays du globe, le climat comporte une période plus froide durant laquelle la température s'abaisse sous le point de congélation (0°C) et s'y maintient de quelques jours à plusieurs mois. Les précipitations y tombent alors sous forme de neige et s'accumulent au sol pour former le couvert nival. Le pourcentage de précipitations tombant sous forme de neige en un lieu donné varie selon la latitude et l'altitude du lieu, passant de 0% à presque 100%. Au Québec, ce pourcentage varie de 20%, dans les régions du sud du Québec (45°N), à plus de 55% dans le nord (62°N) (Goodison et McKay, 1978).

Le couvert de neige ainsi formé et grandement influencé par les conditions météorologiques, constitue une composante importante du système climatique terrestre de par son influence sur celui-ci en raison de ses propriétés physiques et de son évolution spatio-temporelle. (Brun *et al.*, 1994).

L'accumulation de la neige au sol prend aussi une grande importance dans bon nombre d'activités humaines qui sont entre autres la localisation et le dessin des routes, la construction des édifices, les transports, le tourisme, l'agriculture et bien d'autres. Il est également essentiel de mentionner que la construction d'ouvrages d'art permettant la régularisation des débits des cours d'eau et la constitution de réservoirs servant à la production d'hydroélectricité doit aussi tenir compte des apports provenant de la fonte de la neige. En ce sens, on retrouve bon nombre de régions du globe où l'écoulement annuel provient, dans une proportion importante, de la fonte des neiges.

En somme, le couvert de neige est, dans certaines régions, d'une importance capitale pour beaucoup de domaines comme l'économie, l'écologie et l'hydrologie (Martin *et al.*, 1997).

Face à cette importance de la neige et du couvert résultant de son accumulation, des outils de modélisation ont été développés à différentes fins allant de la fonte du couvert au suivi presque complet de son évolution spatiale et temporelle. De tels outils ont permis de faire un grand pas dans le suivi opérationnel du manteau neigeux par la simulation des différents processus physiques agissant sur le couvert nival. Bien que certaines faiblesses persistent, l'intérêt de la modélisation est évident car elle permet de donner une vision globale et assez réaliste de l'état du manteau neigeux et ce, même dans des zones plus éloignées et plus pauvres en données.

Depuis un bon nombre d'années, les modèles de simulation développés ont été utilisés pour une large gamme d'applications allant de la prévision des crues et avalanches à la simulation à long terme des changements climatiques (Essery *et al.*, 1999).

Au Québec, l'utilisation et le développement de tels modèles se sont grandement concentrés sur le suivi de l'évolution spatiale et temporelle à la fois du couvert nival et de la fonte des neiges comme ressource hydrique contribuant au cycle hydrologique de nombreux bassins versants. Ces mêmes simulations ont été réalisées à l'aide de modèles comme CEQUEAU, développé par Morin *et al.* (1981) à l'INRS-Eau ou encore HYDROTEL, développé par Fortin *et al.* (1995) également à l'INRS-Eau.

À la lumière de telles utilisations ainsi que de l'importance précédemment exposée du couvert nival sur la production hydroélectrique, qui constitue la source d'énergie la plus importante au Québec, il devient alors intéressant de procéder au suivi complet du couvert nival de la région hydrographique du Nord du Québec. La présente recherche vise ainsi à procéder à la simulation du couvert nival sur le sous-bassin LG4 de la rivière La Grande puisque la connaissance de l'évolution du processus de fonte du couvert nival est essentielle à la préparation de prévisions d'écoulement contribuant à la recharge des réservoirs d'emmagasinement des grands barrages du Nord du Québec.

Pour réaliser une telle simulation, différents outils sont à notre disposition. Ainsi la présente recherche vise à utiliser et à adapter aux conditions environnementales du Québec, un modèle multicouches de suivi et de fonte du couvert simulant la plupart des processus internes du manteau neigeux.

De plus, le modèle retenu sera susceptible de contribuer à l'amélioration d'autres outils utilisés pour des buts similaires puisqu'il permettra une simulation pratiquement complète des phénomènes régissant l'évolution du couvert de neige. Ainsi, cette recherche vise aussi à contribuer aux modèles HYDROTEL, précédemment mentionné, et EQeau développé conjointement par l'INRS-Eau, Hydro-Québec et VIASAT Géo-Technologie. Plus précisément, en fonction des caractéristiques des deux modèles mentionnés, ces contributions peuvent être décrites de la façon suivante :

1. HYDROTEL est un modèle complet voué aux simulations et prévisions hydrologiques (Fortin *et al.*, 1989). Par conséquent, le modèle intègre la simulation du couvert de neige. Toutefois, contrairement au modèle multicouches, HYDROTEL utilise une seule couche pour représenter le couvert de neige. Ainsi, d'après la qualité des simulations effectuées dans le cadre de cette étude, l'utilisation d'un modèle multicouche pourrait inciter la transformation d'HYDROTEL en un modèle similaire pour certaines applications ou encore contribuer à améliorer les simulations unicouches actuelles.
2. EQeau est, quant à lui, un modèle d'estimation de l'équivalent en eau de la neige à l'aide de l'imagerie RADARSAT. Ce modèle utilise entre autres, la densité moyenne de la neige comme paramètre d'entrée. Celle-ci permet de relier la résistance thermique apparente du couvert de neige issue des images RADARSAT, à l'équivalent en eau du couvert de neige (Bernier et Gauthier, 2000). Comme des profils de densités aideraient à fournir de meilleurs résultats que des densités moyennes, le modèle retenu pourrait être jumelé à EQeau

puisqu'il nous permettrait d'obtenir en continu un profil de densité du couvert nival pouvant contribuer au calcul de l'équivalent en eau.

## 1.2 Objectifs de la recherche

L'INRS-Eau s'affaire depuis bon nombre d'années au suivi du couvert nival sur certains sous-bassins de la rivière La Grande à l'aide de différents outils. Ainsi, le couvert de neige annuel présent sur le sous-bassin LG4 de cette même rivière a fait l'objet de nombreuses campagnes de terrain et d'études visant à caractériser et à cartographier son couvert nival. Hydro-Québec possède, d'ailleurs, dans cette région, trois stations automatisées permettant la récolte de données sur le manteau neigeux. Dans un même ordre d'idées, Hydro-Québec procède également à des campagnes sur le terrain, tout en disposant de stations météorologiques récoltant différentes données pouvant contribuer à la fois, au suivi du couvert nival ainsi qu'à la connaissance des conditions météorologiques.

Les efforts mis en œuvre ainsi que les outils développés visent l'atteinte d'un objectif commun qui est le suivi du couvert nival sur cette région hydrographique où, tel que mentionné, la recharge des réservoirs d'emménagement est en grande partie attribuable à la fonte du couvert de neige. La présente recherche emprunte également cette voie.

Deux points importants ont motivé cette recherche. Premièrement, le suivi détaillé du couvert de neige présent sur cette région est d'une grande importance en raison de la production d'hydroélectricité. Deuxièmement, l'opportunité d'utiliser un nouvel outil de modélisation pouvant contribuer au suivi du couvert nival et à l'amélioration d'autres modèles existants.

Dans cette optique, l'objectif général visé dans cette recherche est d'utiliser et d'adapter aux conditions environnementales du Québec, un modèle multicouches de suivi et de fonte du couvert nival.

---

Plus spécifiquement, les objectifs sont les suivants :

1. La compréhension du modèle retenu, tant dans son mode de fonctionnement que dans les processus physiques qu'il simule.
2. L'adaptation au besoin du modèle à l'environnement Windows sur micro-ordinateur.
3. L'obtention des données nécessaires au modèle pour procéder à la modélisation du couvert de neige.
4. La conception de programmes utilitaires permettant la constitution des fichiers de données, exigés par le modèle.
5. La réalisation de simulations sur le sous-bassin LG4 à l'aide du modèle choisi dans le but de reproduire le profil de température et de densité du couvert nival ainsi que son évolution.

### **1.3 Présentation de la recherche**

Ce mémoire de recherche comporte quatre sections. Dans une première section, le contexte théorique relatif à la modélisation du couvert nival et la présentation plus élaborée du modèle de suivi du couvert nival seront abordés. Une description du site d'étude, des données de terrain et des stations d'échantillonnage et de prise de ces mêmes données sera, par la suite, présentée. Suivra ensuite, la méthodologie utilisée et les différentes étapes réalisées conduisant à la modélisation du couvert nival aux différentes stations afin de représenter certaines caractéristiques précises de ce même couvert. Les résultats obtenus suite à la modélisation, en comparaison avec les données prises à certaines stations, permettront d'évaluer la pertinence du modèle ainsi que sa précision. Finalement, en présence d'un bon suivi du couvert par le modèle, il deviendra intéressant

6 Modélisation et suivi complet du couvert nival, sur le sous-bassin LG4  
de la rivière La Grande, à l'aide du modèle français CROCUS

---

de statuer sur l'intégration de certaines particularités avantageuses du modèle retenu à d'autres modèles utilisés à des fins similaires à l'INRS-Eau.

## **2 CONCEPTS THÉORIQUES**

---

L'équilibre mécanique du couvert, à tout instant, est gouverné par les conditions thermiques et morphologiques de ses différentes couches. C'est-à-dire, la température et la présence d'eau liquide, la densité ainsi que le type et la dimension des cristaux de neige. Ces conditions, pour un certain site, sont, à leur tour, gouvernées par les conditions météorologiques locales qui prévalent depuis le début de l'accumulation de neige au sol. Par conséquent, la connaissance des propriétés de la neige a permis le développement de modèles numériques simulant l'évolution énergétique et massique du couvert de neige en fonction des conditions météorologiques passées et présentes (Brun *et al.*, 1989).

De plus, il est clairement établi dans la littérature que la neige a des influences multiples. Ainsi, elle peut, entre autres, augmenter l'albédo d'une surface tout en atténuant sa rugosité, isoler les couches sous-jacentes de sol de par sa faible conductivité thermique ou encore emmagasiner ou relâcher de grandes quantités d'eau (Essery *et al.*, 1999). Face à une telle influence de la neige, il est tout à fait normal de retrouver un nombre considérable de modèles qui sont employés pour une large gamme d'applications allant de la prévision d'avalanches et de crues causées par la fonte des neiges à la simulation à long terme des changements climatiques. Il est alors fort intéressant de présenter quelques-uns de ces modèles et de mettre en évidence leurs applications et leur complexité, tout en évoquant leurs limites respectives.

### **2.1 Présentation de certains modèles**

Tel qu'énoncé, on retrouve dans la littérature plusieurs modèles développés pour diverses applications. Ceux-ci peuvent être de simples modèles de type degrés-jours qui sont amplement utilisés dans la prévision de l'occurrence et du taux de fonte des neiges ou encore des modèles plus sophistiqués permettent le suivi complet du couvert nival.

D'autre part, les modèles de circulation générale de l'atmosphère (GCMs), utilisés à des fins de prévisions météorologiques et de modélisation du climat, font appel à des modèles de suivi du couvert nival, à l'intérieur de leurs schémas d'échanges aux surfaces, pour représenter l'influence du manteau neigeux sur les échanges énergétiques entre la surface du sol et l'atmosphère (Essery *et al.*, 1999). On trouve également des modèles plus sophistiqués qui ont été développés pour permettre l'étude des processus physiques internes du manteau neigeux employés, par exemple, dans la prévision d'avalanches où la connaissance de la structure interne du couvert nival est importante (Brun *et al.*, 1989; Jordan, 1991).

En raison du grand nombre de modèles existants, il devient hautement pertinent de présenter différents modèles pour mieux positionner celui utilisé dans le cadre de cette étude. Par conséquent, l'emploi du modèle CROCUS sera justifié quant à son utilisation et à ses applications. Les modèles les plus fréquemment rencontrés peuvent être scindés en deux groupes en fonction de leurs utilisations.

On retrouve, en premier lieu, un nombre considérable de modèles destinés essentiellement aux prévisions hydrologiques. En effet, la littérature abonde en modèles et équations mathématiques permettant entre autres, l'évaluation de la fonte printanière (Bennis et Brunelle, 1989). On peut citer, par exemple, les modèles suivants:

1. Le modèle de prédiction des crues de ruissellement dues à la fonte des neiges SRM (*Snow Runoff Modeling*) proposé par Martinec (1975).
2. SSARR (*Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation*): Un modèle développé par le Corps d'ingénieurs des États-Unis, Division Pacifique Nord (NPD; *North Pacific Division Corps of Engineers*) pour permettre d'effectuer des simulations hydrologiques portant sur la fonte des neiges utiles au design et à l'opération d'ouvrages d'art touchés par les écoulements en rivières. (Melloh, 1999)

La littérature abonde également en modèles plus complets permettant un suivi plus élaboré du couvert nival qui sont essentiellement basés sur des phénomènes physiques.

On peut citer, entre autres :

1. Le modèle développé par Anderson (1976) qui tient compte de la plupart des processus de transferts d'énergie présents et générés par le couvert de neige tout en les intégrant dans un modèle mathématique. Ce modèle est directement intégré dans bon nombre de systèmes de prévisions plus globaux comme celui du *National Weather Service River Forecast System (NWSRFS)*. Le modèle d'Anderson a également contribué au développement d'autres modèles comme celui proposé par Oblet and Rosse (1977) qui, à son tour, est utilisé dans le *Precipitation Runoff Modelling System* développé par le *U.S. Geological Survey* (Melloh, 1999).
3. UKMO : Ce modèle prend place dans la représentation des processus internes du manteau neigeux utilisée dans le modèle climatique du Centre Hadley (*Hadley Center*) ainsi que dans le modèle de prévisions météorologiques de l'Office Météorologique du Royaume-Uni (*UK Meteorological Office*). Ce dernier demeure un modèle assez simple largement employé dans un bon nombre d'études (Essery *et al.*, 1999).
4. ISBA : Un modèle basé sur des processus physiques développé dans le but d'être utilisé au sein des inter-réactions entre le sol, la biosphère et l'atmosphère que l'on retrouve dans le schéma de surface du modèle global de Météo-France (ARPEGE GCM). Il constitue un modèle des plus sophistiqué en son genre et sera utilisé à l'intérieur de futur modèles climatiques (Essery *et al.*, 1999).
5. INM : Un autre modèle basé sur des processus physiques développé par Fernandez (1998) à l'Institut National de Météorologie (*Instituto Nacional de Meteorologia*) de Madrid, à partir des modèles de Kondo et Yamazaki(1990),

Loth *et al.* (1993) et Tarboton *et al.* (1994). Celui-ci est destiné aux prévisions météorologiques (Essery *et al.*, 1999).

6. BATS : Un modèle utilisé dans le schéma de transfert entre l'atmosphère et la biosphère développé par Dickinson *et al.* (1993). On le retrouve à l'intérieur de modèles généraux de circulation servant à la modélisation de changements climatiques (Yang *et al.*, 1997).
7. SNTHERM : Un modèle unidimensionnel multicouches de suivi du couvert nival développé par Jordan (1991) dans la division recherche du Corps d'ingénieur de l'armée des États-Unis (*U.S. Army Corps of Engineers, Cold Regions Research & Engineering Laboratory*). Ce modèle, basé sur le bilan énergétique du manteau nival permet, entre autres, la prédiction des profils de température des différentes couches de neige ainsi que le suivi complet du couvert nival et ce, pour l'ensemble des conditions météorologiques hivernales (Jordan, 1991). Ce modèle sophistiqué présente l'avantage de prendre en compte la plupart des processus physiques internes du couvert (Melloh *et al.*, 1997).
8. CROCUS : Un modèle unidimensionnel multicouches de suivi du couvert nival développé pour la prévision d'avalanches (Brun *et al.*, 1989; 1992) basé sur les bilans énergétiques et massiques du couvert de neige. Toutefois, contrairement à certains autres modèles qui représentent le couvert de neige comme une couche uniforme, ce dernier utilise jusqu'à 50 couches pour représenter les processus internes du manteau nival et les variations de ses propriétés avec l'augmentation de la profondeur. Ce modèle permet, tout comme SNTHERM, la prédiction des profils de températures des différentes couches de neige ainsi que le suivi complet du couvert nival et ce, pour une large gamme de conditions météorologiques hivernales. Ce modèle sophistiqué présente également l'avantage de prendre en compte la plupart des processus physiques internes du couvert (Brun *et al.*, 1989; 1992).

Bien que ces modèles soient comparables quant aux données qu'ils requièrent, il faut spécifier que les processus décrivant l'évolution du couvert nival peuvent différencier d'un modèle à l'autre.

Face à un nombre aussi impressionnant de modèles, il peut être difficile de choisir le bon simulateur. Pour procéder à un tel choix, il devient primordial d'établir une liste de paramètres déterminants qui permettront de favoriser un modèle précis. Dans le cadre de cette recherche, ces paramètres peuvent se formuler précisément. Premièrement, la disponibilité des modèles ainsi que l'application désirée. Dans le contexte actuel, le désir d'effectuer des simulations sur le sous-bassin LG4 dans le but de reproduire le profil de température et de densité du couvert nival ainsi que son évolution favorise largement les modèles plus complets. De plus, puisque les modèles CROCUS et SNTHERM, tous deux des modèles sophistiqués, sont mis à notre disposition, notre choix est d'autant plus simple. Finalement, le mode de fonctionnement assez simple du modèle CROCUS ainsi que le langage de programmation utilisé pour sa conception ont favorisé ce dernier.

Il est toutefois à noter que le modèle a été originairement conçu pour être utilisé sur une plate-forme UNIX, certaines modifications doivent donc être apportées aux fichiers d'entrée du modèle ainsi qu'au code source pour assurer son fonctionnement dans un environnement Windows sur micro-ordinateur. De plus, les données météorologiques disponibles pour la zone d'étude étant incomplètes en regard de celles exigées par le modèle, certains programmes de calcul sont à concevoir pour permettre les simulations.

## 2.2 Présentation du modèle CROCUS<sup>1</sup>

CROCUS est un modèle de suivi du couvert nival numérique multicouches et unidimensionnel développé pour l'étude de la neige et la prévision du risque d'avalanche. Il diffère des autres modèles développés pour l'hydrologie ou l'étude de la neige par son

---

<sup>1</sup> Cette section s'inspire grandement des articles de Brun *et al.*, 1989 et 1992 ainsi que du Guide d'utilisation du modèle CROCUS (1996).

aptitude à simuler la stratification du manteau neigeux, c'est-à-dire le calcul de l'évolution de la taille et du type de cristaux composant chacune des couches de neige constituant le manteau neigeux. Il est à noter que les cristaux sont décrits selon un formalisme original correspondant à la Classification Internationale de la neige. L'évolution des cristaux se fait par l'intermédiaire d'un ensemble de paramétrisations décrivant l'ensemble des lois de métamorphose : faible, moyen et fort gradient de température pour la neige sèche et métamorphose de neige humide.

Les principaux processus pris en compte dans CROCUS sont les suivants (Brun et Martin, 1997):

1. La diffusion de chaleur par le biais d'un coefficient de conduction effective, fonction de la densité de la neige et de la température, qui prend compte la diffusion de vapeur due au gradient de température;
2. La percolation de l'eau liquide, lorsque la teneur en eau liquide dépasse la valeur en eau de rétention de la neige exprimée en fonction du volume des pores;
3. La fonte et regel dans les couches internes et superficielles du manteau neigeux;
4. Le tassement, en considérant la neige comme un fluide Newtonien de viscosité dépendant de la température, de la densité, du type et de la taille des cristaux de neige;
5. L'absorption du rayonnement solaire en surface et en profondeur en utilisant un albédo et un coefficient d'absorption fonctions de la longueur d'onde (3 bandes spectrales), de la taille et du type de cristaux ainsi que de l'âge des cristaux à la surface (pour représenter l'effet de salissement par dépôt sec ou humide).

CROCUS comprend jusqu'à 50 couches de neige dont le nombre et l'épaisseur varient à chaque pas de temps de façon à accorder couches numériques et couches réelles aussi appelées couches stratigraphiques. Ce modèle a été testé dans des contextes d'utilisation variés sur des échelles locales et régionales et l'on peut considérer qu'il fait partie des modèles les plus validés. Par exemple, à l'échelle locale, la validation a été faite sur le site français du Col de Porte (Chartreuse, 1320m), notamment durant l'hiver 1988-1989. A partir des données météorologiques mesurées sur le site, le modèle a simulé correctement et tout au long de la saison les principales caractéristiques observées du manteau neigeux : hauteur de neige, température de surface, écoulement à la base, profile de température, densité et de teneur en eau liquide ainsi que la stratigraphie (Brun et Martin, 1997).

À l'échelle régionale, la validation a été, entre autres, conduite en simulant 10 années d'évolution du manteau neigeux sur 37 points de mesure répartis dans les Alpes françaises entre 900 et 3000m d'altitude. Dans ce cas, les données météorologiques nécessaires comme données d'entrée à CROCUS furent fournies par le modèle d'analyse météorologique SAFRAN qui utilise toutes les observations météorologiques disponibles dans les Alpes et dans les régions environnantes. Malgré l'incertitude sur ces données, la hauteur de neige simulée par le modèle sans étalonnage local était très satisfaisante sur la plupart des points (Brun et Martin, 1997).

Bien qu'on dénote un nombre considérable d'études faisant appel au modèle CROCUS, son utilisation au Québec et même au Canada demeure restreinte pour ne pas dire pratiquement nulle.

### 2.2.1 Bilan massique et énergétique du couvert de neige utilisé par CROCUS

Bon nombre de modèles utilisés à des fins hydrologiques présentent certaines défaillances dans la concordance entre les couches numériques de neige et les couches réelles du couvert ainsi que dans le suivi de l'historique énergétique de chacune des couches naturelles qui sont essentielles à la caractérisation des propriétés mécaniques de celles-ci. En raison de ces défaillances, le modèle CROCUS a été développé pour prendre en compte la plupart des phénomènes affectant l'évolution du couvert de neige (fig. 2.1). Toutefois, les simulations considèrent le couvert de neige comme unidimensionnel. De plus, les échanges énergétiques s'exercent perpendiculairement à la pente. Ces phénomènes sont à la fois présentés à la figure 2.1 et décrits plus précisément par la suite (Brun *et al.*, 1989):

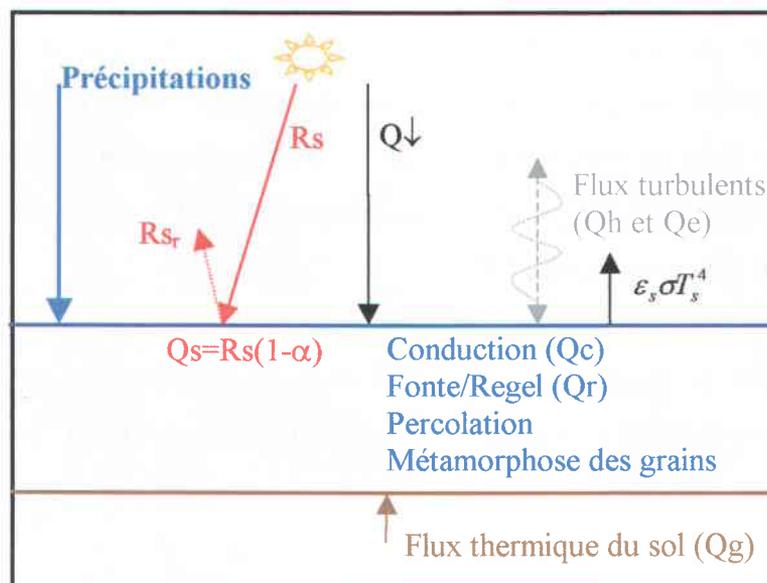


Figure 2.1 Processus physiques affectant l'évolution du couvert de neige pris en compte par le modèle CROCUS

Les processus physiques présentés à la figure 2.1 sont décrits aux points suivants :

**1. Rayonnement de grandes longueurs d'ondes  $Q_l$  :**

Les propriétés radiatives de la neige pour des longueurs d'ondes allant de  $5\mu\text{m}$  à  $40\mu\text{m}$  suscitent des échanges radiatifs limités à la surface de la neige.

$$Q_l = \varepsilon_s Q_{\downarrow} - \varepsilon_s \sigma T_s^4 \quad (2.1)$$

ou  $Q_{\downarrow}$  représente le rayonnement atmosphérique de grandes longueurs d'ondes,  $T_s$  la température de la surface de la neige,  $\sigma$  la constante de Stephan-Boltzman et  $\varepsilon_s$  l'émissivité de la neige. Cette dernière, qui varie entre 0.98 et 1, dépend de la longueur d'onde et de l'angle d'incidence. Le modèle considère que l'émissivité de la neige est égale à 1.

**2. Rayonnement de courtes longueurs d'ondes  $Q_s$  :**

Le rayonnement solaire est en partie réfléchi par la neige. La portion restante pénètre dans le couvert où elle est graduellement absorbée. La réflectance de la neige dépend fortement de la longueur d'onde, de la taille des grains de neige et des impuretés contenues dans le couvert de neige. Tout comme la distribution du spectre solaire qui varie en fonction de la nébulosité, l'albédo de la neige ( $\alpha$ ) n'est pas constant pour une couche de neige donnée. L'absorption ( $\beta$ ) dépend également de la longueur d'onde, de la grosseur des grains, de la présence d'impuretés ainsi que de la densité (Bohren et Barkstrom, 1972; Sergent *et al.*, 1987). Puisque la pénétration du rayonnement solaire en fonction de la profondeur s'exprime par une fonction exponentielle  $e^{-\beta z}$  ou  $\beta$  varie avec la longueur d'onde, l'absorption solaire ne peut être représentée par une seule valeur moyenne de  $\beta$ . Par conséquent, le spectre solaire a été divisé en trois bandes spectrales,  $0.3\mu\text{m}$  à  $0.8\mu\text{m}$ ,  $0.8\mu\text{m}$  à  $1.5\mu\text{m}$  et  $1.5\mu\text{m}$  à  $2.8\mu\text{m}$ , pour lesquels  $\alpha$  et  $\beta$  sont considérés comme constants et dépendent seulement de la taille des grains et de la densité selon Bohren et Barkstrom (1972). Ainsi pour une profondeur  $z$  sous la surface de la neige, le flux solaire  $Q_s$  est donné par l'équation 2.2 :

$$Q_s = \sum_{i=1,3} (1 - \alpha_i) R_{s_i} e^{-\beta_i z} \quad (2.2)$$

où  $R_{s_i}$  représente le rayonnement solaire pour la bande  $i$ . Ainsi, l'absorption du rayonnement par une couche d'une épaisseur  $\Delta z$  à une profondeur  $z$  est égale à :

$$\frac{dQ_s}{dz} \Delta z \quad (2.3)$$

### 3. Échanges turbulents entre la surface de neige et l'atmosphère exprimés par $Q_h$ et $Q_e$ :

Deardorff (1968) exprime les flux turbulents de chaleur sensible  $Q_h$  et de chaleur latente  $Q_e$  par :

$$Q_h = \rho_a C_{p_a} C_h U_a (T_a - T_s) \quad (2.4)$$

$$Q_e = \frac{L_s \rho_a}{P_a} \frac{M_v}{M_a} C_e U_a (E_i(T_a) - E_i(T_s)) \quad (2.5)$$

où  $\rho_a$  représente la densité de l'air,  $C_{p_a}$  la chaleur spécifique de l'air,  $U_a$  la vitesse du vent à une hauteur spécifique au-dessus de la surface de neige,  $T_a$  la température de l'air pour cette même hauteur,  $L_s$  la chaleur latente de sublimation de la glace,  $P_a$  la pression atmosphérique,  $M_v/M_a$  le rapport entre la masse moléculaire de la vapeur d'eau et celle de l'air,  $E_i(T)$  la pression de vapeur saturante au-dessus d'une surface horizontale de glace pour une température donnée  $T$  et  $T_s$  la température de la neige en surface.  $C_h$  et  $C_e$  sont des coefficients de transfert turbulent pouvant être considérés égaux. Ils dépendent de la longueur des rugosités présentes à la surface de la neige, à la hauteur où  $T_a$  et  $U_a$  sont mesurées, ainsi que de la stabilité de la surface de contact entre la neige et l'atmosphère. Au-dessus de la surface de neige, la température de l'air est généralement supérieure à celle mesurée à la surface de la neige. Dans ces conditions  $C_h$  et  $C_e$  sont tous deux très faibles (Deardorff, 1968) de plus, pour de faibles vitesses de vent, l'énergie fournie au couvert de neige par conduction thermique dans l'air et par la diffusion de vapeur en fonction du gradient de vapeur dans l'air peut être plus importante que l'énergie fournie par transfert turbulent.

Alors, il est préférable d'utiliser les équations suivantes pour le calcul de Qh et Qe.

$$Qh = \rho_a C p_a Ch (a + b U_a) (T_a - T_s) \quad (2.6)$$

$$Qe = \frac{Ls \rho_a}{P_a} \frac{M_v}{M_a} C e (a + b U_a) (E_i(T_a) - E_i(T_s)) \quad (2.7)$$

où a et b doivent être ajustés expérimentalement pour une location donnée. Dans les équations précédentes, Ls doit être remplacé par la différence entre Ls et Lw (Ls-Lw) et  $E_i(T)$  par  $E_w(T_0)$  lorsque  $T_s$  est égal à 0°C, puisqu'on est en présence de condensation et non de sublimation en raison de la température  $T_s$  se trouvant au point de fusion. Lw est la chaleur latente de fusion et  $E_w(T_0)$  la pression de vapeur au-dessus d'une surface d'eau à la température du point de fusion  $T_0$  (Brun *et al.*, 1989).

#### 4. Transfert de chaleur provoqué par les précipitations Qr :

La température des précipitations de neige est supposée être identique à celle de la surface de neige tout comme celle de la pluie identique à celle de l'atmosphère. En présence de précipitations liquides, l'eau pénètre à l'intérieur des premières couches de neige à une température  $T_0$  et l'énergie transmise à ces couches est décrite selon l'équation :

$$Qr = Mr C p_w (T_a - T_0) \quad (2.8)$$

où  $C p_w$  représente la chaleur spécifique de l'eau à une température  $T_0$ ,  $T_a$  la température de l'air et Mr la masse de l'eau liquide.

#### 5. Conduction de chaleur à travers le couvert de neige Qc :

$$Qc = \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.9)$$

où  $\lambda$  est un coefficient de conductivité effective de la neige.

Yen (1981) a démontré que la plupart des coefficients mesurés peuvent être décrits par la fonction suivante :

$$\lambda = \lambda_i \left[ \frac{\rho_n}{\rho_w} \right]^{1.88} \quad (2.10)$$

où  $\lambda_i$  représente le coefficient de conductivité de la glace,  $\rho_n$  et  $\rho_w$  la densité de la neige et celle de l'eau. Ce coefficient est appelé effectif en raison du fait qu'il inclut les flux de chaleur causés par la diffusion de la vapeur à travers le couvert de neige. Il peut alors être considéré comme conductivité thermique.

$$Q_v = LsD \frac{\partial \rho_v}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.11)$$

où  $\rho_v$  représente la densité de la vapeur et D le coefficient de diffusion de la vapeur dans la neige. Ainsi,  $Q_c$  doit donc être limité par  $Q_v$  dans la formule de Yen.

#### 6. Percolation de l'eau à l'intérieur dans le couvert nival :

En présence de couches de neige humide, l'eau liquide contenue dans le couvert est susceptible de se déplacer vers les couches plus profondes. En accord avec Colbeck (1972), le mouvement de l'eau survient lorsque la saturation en eau est plus importante que la saturation irréductible en eau. Le flux vertical de l'eau peut être exprimé de la façon suivante :

$$U_w = \frac{\rho_w}{\mu_w} gk \left( \frac{Sw - Sw_i}{1 - Sw_i} \right)^3 \text{ lorsque } Sw > Sw_i \quad (2.12)$$

$$U_w = 0 \quad \text{lorsque } Sw \leq Sw_i \quad (2.13)$$

où g est l'accélération gravitationnelle,  $\mu_w$  la viscosité de l'eau à 0°C, k la perméabilité intrinsèque, Sw le degré de saturation en eau et  $Sw_i$  la saturation irréductible de l'eau.  $Sw_i$  dépend du type de neige et de la taille des grains. Typiquement, elle représente 9% à 10% de la masse (Denoth *et al.*, 1979; Brun, 1989). Le modèle considère que l'eau s'écoulant à la base du couvert pénètre entièrement dans le sol.

### 7. Tassement de la neige :

Le tassement des différentes couches de neige résulte de l'action combinée de la métamorphose des grains et du poids des couches supérieures. Ce dernier peut être décrit par la viscosité moyenne. Navarre (1975) a établi une loi permettant le calcul du tassement.

$$\frac{de}{e} = \frac{-\sigma}{\eta} dt \quad (2.14)$$

$$\text{pour laquelle } \eta = \frac{6.10^4}{1-f(d)} e^{23\rho_n - 0.1(T_n - T_0)} \quad (2.15)$$

où  $e$  représente l'épaisseur de la couche de neige,  $\eta$  la viscosité,  $\sigma$  les contraintes verticales,  $dt$  l'intervalle de temps,  $f(d)$  une fonction du type de neige,  $\rho_n$  la densité de la couche de neige,  $T_n$  la température de la couche de neige et  $T_0$  la température de fusion de la glace (273.15 °K)

### 8. Transfert de chaleur entre le sol et le couvert de neige Qg :

En raison des variations inter-annuelles de la température du sol, un transfert d'énergie positif  $Q_g$ , s'effectue entre le sol et la surface de neige en contact avec ce dernier. Ce transfert dépend des conditions climatologiques et pédologiques rencontrées dans le milieu. Généralement,  $Q_g$  décroît lentement au cours de la période d'accumulation hivernale pour ensuite augmenter de façon significative au cours de la période de fonte lorsque l'eau se met à circuler dans le sol. Toutefois, le modèle CROCUS considère  $Q_g$  comme constant et ce dépendant du milieu.

Les considérations précédentes portant sur les bilans énergétiques et massiques démontrent que les données d'entrée suivantes doivent être disponibles pour permettre le suivi du couvert nival :

1. Les précipitations liquides et solides;
2. La vitesse du vent;
3. La température de l'air;

4. Le taux d'humidité;
5. Le rayonnement solaire de courtes et grandes longueurs d'ondes;
6. Le flux thermique induit par le sol.

Il est à noter que le détail des fichiers d'entrée et de sortie du modèle CROCUS sont présentés à l'annexe 1.

### 2.2.2 Solutions numériques du modèle CROCUS

Pour calculer les profils de température, de densité, d'eau liquide présente dans le manteau neigeux et de taille et type de grains, le couvert est divisé en couches de neige parallèles à la pente. Les transferts d'énergie, sont quant à eux, projetés perpendiculairement à la pente. L'épaisseur de chacune des couches (i), exprimée par  $dz(i)$ , varie en fonction de la profondeur et du temps. Bien que les variations de grandes amplitudes surviennent en surface, l'épaisseur des couches supérieures est moindre que celle des couches inférieures (Brun *et al.* 1989).

La conservation de la chaleur d'une couche interne (i) prend alors la forme suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_n C_p dz(i) T(i) + L_w C_w(i)) = Q_c + L_w W + Q_s \quad (2.16)$$

où  $C_w(i)$  représente la masse d'eau liquide présente dans la couche,  $W$  le bilan d'eau liquide de la couche due à la percolation,  $C_p$  la chaleur spécifique de la glace qui est une fonction de la température  $T(i)$  et  $Q_c$  représente le flux de chaleur causé par conduction avec les couches adjacentes.

Pour la couche de surface i, l'équation devient :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_n C_p dz(i) T(i) + L_w C_w(i)) = Q_c + L_w W + Q_s + Q_e + Q_h + Q_r + Q_l \quad (2.17)$$

où  $Q_c$  représente le flux de chaleur causé par conduction avec la couche sous-jacente et  $W$  représente l'eau due aux précipitations.

Finalement, pour la couche de fond, l'équation se présente sous la forme suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_n C_p dz(i)T(i) + L_w C_w(i)) = Q_c + L_w W + Q_s + Q_g \quad (2.18)$$

En raison des changements de phase entre l'eau sous forme liquide et la glace, l'équation de conservation de l'énergie ne peut être résolue simultanément pour calculer à la fois les variables  $T(i)$  et  $C_w(i)$  au temps  $(t + dt)$  à partir de leurs valeurs au temps  $(t)$ . En ce sens, le modèle calcule premièrement la température  $T(i)$  pour chacune des couches  $(i)$  pour le temps  $(t + dt)$  pour ensuite imposer les changements de phase nécessaires dans le but d'obtenir uniquement de l'eau sous forme liquide lorsque la température est égale au point de fusion  $T_0$ . Le modèle assume que la valeur de  $T_0$  demeure constante à  $273.16^\circ\text{K}$ .

Pour effectuer le calcul des températures de chacune des couches, le modèle utilise la méthode de résolution numérique classique de Crank-Nicholson, une méthode implicite qui utilise la notion de différences finies. Elle requiert, entre autres, la linéarisation de chacun des échanges thermiques et ce, en fonction de la température. Cette méthode implicite est nécessaire pour obtenir de bons résultats près de la surface.

Dans le cas présent, cette nécessité prend toute sa signification puisque que  $Q_h$ ,  $Q_e$  et  $Q_l$  dépendent fortement de la température à la surface du couvert.

Après le calcul du profil de température au temps  $(t + dt)$ , le modèle effectue les changements de phase nécessaires au gel ou dégel des couches mouillées. Par la suite, le modèle procède aux calculs de la percolation de l'eau après avoir introduit d'éventuelles précipitations liquides. Une linéarisation de l'équation de percolation de l'eau doit être réalisée pour prévenir les instabilités numériques.

Le tassement est alors pris en compte en diminuant l'épaisseur de chacune des couches correspondant par le fait même à une augmentation de la densité. L'ajout de nouvelles couches de neige au couvert est finalement effectué, si requis. Avant d'utiliser les nouveaux profils de température, de densité, de taille et type de grains, d'eau liquide

présente dans le manteau neigeux, dans le but de procéder à une nouvelle simulation, l'épaisseur de chacune des couches est évaluée pour prévenir la présence de couches ayant une épaisseur inférieure à 0.5cm et également pour éviter d'avoir un nombre total de couches supérieur à 50. Dans une telle situation, les couches adjacentes sont combinées en respectant certaines conditions. Ces conditions se décrivent ainsi : le modèle évite la combinaison de couches résultantes de chutes de neige distinctes, il combine les couches adjacentes de densités similaires, tout en préservant l'épaisseur des 15 couches supérieures à une valeur plus petite que 1cm. Ces règles permettent de faire coïncider les couches numériques avec les couches naturelles du couvert nival. Par conséquent, l'historique énergétique complet de chacune des couches est préservé, ce qui permet d'en prédire les caractéristiques mécaniques et morphologiques (Brun *et al.*, 1989).

### 2.2.3 Paramètres et équations d'ajustement du modèle CROCUS

Tel que mentionné précédemment, l'objectif principal de cette recherche vise à utiliser et à adapter aux conditions environnementales du Québec le modèle français multicouches CROCUS. En ce sens, la présente section vise, quant à elle, à mettre en évidence les paramètres et équations qui peuvent être modifiés ou encore ajoutés tant à l'intérieur du modèle CROCUS que dans les calculs préliminaires des données d'entrée nécessaires aux modélisations. Toutefois, de telles modifications ou ajouts demeurent à la fois restreints et justifiables et n'ont pour unique but que l'obtention de meilleurs résultats suite aux modélisations. Ainsi, certains processus influençant l'évolution du couvert nival présentent une grande sensibilité aux conditions météorologiques ainsi qu'aux caractéristiques du secteur d'étude. Ces processus sont entre autres :

1. Le tassement de la neige;
2. Le calcul de la densité de la neige fraîche
3. Les transferts convectifs de chaleur sensible à l'interface neige-air aussi appelés flux turbulents
4. L'ajustement des précipitations
5. Le calcul du rayonnement infrarouge incident
6. L'influence de la végétation sur le rayonnement infrarouge, solaire direct et diffus incident

#### 2.2.3.1 Le tassement de la neige

Certaines études menées par le passé ont souffert de problèmes de sous-estimation systématique de la densité de la neige dans le cadre de modélisation en milieu polaire. En effet, puisque CROCUS considère la neige comme un fluide Newtonien, il procède ainsi au calcul d'un taux de tassement basé sur une viscosité Newtonienne dépendant de la température, de la densité et du type de neige (Eq. 2.14).

Toutefois, la prédominance de températures relativement froides en surface, en régions polaires, limite le calcul du tassement par le modèle et occasionne un tassement trop faible et une mauvaise densification de la neige (Brun et Martin, 1997).

Pour palier à cette limite du modèle, le calcul du tassement mécanique utilisé par CROCUS pourra être modifié, lors de l'étalonnage du modèle, dans le but de mieux répondre aux conditions météorologiques des différents sites d'étude. Plus précisément, les équations résultant du développement mathématique modifié de l'équation 2.14 et permettant le calcul du tassement à l'intérieur de la sous-routine *Metamo.* du modèle, se présentent sous la forme suivante :

#### 1. Calcul de la viscosité des couches de neige

$$z_{svisc} = \frac{0.7 * 111000 * e^{(23 * \rho_s + 0.1 * ABS(273.15 - T_s))} * \rho_s}{0.25} \quad (2.19)$$

Dans l'équation 2.19, les différents paramètres portent les dénominations suivantes (définition et nom du paramètre dans CROCUS):

• 0.7	Coefficient 1 d'ajustement de la viscosité	(VVISC1)
• 111000	Coefficient 2 d'ajustement de la viscosité	(VVISC2)
• 23	Coefficient 3 d'ajustement de la viscosité	(VVISC3)
• 0.1	Coefficient 4 d'ajustement de la viscosité	(VVISC4)
• 0.25	Coefficient 5 d'ajustement de la viscosité	(VRO11)
• 273.15	Température de fusion de la glace (°K)	(UTFUS)
• $T_s$	Température de la couche de neige (°K)	(ST1)
• $\rho_s$	Densité de la couche de neige (g/cm <sup>3</sup> )	(SRO)

Le calcul de la viscosité permet par la suite, le calcul de la nouvelle épaisseur de chacune des couches de neige.

## 2. Calcul de la nouvelle épaisseur

$$Ep = Ep_i * \text{Max} \left( 0.3, \left( 1 - \frac{(3600 * \text{Max}(zssmas * \cos(\text{incli} * \pi / 180), 1))}{zsvisc} \right) \right) \quad (2.20)$$

Dans le calcul de la nouvelle épaisseur (Eq. 2.20), les différents éléments représentent (définition et nom du paramètre dans CROCUS):

• 0.3	Densification maximale pour les couches de neige	(VDZ3)
• 3600	Nombre de secondes par heure (s/h)	(NUH2S)
• 180	Conversion de $\pi$ en degrés	(UPIDG)
• zssmas	Masse des couches supérieures (g)	(ZSSMAS)
• incli	Inclinaison du site en degrés	(MINCLI)
• zsvisc	Viscosité calculée précédemment	(ZSVISC)
• $Ep_i$	Épaisseur initiale de la couche de neige (cm)	(SDZ)
• $Ep$	Épaisseur finale de la couche de neige (cm)	(SDZ)

Il est à noter que l'ensemble des descriptions présentées sont extraites de la liste des paramètres fournie avec le modèle CROCUS.

Afin d'augmenter le tassement déterminé par le modèle CROCUS, l'équation du calcul de la viscosité (Eq. 2.19) peut être modifiée au moyen des coefficients d'ajustement de la viscosité puisque leurs valeurs résultent d'études menées en France et, par conséquent, dans des conditions météorologiques et sur des sites différents de la présente recherche.

En ce sens, le coefficient5 d'ajustement de la viscosité semble le plus approprié en raison de son effet direct sur la valeur résultante de la viscosité.

### 2.2.3.2 Le calcul de la densité de la neige fraîche

Les valeurs de densité attribuées aux chutes de neige fraîche par le modèle CROCUS résultent d'une équation ajustée pour des sites français situés sur des secteurs montagneux sujets à une plus faible exposition aux vents (Essery *et al.*, 1999). Toutefois, la densité de la neige en surface, en milieu nordique exposé au vent, comme celui du bassin hydrographique LG4, est souvent beaucoup plus grande que celle observée sur des sites

moins affectés par l'action du vent. De plus, bien que le modèle intègre la vitesse du vent dans le calcul de la densité de la neige fraîche (Eq. 2.21), il ne prend pas en compte l'effet du vent sur le transport de la neige et la densification du couvert (Brun et Martin, 1997). Par conséquent, la modification du calcul de la densité de la neige fraîche permet indirectement la prise en compte de l'action du vent.

Cet effet est d'autant plus marqué lors de périodes froides puisque le modèle présente une équation qui assure l'obtention de valeur de densité raisonnable et assez élevée pour des températures plus chaudes, c'est à dire supérieures à  $-5^{\circ}\text{C}$ . Plus précisément, les équations de calcul de densité de neige fraîche prenant place dans la sous-routine *meteo* du modèle CROCUS se présentent sous la forme suivante :

$$AHRO1 = 0.109 + 6E - 03 * (AHT1 - 273.15) + 0.026 * (AHV1 * 0.01)^{0.5} \quad (2.21)$$

Dans cette équation, les différents membres sont décrits ainsi (définition et nom du paramètre dans CROCUS):

• 0.109	Coefficient 1 d'ajustement formule de densité	(VRO1)
• 6E-03	Coefficient 2 d'ajustement formule de densité	(VRO2)
• 273.15	Température de fusion de la glace ( $^{\circ}\text{K}$ )	(UTFUS)
• 0.026	Coefficient 3 d'ajustement formule de densité	(VRO3)
• 0.01	Conversion de centimètre à mètre (m/cm)	(UCM2M)
• 0.5	Coefficient 4 d'ajustement formule de densité	(VRO12)
• AHT1	Température de la neige fraîche ( $^{\circ}\text{K}$ )	(AHT1)
• AHV1	Vitesse du vent lors de la chute de neige (m/s)	(AHV1)
• AHRO1	Densité de la neige fraîche ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	(AHRO1)

Il est toutefois à noter que la densité de la neige fraîche ne peut être inférieure à  $0.03\text{g}/\text{cm}^3$  qui représente le seuil minimal de densité de la neige fraîche.

Pour faciliter la compréhension des modifications qui peuvent être apportées à l'équation 2.21, cette dernière peut être présentée également sous forme graphique.

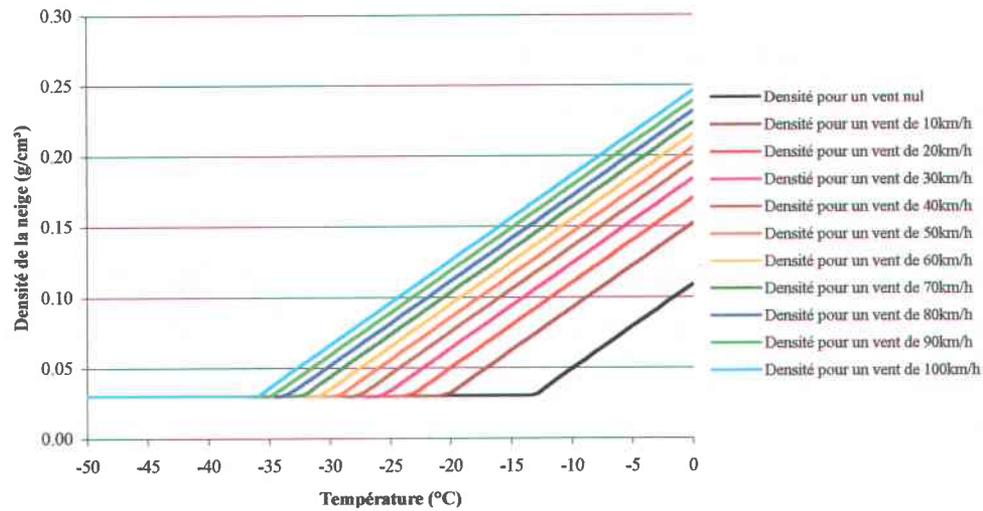


Figure 2.2 Représentation graphique du calcul original de la densité de la neige fraîche effectué par CROCUS en fonction de la température et du vent

La figure 2.2 permet de constater que pour un vent constant, l'équation 2.21 prend la forme d'une droite pour laquelle la pente et l'ordonnée à l'origine correspondent respectivement aux coefficients d'ajustement de la densité 1 et 2. Ainsi, dans le but d'augmenter les valeurs de densité attribuées aux chutes de neige fraîche pour des températures plus froides ( $\pm < -5^{\circ}\text{C}$ ), l'équation 2.21 peut être modifiée aisément au moyen des coefficients 1 et 2 (VRO1, VRO2).

### 2.2.3.3 Les transferts convectifs de chaleur sensible à l'interface neige-air ou flux turbulents

Dans le modèle CROCUS, le calcul des flux turbulents fait appel à plusieurs paramètres, ceux-ci incluent entre autres, deux coefficients empiriques appelés VCU2 et VCU3 permettant la linéarisation des échanges turbulents. Les valeurs attribuées à ces coefficients résultent d'études comme celles menées, à Col de Porte en France par Martin et Lejeune (1998), sur les flux turbulents au-dessus de la surface du couvert de neige. Plus précisément, l'équation faisant appel à ces coefficients prenant place dans la sous-routine *Resolt* du modèle CROCUS se présentent sous la forme suivante :

$$XCU = MAX((0 + 7.4E - 7 * APV) * APRES / 870, 2.5E - 5 * APRES / 870) \quad (2.22)$$

Dans cette équation, les différents membres sont décrits ainsi (définition et nom du paramètre dans CROCUS):

- |          |                                                            |          |
|----------|------------------------------------------------------------|----------|
| • 0      | Coefficient 1 empirique flux turbulent                     | (VCU1)   |
| • 7.4E-7 | Coefficient 2 empirique flux turbulent                     | (VCU2)   |
| • 870    | Pression de référence site Col de Porte (hPa)              | (VPRES1) |
| • 2.5E-5 | Coefficient 3 empirique flux turbulent                     | (VCU3)   |
| • APV    | Vitesse du vent (m/s)                                      | (APV)    |
| • APRES  | Pression au site de modélisation (hPa)                     | (APRES)  |
| • XCU    | Éléments intermédiaires dans le calcul des flux turbulents |          |

Il est à noter que les coefficients empiriques VCU1 et VCU2 doivent être multipliés par 2 en présence de glace en surface.

En raison de la détermination des coefficients empiriques 1, 2 et 3 à partir de conditions météorologiques propres à des sites montagneux caractérisés par une plus faible exposition aux vents, il est raisonnable de croire que de tels coefficients peuvent être modifiés pour des sites dégagés, moins rugueux et exposés aux vents.

### 2.2.3.4 Ajustement des précipitations

En présence de mesures de précipitations enregistrées à une station n'étant pas située à proximité de celle où sont effectuées les modélisations, CROCUS dispose d'un coefficient multiplicatif des précipitations portant la dénomination VRR3 et pouvant être modifié au besoin. Dans le cadre de cette recherche, ce coefficient peut donc être employé pour ajuster les précipitations utilisées pour réaliser le suivi du couvert de neige (CROCUS, Guide d'utilisation).

### 2.2.3.5 Le calcul du rayonnement infrarouge

Tel que mentionné précédemment, le calcul du rayonnement infrarouge incident peut être réalisé à l'aide de la formule de BERLIANDA. Plus précisément, ce calcul est effectué selon la loi de Stefan-Boltzman qui peut être présentée sous la forme suivante :

$$L \downarrow = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.23)$$

où  $L \downarrow$  représente le rayonnement infrarouge incident,  $\varepsilon$  l'émissivité,  $\sigma$  la constante de Stefan-Boltzman ( $5.67E-08 \text{ W/m}^2/\text{K}^4$ ) et  $T$  la température. Ainsi, les paramètres d'entrée ainsi que le détail du calcul sont décrits ci-bas.

#### **ZBERL      Calcul du rayonnement infrarouge incident par la formule de Berlianda**

Paramètres d'entrées :

- PTAIR :      La température de l'air (°K)
- PNEB :      La nébulosité (1/10ème de la voûte céleste)
- PE :          La tension de vapeur d'eau (hPa)
- ZSIGMA      La constante de Stefan-Boltzman ( $5.67E-08 \text{ W/m}^2/\text{K}^4$ )

#### **Calcul du rayonnement infrarouge incident ZBERL**

1. Calcul du coefficient dépendant de la nébulosité

$$ZRK = 0.09 + 0.2 * PNEB \quad (2.24)$$

2. Calcul de l'émissivité atmosphérique

$$ZEPSI = 0.58 + 0.9 * ZRK * PNEB^2 + 0.06 * \sqrt{PE} * (1 - ZRK * (PNEB^2)) \quad (2.25)$$

3. Calcul du rayonnement infrarouge

$$ZBERL = ZEPSI * ZSIGMA * PTAIR^4 \quad (2.26)$$

Il est à noter que, dans la détermination du rayonnement infrarouge par la méthode de Berlianda, le calcul du coefficient de la nébulosité ainsi que celui de l'émissivité atmosphérique découle d'équations calées pour la France. Ces deux équations sont donc susceptibles d'engendrer des valeurs moins précises pour les sites d'études de la présente recherche. Par conséquent, l'intégration de nouvelles formules, mieux adaptées aux conditions du Nord du Québec, pourra contribuer à l'amélioration du calcul du rayonnement infrarouge.

#### 2.2.3.6 L'influence de la végétation sur le rayonnement infrarouge, solaire direct et diffus incident

Il est clairement reconnu dans la littérature que la végétation absorbe une partie des rayonnements solaires direct, diffus et infrarouge. Toutefois, une partie de cette énergie absorbée est, par la suite, retransmise à la neige sous forme de rayonnement thermique (Pomeroy et Dion, 1996). Une telle influence doit donc être intégrée aux différents calculs sollicités.

Il est à noter, dans un premier temps, que le modèle CROCUS ne tient pas compte de la végétation de même que les équations permettant le calcul des rayonnements infrarouge, solaire direct et diffus prenant place dans le fichier MET nécessaire au lancement du modèle. Cette absence s'explique aisément par l'application originale du modèle sur des sites français dépourvus de toute végétation. Plus précisément, les valeurs de rayonnements traitées par le modèle sont celles incidentes au couvert de neige. Ainsi, toutes modifications destinées à ajuster ces valeurs peuvent être intégrées à même les

algorithmes de calculs des rayonnements solaires direct, diffus et infrarouge présents dans le programme utilitaire présenté à l'annexe 6 et mentionnés à la section 2.2.3.

L'équation du bilan radiatif à la surface utilisé par CROCUS se présente donc sous la forme générale suivante :

$$Q^* = S \downarrow * (1 - \alpha) + L \downarrow - \varepsilon_s \sigma T_s^4 \quad (2.27)$$

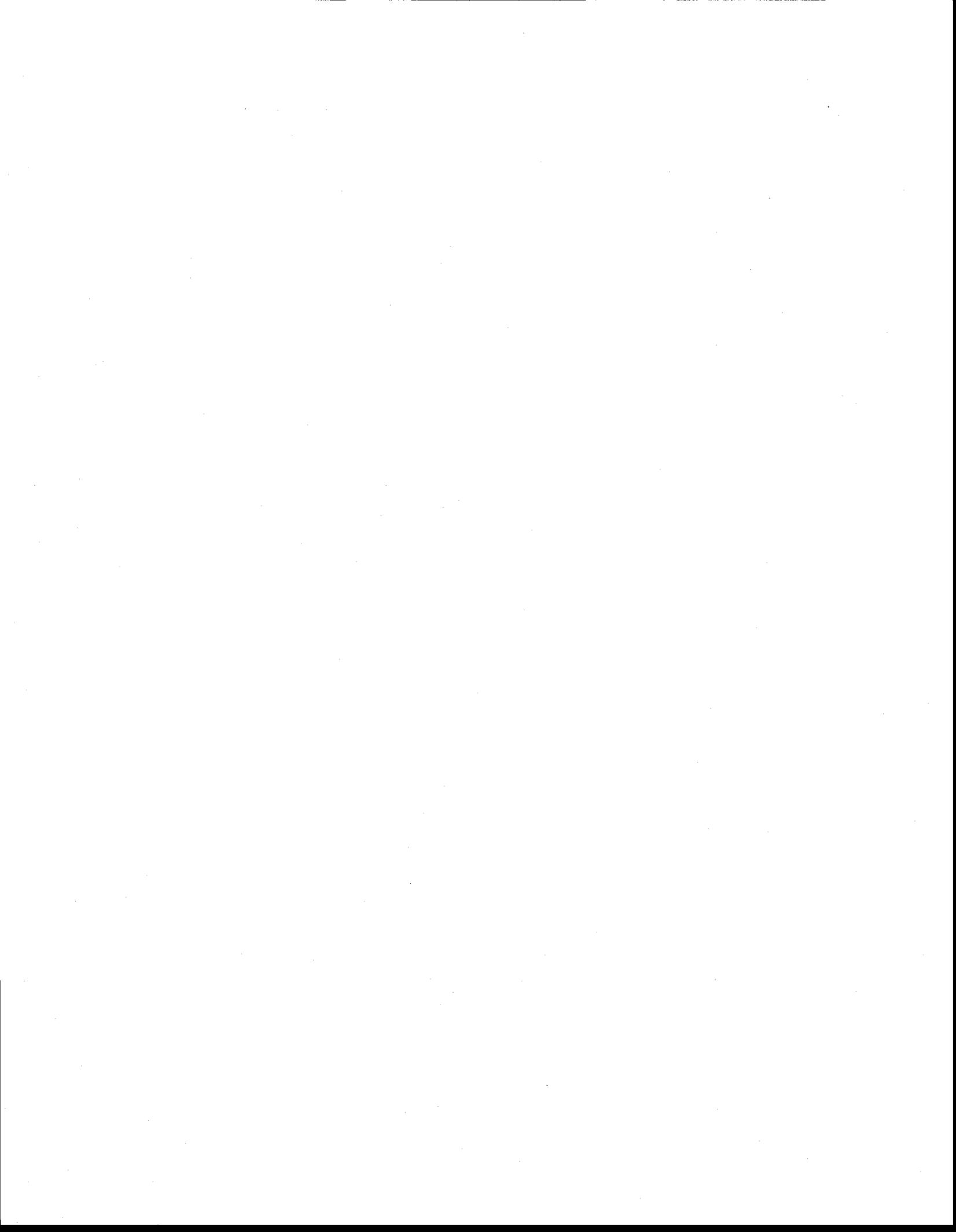
où  $Q^*$  représente le bilan radiatif à la surface du couvert de neige,  $S \downarrow$ , le rayonnement solaire global incident à la surface du couvert de neige,  $\alpha$ , l'albédo de la neige,  $L \downarrow$ , le rayonnement infrarouge incident à la surface du couvert nival,  $\varepsilon_s$ , l'émissivité de la neige,  $\sigma$ , la constante de Stefan-Boltzman et  $T_s$ , la température de la neige en surface.

Dans l'équation 2.27,  $L \downarrow$  correspond au calcul du rayonnement infrarouge présenté à la section 2.2.3.6 (Eq. 2.23). Cette même équation peut être reprise et précisée sous la forme suivante:

$$L \downarrow = \varepsilon_a \sigma T_a^4 \quad (2.28)$$

où  $\varepsilon_a$ , représente l'émissivité atmosphérique,  $\sigma$ , la constante de Stefan-Boltzman et  $T_a$ , la température de l'air.

La modification de l'équation 2.27 par l'intégration de l'effet de la végétation sur le bilan radiatif permettra donc l'ajustement du calcul des rayonnements infrarouge, solaire direct et diffus incident à la surface du couvert nival.



### **3 DESCRIPTION DU SECTEUR D'ÉTUDE ET DES DONNÉES**

---

#### **3.1 Le secteur d'étude**

L'aire d'étude est située dans la province de Québec au Canada, plus particulièrement sur le sous-bassin hydrographique LG4 de la rivière La Grande (Baie de James) (Figure 3.1). Ce sous-bassin se trouve dans la région climatique dite continentale froide de type subarctique et il est caractérisé par des étés doux et courts et des hivers longs et rigoureux. La température moyenne annuelle y est de  $-3.8^{\circ}\text{C}$  et les précipitations annuelles moyennes sont de 765 mm. En période hivernale, l'épaisseur moyenne du couvert de neige sur ce secteur est approximativement de 100cm avec des densités moyennes  $250 \text{ kg/m}^3$ . Il s'agit donc d'une région de transition entre la taïga et la toundra.

Il s'agit d'un milieu dominé par une forêt ouverte d'épinettes noires, de brûlis et de tourbières (Bernier *et al.*, 1999). D'un point de vue géologique, ce territoire est composé essentiellement de roches métamorphiques et intrusives et d'un socle rocheux composé de granite et de gneiss. Ce territoire est caractérisé par un relief onduleux d'amplitude relativement faible, il est parsemé de nombreux petits lacs et il comporte quelques rivières ainsi que d'importants réservoirs. Ainsi, l'ensemble de la région de la Baie de James est d'une importance capitale pour le Québec puisqu'elle supporte bon nombre d'installations hydroélectriques qui produisent une grande quantité (50%) de l'électricité consommée sur la totalité du territoire québécois. Plus spécifiquement, le secteur d'étude visé est d'une grande importance hydrologique puisque qu'il constitue le réservoir amont de la rivière La Grande et, par conséquent, détermine en grande partie l'écoulement en aval, c'est-à-dire, vers les complexes hydroélectriques qui succèdent à LG4.

Les facteurs déterminants qui justifient le choix de ce site d'étude (figure 3.1) sont les suivants :

1. La présence, sur le sous-bassin LG4, de trois stations automatiques d'acquisition de données sur le couvert nival appartenant à Hydro-Québec et portant la dénomination Hydro-Québec 02s, 11e et 19e.
2. La disponibilité de données de précipitations fournies par deux stations météorologiques d'Hydro-Québec portant les noms de LG4-Sud et LG4-Est et situées à proximité des stations d'acquisition de données sur le couvert nival mentionnées au point précédent.
3. La disponibilité d'un large éventail de données météorologiques acquises par une station régionale appartenant à Hydro-Québec et notamment essentielles aux modélisations. Cette station peut être identifiée selon son code climatologique c'est-à-dire YAH.
4. L'utilisation d'autres modèles comme Equeau (Bernier *et al.* 1999) sur ce même sous-bassin, dans le but, par exemple, de déterminer l'équivalent en eau du couvert nival.

En raison de ces facteurs, il devient fort intéressant de tenter de modéliser l'évolution complète du couvert nival à l'aide du modèle CROCUS.

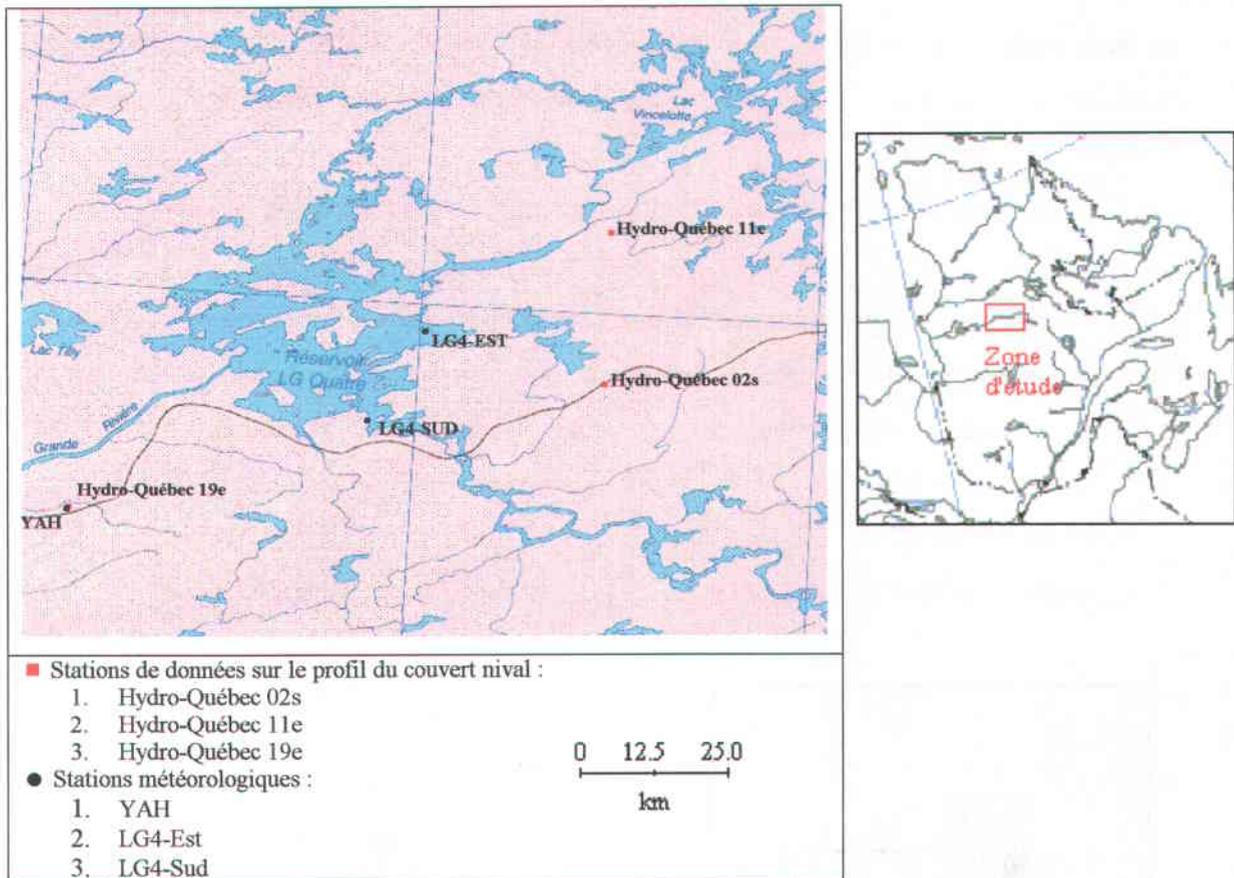


Figure 3.1 Localisation du site d'étude

### 3.1.1 Description et caractéristiques des stations

Tel qu'indiqué sur la figure 3.1, six stations d'acquisition de données sont présentes sur le sous-bassin LG4. Ces stations se divisent en deux groupes : Premièrement, les stations de données sur le profil du couvert nival et deuxièmement, les stations météorologiques. Toutes ces stations sont utiles à la présente recherche, puisqu'elles fournissent des données à la fois locales et essentielles aux modèles. Une description plus approfondie des caractéristiques propres à chacune des stations est présentée aux pages suivantes.

Les stations de données sur le profil du couvert nival (figure 3.2) se retrouvent dans des environnements similaires. De plus, elles sont pourvues des appareils de mesures suivants :

1. Sonde laser permettant le suivi de l'épaisseur du couvert de neige au sol
2. Thermocouples qui établissent le profil de températures à l'intérieur du couvert de neige en plus de mesurer la température extérieure. Plus précisément, le profil vertical de températures est déterminé à partir des points de mesure de températures suivants : -5cm (point de mesure dans le sol), 0cm, 5cm, 13cm, 27cm, 57cm, 87cm

Ces appareils procèdent à l'acquisition horaire des données mentionnées.

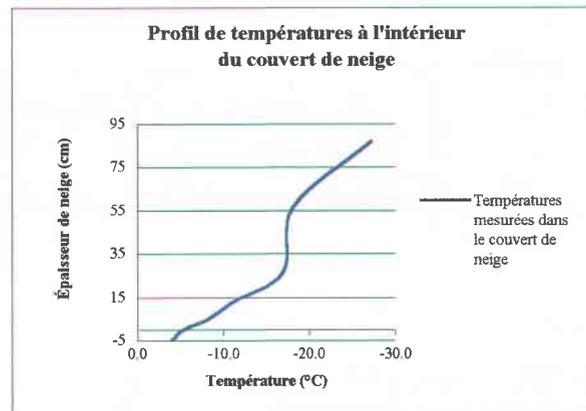


Figure 3.2 Exemple d'une station de données sur le profil du couvert nival et d'un profil de températures à l'intérieur du couvert de neige

Plus précisément, ces stations présentent les caractéristiques suivantes :

1. Station 2s

Latitude : 53°53'58''

Longitude : 72°31'47''

Altitude : 427 m

La station 2s se trouve à 40m au sud de la route de LG4 (borne 388.8), au sud-ouest du Lac des Vœux, dans un secteur comportant des espaces dégagés, des zones de transition avec la présence d'arbres clairsemés et des boisés de faible densité (25%). La végétation se compose d'épinettes, d'arbustes ainsi que de mousse et de lichen. Le sol, quant à lui, est un till sableux.

2. Station 11e

Latitude : 54°08'04''

Longitude : 72°32'20''

Altitude : 450 m

La station 11e se trouve près de la route de LA1 (borne 29), au sud de la rivière La Forge, dans un environnement composé de brûlis, de zones de régénéscence et d'autres avec la présence d'arbres clairsemés. La végétation de faible densité (12%) est constituée d'épinettes de petite taille, d'arbustes, d'herbe et de graminées ainsi que de mousse et de lichen. Le site présente un relief plus accidenté avec, entre autres, la présence d'une vallée. Le sol se compose majoritairement de till, bien que le secteur présente de nombreux affleurements rocheux.

3. Station 19e

Latitude : 53°45'47''

Longitude : 73°40'33''

Altitude : 366 m

La station 19e se trouve en bordure de la route de LG4 (borne 290.5) dans un secteur de lacs et de brûlis. La végétation de très faible densité (6%) se compose, tout comme aux stations précédentes, d'épinettes, d'arbustes, d'herbe et de graminées ainsi que de mousses et de lichen. Le sol, en surface, se compose essentiellement d'humus (matière organique).

Les stations météorologiques se trouvent également dans des environnements similaires aux stations de données sur le profil du couvert nival. Toutefois, aucune d'elle ne permet le suivi du manteau neigeux, ce qui limite l'emplacement des modélisations aux stations Hydro-Québec 02s, 11e, 19e. Elles sont, par contre, grandement utiles pour l'acquisition des données météorologiques exigées par le modèle. Leurs caractéristiques sommaires sont les suivantes :

#### 1. Station YAH

Latitude : 53°45'26''

Longitude : 73°40'45''

Altitude : 301 m

La station YAH est située à l'aéroport de LG4 et à proximité de la station Hydro-Québec 19e (figure 3.1). De par son importance pour l'aéroport, cette station assure l'acquisition de la majorité des données nécessaires aux modélisations.

#### 2. Station LG4-Sud et LG4-Est

LG4-Sud

Latitude : 53°49'35''

Longitude : 73°06'49''

Altitude : 393 m

LG4-Est

Latitude : 53°57'33''

Longitude : 73°00'09''

Altitude : non-disponible

Les stations LG4-Sud et LG4-Est sont également situées sur le sous-bassin LG4, la première se trouvant près de la route de LG4 alors que la seconde se trouve sur

une île du réservoir de LG4 (figure 3.1). Ces deux stations sont dotées de précipitomètres automatiques de type Belfort #6071P placés à environ 110cm du sol et munis d'un écran de type Nipher. Ceux-ci assurent l'acquisition des données de précipitations sur leur portion respective du sous-bassin LG4.

## 3.2 Description des données

L'ensemble des données recueillies sur le terrain peuvent être réparties dans deux groupes distincts caractérisés par leur niveau d'implication au sein de la présente recherche. Ces deux groupes portent les dénominations suivantes :

1. Données nécessaires au modèle et exigées pour effectuer les modélisations désirées
2. Données recueillies sur le terrain permettant la vérification des modélisations réalisées.

La majorité de ces données sont disponibles pour plusieurs périodes hivernales consécutives. Par conséquent, la présente recherche vise à faire le suivi du couvert nival sur trois périodes hivernales successives pour lesquelles l'ensemble des données nécessaires au modèle ou encore à la vérification des modélisations sont disponibles. Ces périodes sont donc :

1. Du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998
2. Du 1 septembre 1998 au 31 mai 1999
3. Du 1 septembre 1999 au 31 mai 2000

Il est à noter que la station Hydro-Québec 19e n'offre aucune donnée pour les deux dernières périodes visées alors que les données fournies par la station 11e s'étendent uniquement sur les deux premières périodes hivernales.

### 3.2.1 Données de modélisation

Les données de modélisation sont des données prises sur le terrain qui sont à la fois nécessaires au fonctionnement du modèle CROCUS ou, encore, utiles aux calculs de données supplémentaires exigées par CROCUS. L'ensemble de ces données proviennent des différentes stations décrites précédemment.

Un bon nombre de données est fourni par la station météorologique YAH. Un exemple de quelques lignes de ces données est présenté au tableau 3.1.

Tableau 3.1 Exemple des données fournies par la station YAH

C <sub>i</sub> <sup>1</sup>	Date <sup>2</sup>	Heure <sup>3</sup>	T <sub>a</sub> <sup>4</sup>	T <sub>d</sub> <sup>5</sup>	V <sup>6</sup>	D <sub>v</sub> <sup>7</sup>	N <sup>8</sup>	C <sub>p</sub> <sup>9</sup>	C <sub>c</sub> <sup>10</sup>
YAH	;1996-09-01;	1:00;	4;	3;	4;	210;	4;		;709C71L;
YAH	;1996-09-01;	2:00;	2;	2;	0;	0;	1;		;709C71L;
YAH	;1996-09-01;	3:00;	1;	1;	0;	0;	0;		;709C71L;
YAH	;1996-09-01;	4:00;	1;	1;	0;	0;	1;		;709C71L;
YAH	;1996-09-01;	5:00;	0;	0;	0;	0;	3;F		;709C71L;

Chacune de ces lignes de données horaires (tableau 3.1) contient :

1. Le code d'identification de la station
2. La date (année-mois-jour)<sup>2</sup>
3. Heure (heure normale de l'est)<sup>2</sup>
4. La température de l'air (degrés Celsius)<sup>1,2</sup>
5. La température du point de rosée (degrés Celsius)<sup>2</sup>
6. La vitesse du vent au dessus de la surface (km/h)<sup>1</sup>
7. La direction du vent (degrés)
8. La nébulosité (0 à 10)<sup>1,2</sup>
9. Le type de précipitations sous forme de code<sup>2</sup>
10. Code climatologique de la station

<sup>1</sup> Données d'entrée du modèle CROCUS

<sup>2</sup> Données permettant le calcul ou la détermination de paramètres supplémentaires exigés par le modèle

De plus, cette station ainsi que celles de LG4-Sud et LG4-Est fournissent des mesures journalières de précipitations calculées pour les dernières 24 heures. Toutefois, l'heure à laquelle ces données sont calculées diffère entre les stations YAH et LG4-Sud et Est. Pour la première, les totaux journaliers sont effectués à 7H00 (HNE) alors que pour les deux stations automatiques suivantes, ils sont faits à 24H00 ou 0H00 (HNE).

Ainsi, un exemple des mesures de précipitations traduites sous forme d'équivalent en eau en millimètres, est présenté au tableau 3.2.

Tableau 3.2 Exemple de mesures de précipitations fournies par différentes stations

Date	P(mm)
01-sept-97	4.10
02-sept-97	18.00
03-sept-97	10.90
04-sept-97	0.00
05-sept-97	4.10

Chacune de ces lignes de données horaires (tableau 3.2) contient :

1. La date à laquelle la mesure de précipitations est prise
2. Les précipitations cumulées pour les dernières 24 heures (mm)

Pour leur part, chacune des stations de données sur le profil du couvert nival fournit des mesures horaires de température de l'air. Toutefois, il est à noter que la station Hydro-Québec 19e ne donne aucune valeur de températures pour la période allant du 1 septembre 1998 au 31 mai 2000, tout comme la station Hydro-Québec 11e pour la période allant du 1 septembre 1999 au 31 mai 2000. Un exemple de ces mesures essentielles aux modélisations, est présenté au tableau 3.3.

Tableau 3.3 Exemple de mesures de températures de l'air fournies par différentes stations

Date	Heure	T(°C)
01-sept-97	1:00	14.00
01-sept-97	2:00	15.00
01-sept-97	3:00	14.00
01-sept-97	4:00	14.00
01-sept-97	5:00	14.00

Chacune de ces lignes de données horaires (tableau 3.3) contient :

1. La date à laquelle la température de l'air est prise
2. L'heure à laquelle cette donnée est prise
3. La température de l'air (°C)

Cette mesure intervient directement dans les modélisations, mais également dans le calcul de données supplémentaires nécessaires au modèle.

Finalement, les caractéristiques de chacune des stations de données sur le profil du couvert nival et décrites précédemment (latitude, longitude, altitude) sont aussi des paramètres exigés par le modèle CROCUS pour réaliser les modélisations désirées.

### 3.2.2 Données de vérification

Des données supplémentaires recueillies sur le terrain permettent, pour leur part, la vérification des modélisations réalisées à différentes stations. En ce sens, chacune des stations de données sur le profil du couvert nival dispose d'une sonde laser mesurant l'épaisseur du couvert nival tout au long de la période hivernale. Toutefois, la station Hydro-Québec 19e ne donne aucune mesure d'épaisseur de neige pour la période allant du 1 septembre 1998 au 31 mai 2000 tout comme la station Hydro-Québec 11e pour la période allant du 1 septembre 1999 au 31 mai 2000. Un exemple de ces mesures horaires est présenté au tableau 3.4. Il est à noter que l'erreur générée par la sonde sur la mesure

de l'épaisseur est de l'ordre du centimètre ( $\pm 1.0\text{cm}$ ) ce qui lui confère une précision jugée suffisante et ce même en présence d'un couvert de neige de faible épaisseur. De plus, il est raisonnable de croire qu'aucune croissance ne peut être perçue par la sonde laser entre l'inspection automnale de l'appareil (calibration) et le début de la période d'accumulation de la neige au sol.

Tableau 3.4 Exemple de mesures d'épaisseur de neige fournies par différentes stations

Date	Ep (cm)
01-déc-97	31.00
02-déc-97	32.71
03-déc-97	34.71
04-déc-97	35.88
05-déc-97	33.96

Chacune de ces lignes de données horaires (tableau 3.4) contient :

1. La date à laquelle l'épaisseur du couvert est mesuré
2. L'épaisseur du couvert (cm)

D'autres données prises lors de campagnes sur le terrain contribuent à l'évaluation de l'exactitude des modélisations. Ces données recueillies par des personnes ressources d'Hydro-Québec et de l'INRS-Eau sont les suivantes:

1. Profils de neige à chacune des trois stations mentionnées au point précédent. Ceux-ci incluent, entre autres, la température, la densité, l'épaisseur de chacune des couches de neige, en plus du type et du diamètre des grains composant couches de neige. De plus, les profils de densité et d'épaisseur permettent le calcul de l'équivalent en eau du couvert nival.
2. Mesures ponctuelles d'équivalent en eau et d'épaisseur du couvert nival effectuées sur des lignes de neige à proximité des stations Hydro-Québec 02s, 11e, 19e.

3. Mesures ponctuelles d'équivalent en eau et d'épaisseur de neige effectuées, directement aux stations de données sur le profil du couvert nival, à l'aide d'un carottier.

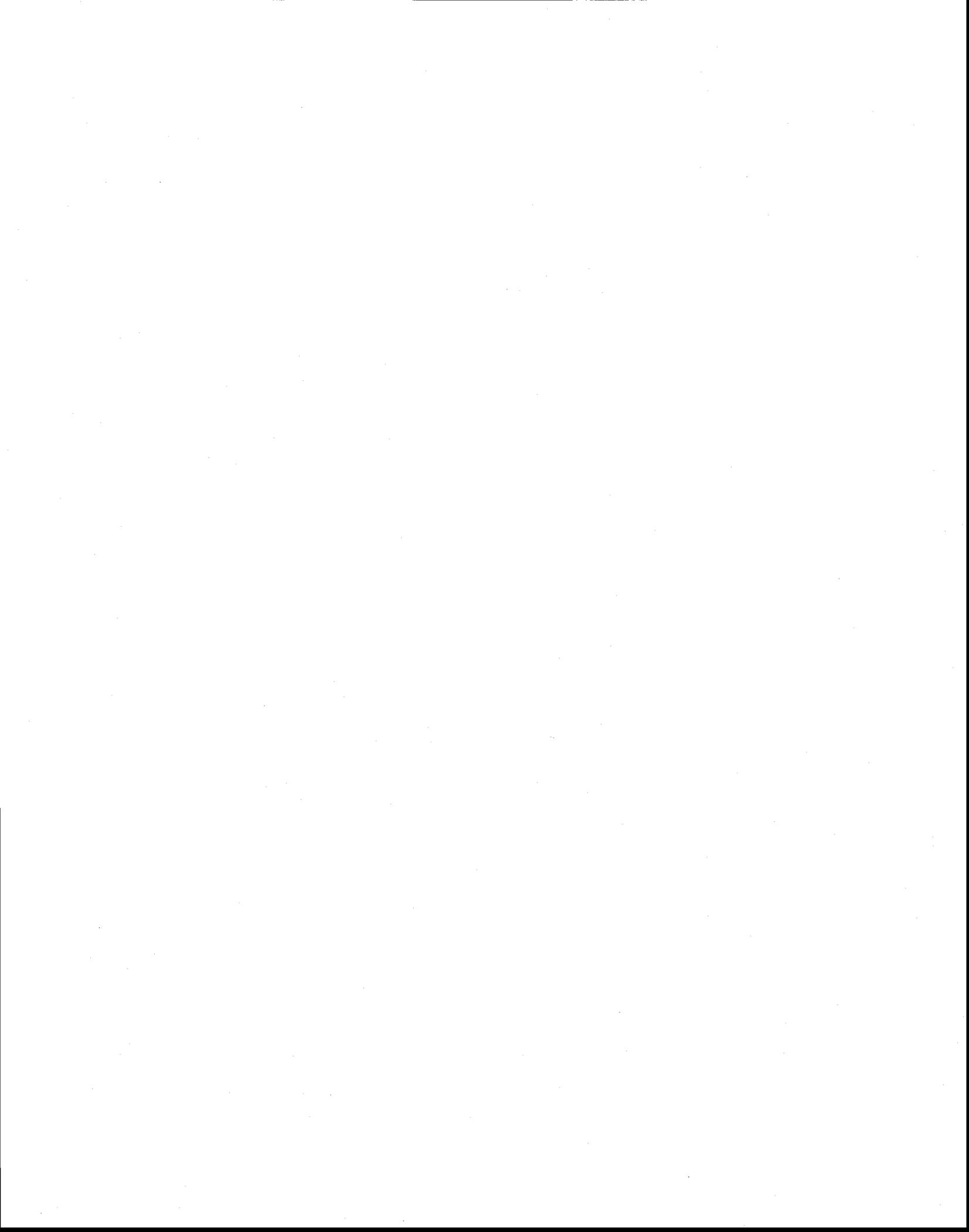
Ces mesures ont été prises généralement à deux reprises lors de chacune des périodes hivernales visées par la présente recherche. Toutefois, certaines données sont inexistantes pour les périodes 1998-1999 et 1999-2000 pour les stations Hydro-Québec 11e et 19e.

## 4 ADAPTATION DU MODÈLE CROCUS À L'ENVIRONNEMENT WINDOWS

---

Préalablement aux modélisations, le modèle CROCUS, a dû être adapté à l'environnement Windows sur micro-ordinateur. Cette adaptation du modèle sous-entend la création d'un programme exécutable à l'aide d'un compilateur fortran (*Fortran PowerStation 4.0* dans le cas présent). Certaines modifications apportées au modèle, ainsi que d'autres appliquées sur les fichiers sources de celui-ci ont été nécessaires pour permettre la création d'un programme exécutable. Ces modifications sont les suivantes :

1. L'ajout d'une condition prévenant la division par zéro dans le calcul de la teneur en eau liquide, en présence d'une couche de neige d'épaisseur nulle.
2. L'édition, en format ASCII-DOS, des fichiers sources CROCUS.H, Namelist.H et PARAM, qui sont des fichiers contenant la liste des variables ainsi que leurs valeurs respectives.
3. La création de programmes exécutables relatifs aux fonctions utilitaires INIPRO, VISUMET et VISUPRO permettant respectivement la création du profil initial du couvert nival, la visualisation du fichier MET, incluant les données météorologiques, et la visualisation des paramètres décrivant l'évolution du couvert nival.



## **5 PRÉTRAITEMENT DES DONNÉES ET MÉTHODOLOGIE**

---

Afin de procéder aux modélisations désirées aux trois sites de mesures expérimentaux, les données décrites à la section 3 doivent être préalablement prétraitées. Un tel prétraitement vise le calcul, l'ajustement et la mise en forme de l'ensemble des paramètres horaires exigés par le modèle sous un fichier de type binaire présenté sous le nom de fichier MET à l'annexe 1 du présent ouvrage. Ainsi, les données doivent être premièrement vérifiées, deuxièmement, complétées et finalement mises en forme.

Dans le cas présent, seules les données de températures et de précipitations proviennent de plusieurs stations. Par conséquent, elles sont sujettes à un prétraitement plus élaboré en raison de leur importance face aux modélisations et de leur singularité quant à leur provenance.

### **5.1 Prétraitement des données de température**

Tel que mentionné, l'ensemble des stations de données sur le profil du couvert nival ainsi que la station YAH sont situées dans des environnements similaires sur le sous-bassin hydrographique LG4 de la rivière La Grande (Baie de James) (figure 3.1). Face à une telle similarité, il est raisonnable de considérer que les mesures horaires de température de l'air sont relativement semblables, puisque les stations sont situées dans une même région climatique. Toutefois, la présence de données de valeurs différentes, de même que le synchronisme différé des valeurs observées peuvent facilement être attribués à la distance entre ces stations et aux caractéristiques microclimatiques propres à chacune d'elles.

Pour permettre la correction des données aberrantes, les valeurs de température moyenne journalière ont tout d'abord été calculées puis portées en graphiques afin d'isoler de façon visuelle les données problématiques en fonction des valeurs des autres stations.

Les graphiques de températures moyennes journalières originales aux stations avant corrections éventuelles sont présentés à l'annexe 2. La figure 5.1 présente un exemple d'un tel graphique.

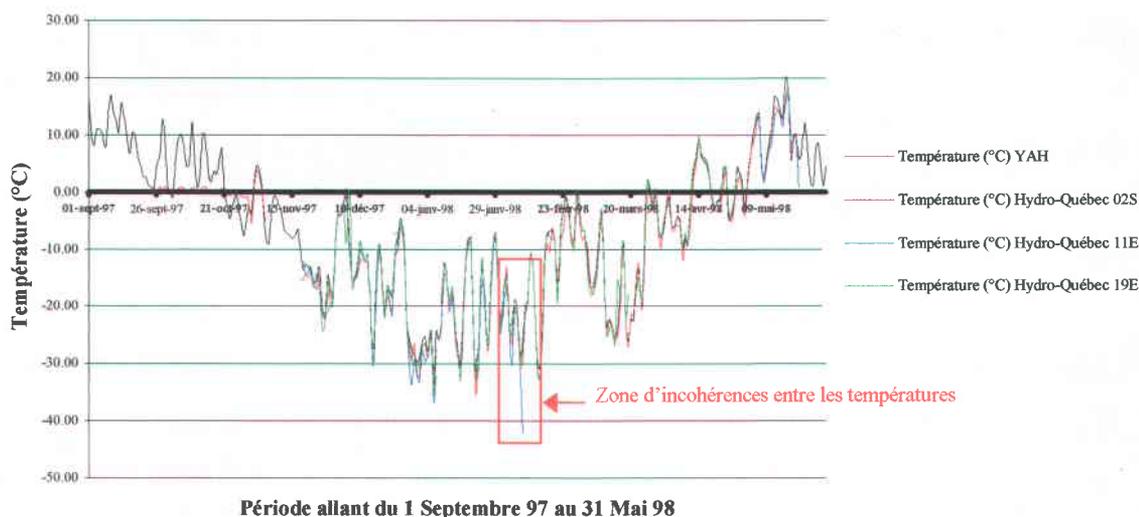


Figure 5.1 Températures moyennes journalières originales aux stations Hydro-Québec 02s, 11e, 19e et YAH pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998

En regard de ces graphiques, les données de températures moyennes journalières pour les stations mentionnées semblent assez similaires, bien que certaines incohérences soient clairement identifiables au cours des trois périodes hivernales présentées. Celles-ci se présentent sous la forme de pics (voir figure 5.1) ou de plateaux de températures qui peuvent être attribués, par exemple, à un mauvais fonctionnement du capteur. Par conséquent, des corrections doivent être apportées pour permettre de rectifier les températures qui semblent aberrantes.

Après avoir identifié visuellement les valeurs aberrantes, une étude statistique simple menée sur les moyennes journalières a permis de cibler précisément les données à corriger. La méthode utilisée dans le cadre de cette étude implique un seuillage par rapport à la moyenne. Elle peut être décrite en respectant les étapes suivantes :

1. Calcul des moyennes de températures entre les stations à partir des moyennes journalières déterminées aux stations pour une date précise en utilisant (n-1) données.

Ex : Moyenne journalière de températures aux stations en date du 08 février 1998.

Stations	Température moyenne journalière de l'air le 4 février 1998
YAH	-23.25
Hydro-Québec 02s	-26.44
Hydro-Québec 11e	-30.25
Hydro-Québec 19e	-24.90

Dans le cas présent, les quatre stations météorologiques présentent de données de température, il sera donc possible de calculer quatre moyennes de température jumelant trois données à la fois.

Ex : Calcul de la moyenne des stations YAH, Hydro-Québec 02s et 11e.

$$\mu_x = \frac{\sum x_i}{N} = \frac{(-23.25) + (-26.44) + (-30.25)}{3} = -26.65$$

## 2. Calcul de la somme des écarts entre la température et la moyenne

Ex : Calcul de la somme des écarts à partir de la moyenne calculée à l'étape précédente.

$$\sum (x_i - \mu_x) = ((-23.25) - (-26.65)) + ((-26.44) - (-26.65)) + ((-30.25) - (-26.65)) = 7.20$$

Les résultats obtenus à partir des calculs précédents peuvent alors être présentés sous la forme suivante :

Stations	Moyenne des températures	Somme des écarts par rapport à la moyenne
YAH, Hydro-Québec 02s, 11e	-26.65	7.20
YAH, Hydro-Québec 02s, 19e	-24.86	3.23
YAH, Hydro-Québec 11e, 19e	-26.13	8.23
Hydro-Québec 02s, 11e, 19e	-27.19	6.10

## 3. Calcul de la somme des intervalles entre les écarts pour évaluer la disparité des données par rapport à la moyenne.

Ex : Calcul de la somme des intervalles entre les écarts calculés au point précédent :

$$\begin{aligned} \sum \text{Intervalles} &= \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (|\text{écart}_i - \text{écart}_j|) = (|7.20 - 3.23|) + (|7.20 - 8.23|) + \\ &(|7.20 - 6.10|) + (|3.23 - 8.23|) + (|3.23 - 6.10|) + (|8.23 - 6.10|) = 16.11 \end{aligned}$$

Dans le cadre de cette étude, un seuil arbitraire 8 a été fixé, c'est-à-dire la valeur à partir de laquelle une donnée de température moyenne journalière est jugée aberrante. Cette même valeur sera substituée par la moyenne des données restantes jugées adéquates.

En effet, dans le prétraitement des données de températures, le seuil mentionné est tout à fait arbitraire et il n'est valable que pour les présentes données, puisqu'il a été déterminé selon les valeurs de somme d'intervalles. Il vise simplement à repérer les valeurs

---

complètement aberrantes. Un tel seuil demeure peu restrictif, ce qui a pour effet de préserver la distribution des données sans trop la restreindre.

Dans l'exemple présenté, la somme des intervalles est de 16.11, ce qui signale la présence d'une donnée aberrante par rapport aux autres. De plus, on constate que la présence de la station Hydro-Québec 11e, pour cette date, augmente sensiblement la somme des écarts par rapport à la moyenne (voir point #2). Ainsi, la valeur de la température moyenne journalière de la station Hydro-Québec 11e sera remplacée par la moyenne des données provenant des trois autres stations, soit la valeur  $-24.86$ . De plus, en accord avec les exigences du modèle, chacune des données horaires de température de l'air, prenant part au calcul de la moyenne journalière problématique, sera remplacée par la moyenne des valeurs mesurées aux autres stations. La totalité de ce processus s'applique en présence de trois valeurs ou plus, disponibles pour une même date.

Il est à noter que la présente recherche ne vise pas à effectuer une étude statistique exhaustive des données utiles aux modélisations. Elle vise plutôt à cibler et à corriger les données aberrantes qui peuvent être attribuées à des bris d'appareil ou encore à un mauvais fonctionnement de celui-ci.

Les graphiques de températures moyennes journalières corrigées aux stations sont présentés à l'annexe 3. La figure 5.2 présente un exemple d'un tel graphique.

L'étape finale du prétraitement de la température consiste à compléter les dates et heures pour lesquelles les données sont absentes en leur attribuant une valeur moyenne calculée à partir de données existantes aux autres stations. Toutefois, ce calcul ne peut inclure les valeurs ayant déjà été corrigées puisqu'elles résultent également du calcul de la moyenne des autres stations. Dans ce cas, seul les valeurs n'ayant pas été corrigées, sont utilisées au calcul de la moyenne qui sera attribuée aux heures et dates auxquelles les données sont inexistantes.

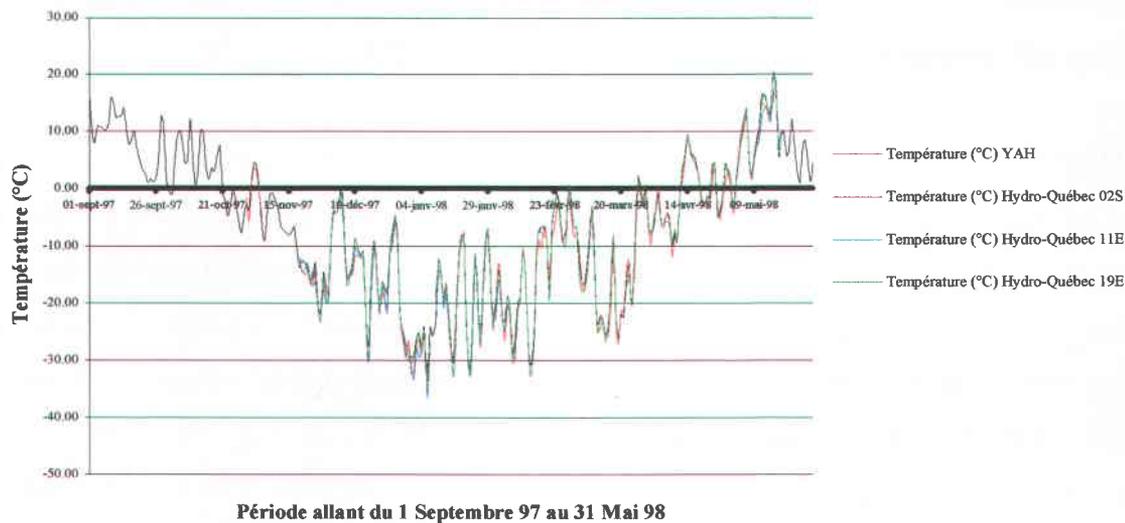


Figure 5.2 Températures moyennes journalières corrigées aux stations Hydro-Québec 02s, 11e, 19e et YAH pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998

À la suite de cette dernière étape, l'ensemble des fichiers de température de l'air aux stations Hydro-Québec 02s, 11e et 19e sont prêts à être incorporés au fichier MET du modèle CROCUS, en vue de procéder aux modélisations désirées pour les périodes mentionnées

## 5.2 Prétraitement des données de précipitations

Tout comme les stations Hydro-Québec 02s, 11e et 19e, les stations LG4-Sud, Est et YAH sont aussi situées dans des environnements similaires sur le sous-bassin hydrographique LG4 de la rivière La Grande (Baie de James) (figure 3.1). Par conséquent, étant donné l'intérêt porté aux précipitations tombées au cours de la saison froide, il est raisonnable de considérer que les mesures de précipitations totales journalières sont relativement similaires, puisque les stations prennent place dans une même région climatique et sont sujettes à des conditions météorologiques semblables. Toutefois, la présence de données de valeurs différentes peut être justifiée par des événements locaux et propres aux stations. Dans le cas des précipitations hivernales, il est

sensé de croire à l'occurrence de précipitations solides le même jour à chacune des stations utilisées, toutefois, il est fort probable que l'épaisseur des chutes de neige puisse varier d'une station à l'autre.

Pour vérifier les similitudes entre les stations, les valeurs des précipitations totales journalières, exprimées en équivalent en eau, ont tout d'abord été portées en graphiques afin de comparer les mesures effectuées aux stations. Ces graphiques comprennent une représentation des précipitations aux différentes stations pour les périodes de modélisation (voir exemple figures 5.3 et 5.4), des graphiques d'intercomparaison des mesures de précipitations entre les diverses stations (voir exemple figure 5.5 et 5.6) ainsi que des courbes de précipitations totales journalières cumulées entre les stations (voir exemple figures 5.7 et 5.8). En raison de l'inexistence de données pour certaines dates, il est à noter que les graphiques d'intercomparaison ainsi que les courbes de précipitations totales cumulées prennent en compte uniquement les dates pour lesquelles les stations suscitées présentent des mesures de précipitations.

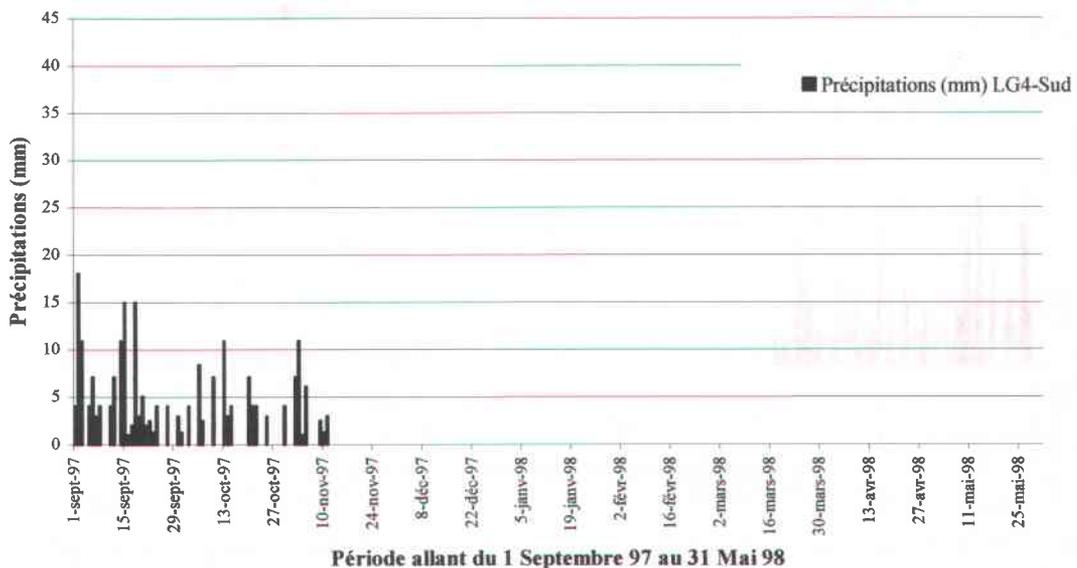


Figure 5.3 Précipitations totales journalières à la station LG4-Sud pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998

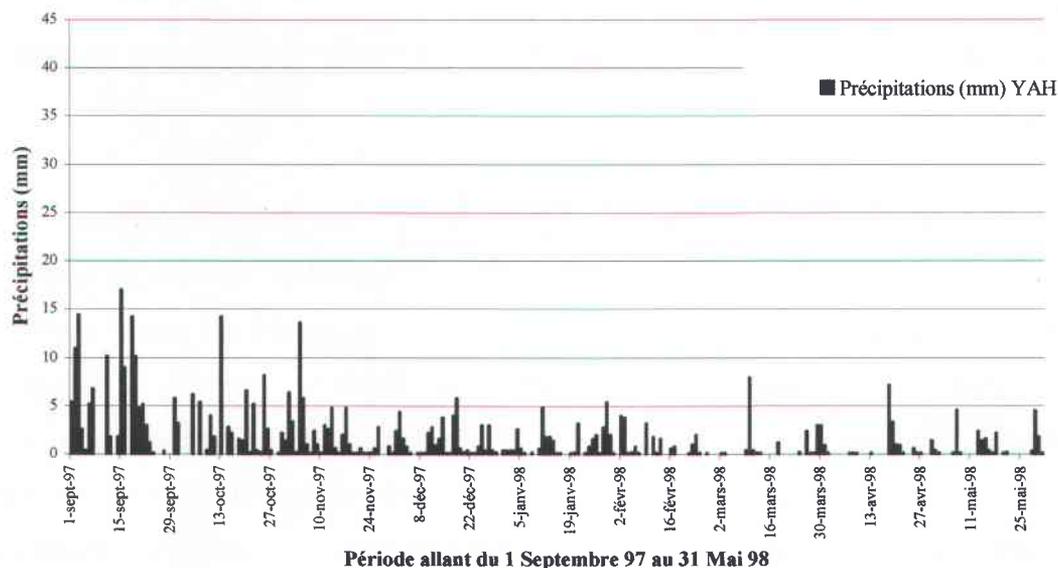


Figure 5.4 Précipitations totales journalières à la station YAH pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998

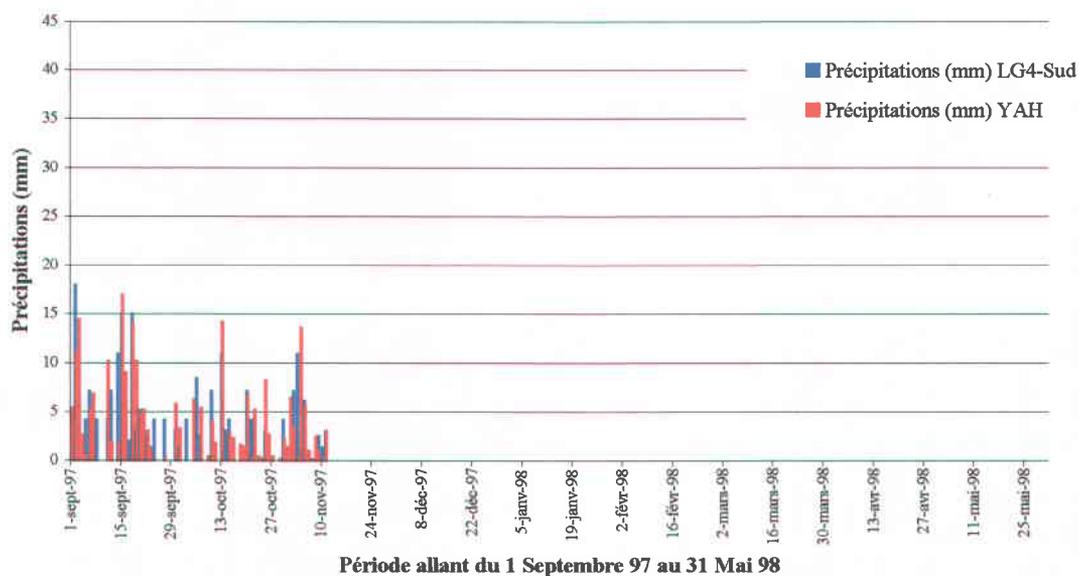


Figure 5.5 Intercomparaison des précipitations totales journalières entre les stations LG4-Sud et YAH pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1999

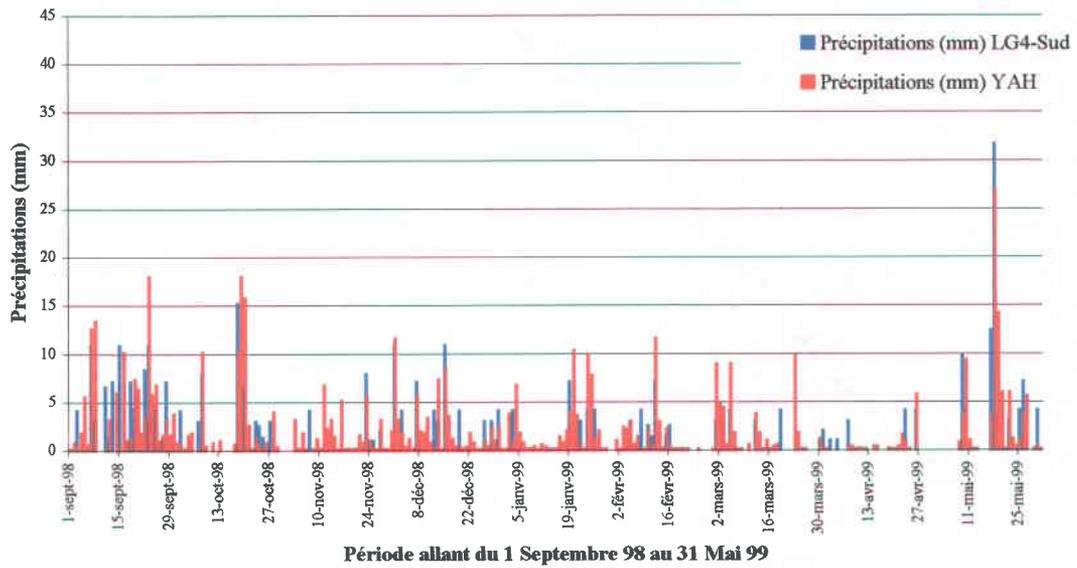


Figure 5.6 Intercomparaison des précipitations totales journalières entre les stations LG4-Sud et YAH pour la période allant du 1 septembre 1998 au 31 mai 1999

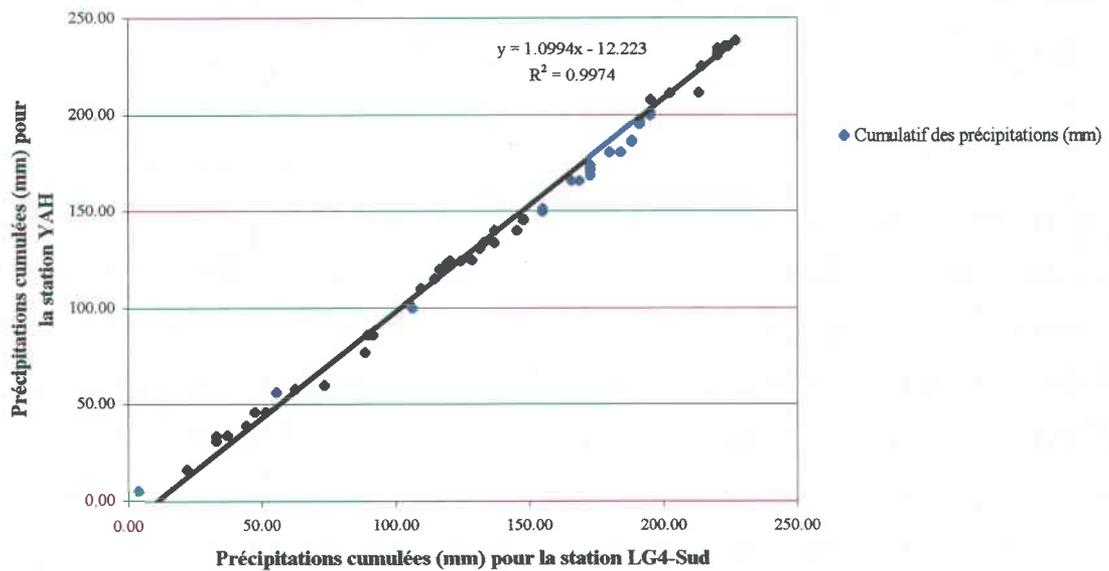


Figure 5.7 Précipitations cumulées pour les stations LG4-Sud et YAH pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998

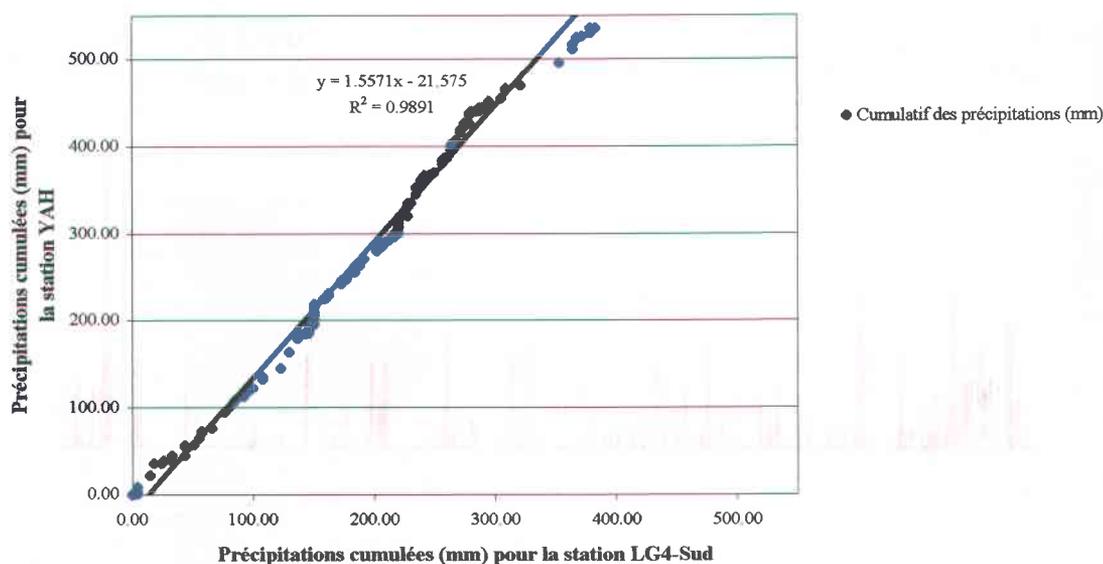


Figure 5.8 Précipitations cumulées pour les stations LG4-Sud et YAH pour la période allant du 1 septembre 1998 au 31 mai 1999

L'ensemble des graphiques relatifs aux précipitations totales journalières sont présentés à l'annexe 4.

À la lumière de ces graphiques, les données de précipitations totales journalières aux stations présentent moins de similarité que celles de températures, et par le fait même, plus de singularité d'une station à l'autre. D'ailleurs, de telles différences peuvent être observées entre les stations LG4-Est et Sud et LG4-Est et YAH et ce, pour les trois périodes hivernales. Celles-ci peuvent être attribuées aux événements locaux qui ne touchent, par exemple, qu'une seule station ou encore au fonctionnement même du capteur. Toutefois, l'ensemble des périodes hivernales présentées offre en général une bonne corrélation entre les données telles qu'exprimées par des courbes de précipitations cumulées. Cependant, la station LG4-Est semble sous-estimer les précipitations enregistrées aux autres stations. En raison de ces observations, il est préférable de favoriser les stations LG4-Sud et YAH puisque leurs données sont fortement corrélées bien que les mesures de précipitations à la station LG4-Sud sous-estiment celles de la station YAH pour les périodes comprises entre le 1 septembre 1997 et le 31 mai 1998

---

(figure 5.7) et entre le 1 septembre 1998 et le 31 mai 1999 (figure 5.8). De plus, en présence de données de précipitations manquantes pour la station LG4-Sud, celles de la station YAH seront utilisées pour compléter les fichiers défectueux et vice versa.

Plus précisément la station LG4-Sud présente uniquement des données pour les dates comprises entre le 1 septembre 1997 et le 11 novembre 1997 lors de la première période hivernale (figure 5.3). Ces mêmes données sont toutefois fortement corrélées avec celles mesurées à la station YAH (figure 5.7). Ainsi les dates manquantes seront comblées par les mesures de précipitation journalières enregistrées à la station YAH. Le fichier des précipitations totales journalières combinées des stations LG4-Sud et YAH sera donc utilisé afin d'effectuer les modélisations aux stations INRS-Eau 02s et 11e pour la période comprise entre le 1 septembre 1997 et le 31 mai 1998. Les données de précipitations enregistrées à la station YAH seront quant à elles utilisées à la station Hydro-Québec 19e pour cette même période.

Pour la période hivernale suivante, celle comprise entre le 1 septembre 1998 et le 31 mai 1999, il est à noter que la station LG4-sud sous-estime la station YAH (figure 5.8). En effet, malgré un bon fonctionnement des deux stations les précipitations totalisent 382.60mm pour la station LG4-Sud et 534.90mm pour la station YAH. Une telle différence suggère une certaine variabilité des précipitations sur l'ensemble du secteur d'étude. Par conséquent, les données de précipitation de la station YAH seront favorisées pour cette période en raison de leur qualité quant à leur mesure et à leur représentativité face au degré d'incertitude de la station automatique LG4-Sud. Le fichier de précipitations totales journalières de la station YAH pour cette période sera donc utilisé pour réaliser l'ensemble des modélisations. Toutefois, en raison de la grande variabilité des mesures de précipitations observée entre les stations LG4-Sud et YAH, il est raisonnable de croire que les mesures de précipitations utilisées pour cette période, nécessitent un certain ajustement visant à atteindre des valeurs plus représentatives pour les stations Hydro-Québec 02s et 11e.

Finalement, pour la période comprise entre le 1 septembre 1999 et le 31 mai 2000, les modélisations à la station Hydro-Québec 02s seront effectuées à l'aide des précipitations journalières de la station LG4-Sud en raison de l'absence de données disponibles pour la station YAH.

### **5.3 Mise en forme des données et correction des précipitations**

Suite aux prétraitements des données, de nouveaux paramètres doivent être calculés, après quoi, l'ensemble des données et paramètres sont mis en forme sous un seul fichier pour ensuite être lus par le modèle CROCUS. Ces deux étapes précédant les modélisations sont exécutées à l'aide d'un programme utilitaire créé à cet effet. Ce programme fait appel à l'ensemble des fichiers de données présentés précédemment afin de créer le fichier MET qui est directement parcouru par le modèle. Ce dernier décrit l'évolution des conditions météorologiques au pas de temps horaire. C'est un fichier d'entrée de type binaire à accès direct qui contient une ligne de données par heure. Chacune de ces lignes contient 9 paramètres et a une longueur de 36 octets, tel que présenté à l'annexe 1.

Il est à noter que, dans le cadre de cette recherche, les données météorologiques manquantes sont extraites des fichiers provenant de la station YAH en raison de l'inexistence de fichiers aussi complets aux stations Hydro-Québec 02s, 11e et 19e.

---

Afin de créer le fichier MET nécessaire au lancement de CROCUS, le programme utilitaire créé procède aux étapes suivantes :

1. Lecture des différents fichiers contenant les données et les caractéristiques nécessaires à la création du fichier MET. Ces fichiers sont les suivants :
  - Températures
  - Précipitations
  - Données météorologiques complémentaires
  - Caractéristiques géographiques de la station (latitude, longitude, altitude)
  - Codes de précipitations auxquels se joignent la phase et le poids correspondant
2. Répartition des précipitations totales journalières en événements horaires à l'aide des codes de précipitations ainsi que des poids attribués à ces mêmes codes. Ces mêmes poids ont été déterminés selon les codes de précipitations par exemple : le code S+ qui représente une chute de neige plus abondante que le code S se verra attribuer un poids de 2.00 alors que le code S se verra quant à lui attribuer un poids de 1.00. Le poids attribué en fonction de l'intensité des événements enregistrés permet simplement une répartition non-uniforme des précipitations en favorisant par exemple, une tempête face à une simple chute de neige.

Plus précisément, si on observe les codes suivants S+ à 10H00 et S à 11H00, pour lesquels les poids respectifs sont 2.00 et 1.00, et que les précipitations totalisent 2mm au cours de la journée. Elles seront alors réparties par pondération c'est-à-dire :

$$\frac{2.00}{2.00 + 1.00} = \frac{2}{3} * 2mm = 1.33 \text{ à } 10H00 \text{ et } \frac{1.00}{2.00 + 1.00} = \frac{1}{3} * 2mm = 0.67 \text{ à } 11H00.$$

3. Attribution de la phase de la précipitation en accord avec celle attribuée aux codes de précipitations. Cette dernière prend une forme entre 0 et 1 ou 0 est associé à la pluie et 1 à la neige. Elle peut prendre également des valeurs intermédiaires, tout à l'image de précipitations mixtes.

Il faut noter que les codes de précipitations proviennent de la station YAH et sont les seules données permettant la redistribution des précipitations totales journalières. Les codes présents dans les fichiers de cette station, ainsi que la phase et le poids qui leur sont attribués, sont présentés à l'annexe 5.

4. Suite à la répartition horaire des précipitations et l'attribution de la phase de la précipitation, le programme utilitaire procède à la correction des précipitations. En effet, il est clairement reconnu que les mesures effectuées à l'aide de précipitomètres sous-estiment les mesures de précipitations réelles. D'après les travaux de Goodison *et al.*, (1998), cette sous-estimation est induite par des phénomènes comme :

- le vent
- la perte de poids par évaporation
- la présence de faibles précipitations
- le type d'écran chapeautant l'orifice du précipitomètre
- le transport de la neige par le vent (« *Blowing Snow* »)

Ainsi, la littérature présente un nombre important d'équations permettant la correction des précipitations en fonction des différents types de précipitomètres.

En présence de précipitomètres de type Belfort munis d'un écran de type Nipher, les équations de corrections des précipitations utilisées dans le cadre de cette recherche sont les suivantes :

1. Pour des précipitations solides :

$$CRNIPHER = 100 - 0.44 * W_s^2 - 1.98 * W_s \quad (5.1)$$

2. Pour des précipitations mixtes :

$$CRNIPHER = 97.29 - 3.18 * W_s + 0.58 * T_{\max} - 0.67 * T_{\min} \quad (5.2)$$

Dans ces équations,  $W_s$  représente la vitesse du vent (m/s),  $T_{\max}$  la température journalière maximum de l'air (°C),  $T_{\min}$  la température journalière minimum de l'air (°C) et CRNIPHER le ratio entre la quantité de précipitations mesurées et la quantité réelle de précipitations (Goodison *et al.*, 1998). Il est à noter que la vitesse du vent est extraite des données fournies par la station YAH alors que les températures sont disponibles aux stations Hydro-Québec 02s, 11e et 19e. Dans le cadre de cette recherche, la hauteur à laquelle le vent est mesuré à la station YAH (10m) diffère de celle de l'orifice du précipitomètre (1.5m). Toutefois, l'influence de la variation de la vitesse du vent, entre ces deux hauteurs, sur la correction des précipitations demeure négligeable face à la distance entre les stations de mesure des précipitations et les sites de modélisations auxquels sont utilisées ces précipitations. De plus, une diminution de la vitesse du vent à proximité de la surface contribuerait à l'augmentation du ratio CRNIPHER (eq. 5.1 et 5.2) et occasionnerait une correction régionale supplémentaire des précipitations.

5. Conversion de la température en degrés Kelvin (°K)

6. Conversion de la vitesse du vent en m/s

7. Calcul approximatif de l'humidité relative de l'air à l'aide de la température de l'air et celle du point de rosée toutes deux disponibles dans le cas présent. En effet, la littérature présente de nombreuses formules dont la suivante, qui repose sur la relation empirique élaborée par Tetens :

$$H_{rel} \cong 100 \left[ 10^{\frac{7.5 * 237.3 * (T_d - T)}{(237.3 + T_d) * (237.3 + T)}} \right] \quad (5.3)$$

où  $T$  représente la température de l'air et  $T_d$  celle du point de rosée. Cette dernière formule permet d'obtenir des résultats acceptables.

Toutefois, dans le cadre de cette recherche, il est raisonnable de croire que l'erreur sera plus importante puisque la mesure de la température du point de rosée s'effectue uniquement à la station YAH.

8. Conversion de la nébulosité en dixièmes de la voûte céleste.
9. Calcul du rayonnement infrarouge incident par la formule de Berlianda qui, tel que mentionné à la section 2.2.3, utilise en entrée les données météorologiques de températures, de nébulosité et de tension de vapeur. Dans le cas présent, la tension de vapeur ( $e$ ) peut être estimée à l'aide de la formule suivante :

$$e = H_{rel} * e_{sat} \quad (5.4)$$

où  $H_{rel}$  représente l'humidité relative calculée précédemment,  $e_{sat}$ , la tension de vapeur saturante calculée par la sous routine *zew* du programme utilitaire présenté à l'annexe 6.

10. Calcul des rayonnements solaires théoriques directs et diffus. Cette décomposition du rayonnement solaire global est possible si, tel que mentionné à l'annexe 1, les variables météorologiques de température, humidité de l'air et nébulosité du ciel sont connues.

L'ensemble du texte et du code de ce programme est présenté à l'annexe 6.

Finalement, avant de lancer le modèle, l'ensemble des fichiers contenant les profils initiaux de neige au sol doivent être créés pour chaque station ainsi que pour chacune des périodes au cours de laquelle le suivi du couvert nival sera effectué. Ces fichiers peuvent être générés à l'aide du programme INIPRO. Dans le cadre de cette recherche, ces fichiers ne présentent pas de neige au sol au début de chaque période visée. De plus, le nombre d'heures de simulation, la date du début de la simulation, la latitude, la longitude et l'altitude du lieu de la simulation doivent d'être indiqués au modèle afin de réaliser les modélisations désirées.

## **6 ÉTALONNAGE DU MODÈLE CROCUS ET AJUSTEMENT DES DONNÉES D'ENTRÉE**

---

Après avoir constitué l'ensemble des fichiers d'entrée du modèle CROCUS ainsi qu'après avoir modifié la liste des paramètres, tel qu'indiqué au chapitre précédent, ce dernier peut alors être lancé à l'aide d'un compilateur, dans le but d'obtenir les modélisations désirées. Puisque la version de CROCUS mise à notre disposition fournit des résultats sous une forme textuelle, l'utilisation d'un logiciel graphique comme Excel, permet de bénéficier du support visuel plus adéquat à la présentation de ces résultats.

### **6.1 Influence de la correction des précipitations sur les modélisations**

Avant de procéder à la présentation complète des résultats initiaux obtenus, il est grandement pertinent de présenter, dans un premier temps, l'influence de la correction des précipitations sur l'évolution de l'épaisseur du couvert de neige et de son équivalent en eau modélisés. Cette influence peut aisément être mise en valeur en comparant les résultats obtenus avant et après correction des précipitations. Ainsi, dans un premier temps, les profils obtenus avant la correction des précipitations à la station Hydro-Québec 02s au cours de la période comprise entre le 1 septembre 1997 et le 31 mai 1998, sont présentées aux figures 6.1 et 6.2.

Les figures 6.1 et 6.2 démontrent clairement la sous-estimation des précipitations par les précipitomètres. En effet, l'évolution de l'équivalent en eau présente des valeurs nettement plus faibles que celles mesurées directement sur le terrain alors que celle de l'épaisseur du couvert de neige demeure inférieure à la fois aux données enregistrées par la sonde et aux mesures effectuées sur le terrain. De tels écarts peuvent être en partie justifiés par la provenance des mesures de précipitations. Toutefois, ils signalent également l'erreur sur la mesure de ces précipitations.

De plus, le secteur d'études est exposé aux vents qui est un facteur grandement influent dans le pouvoir de captation des précipitomètres.

Par conséquent, il est fort pertinent de procéder à la correction des précipitations tel que mentionné au chapitre 5. Les résultats ainsi obtenus pour la station Hydro-Québec 02s sont également présentés à la suite aux figures 6.1 et 6.2. Ceux-ci correspondent aux résultats initiaux obtenus à l'aide du modèle CROCUS.

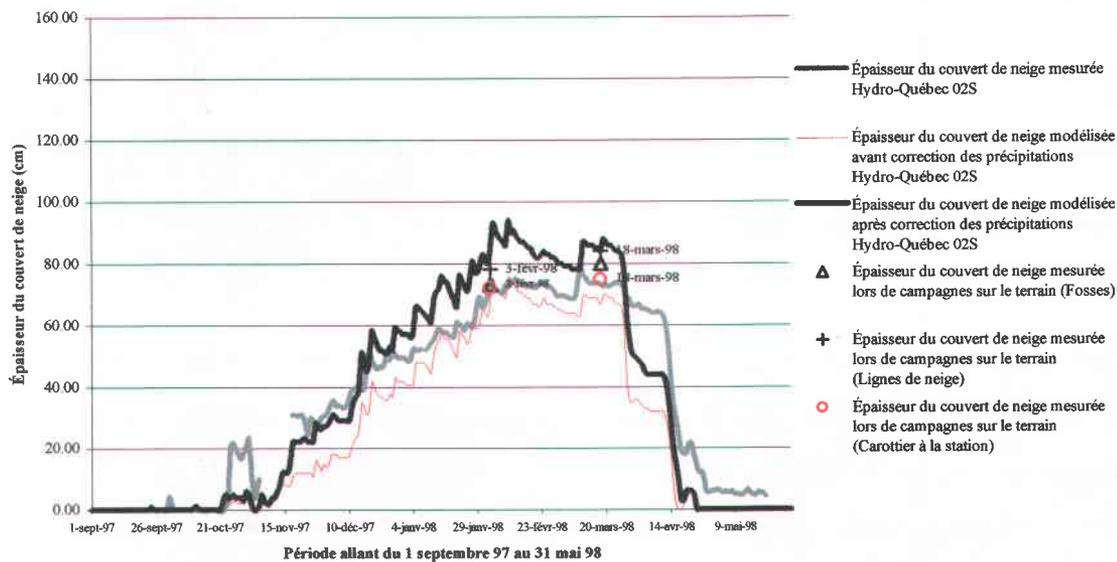


Figure 6.1 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 02s après correction des précipitations

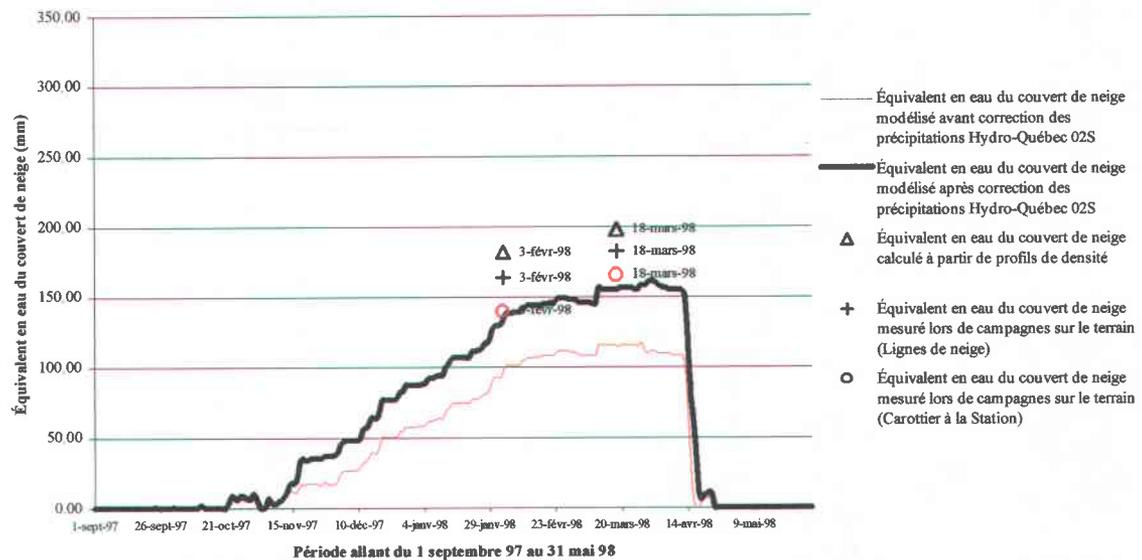


Figure 6.2 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 02s après correction des précipitations

Ces résultats initiaux présentés se démarquent nettement de ceux obtenus avant la correction des précipitations. En effet, l'évolution de l'équivalent en eau atteint des valeurs s'approchant de celles mesurées directement sur le terrain (figure 6.2) alors que celle de l'épaisseur de neige dépasse les données mesurées par la sonde, sauf au début de la période d'accumulation et lors de la période de fonte printanière (figure 6.1).

En plus de l'évolution de l'épaisseur du couvert de neige et de son équivalent en eau, le modèle permet la représentation, pour des dates précises, des profils de densité et de températures du couvert de neige. Ainsi, ces profils peuvent être présentés pour les dates auxquelles de telles mesures ont été effectuées sur le terrain. Les figures 6.3, 6.4, 6.5 et 6.6 présentent donc les profils de densité et de températures pour la station Hydro-Québec 02s pour les dates du 3 février et du 18 mars.

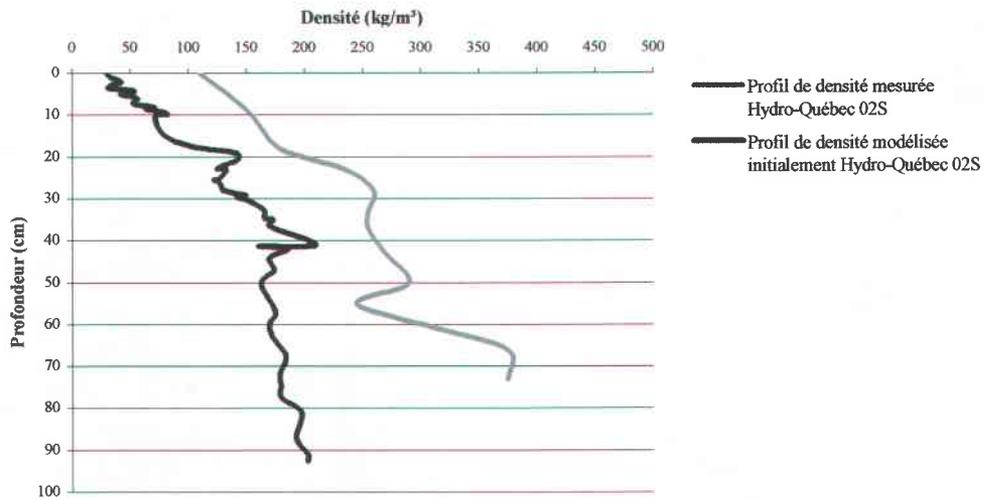


Figure 6.3 Profil de densité modélisée et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 3 février 1998

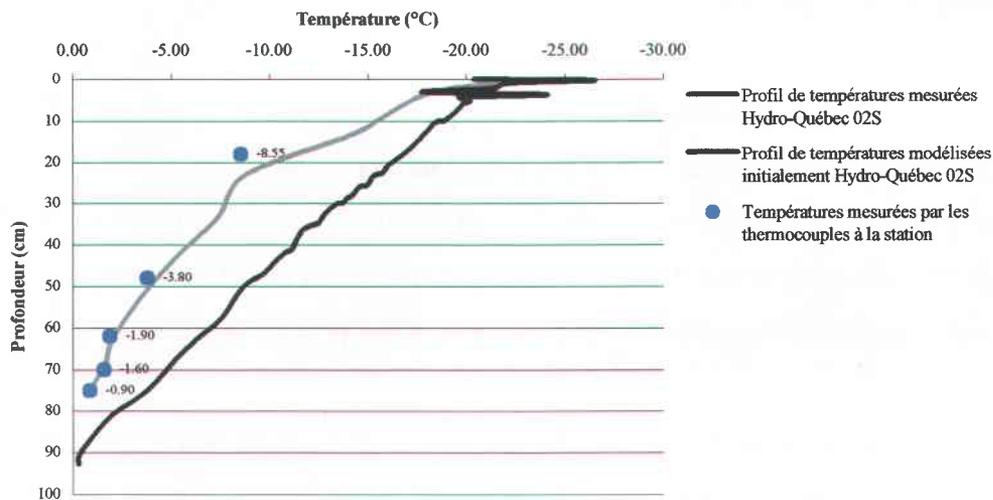


Figure 6.4 Profil de températures modélisées et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date du 3 février 1998.

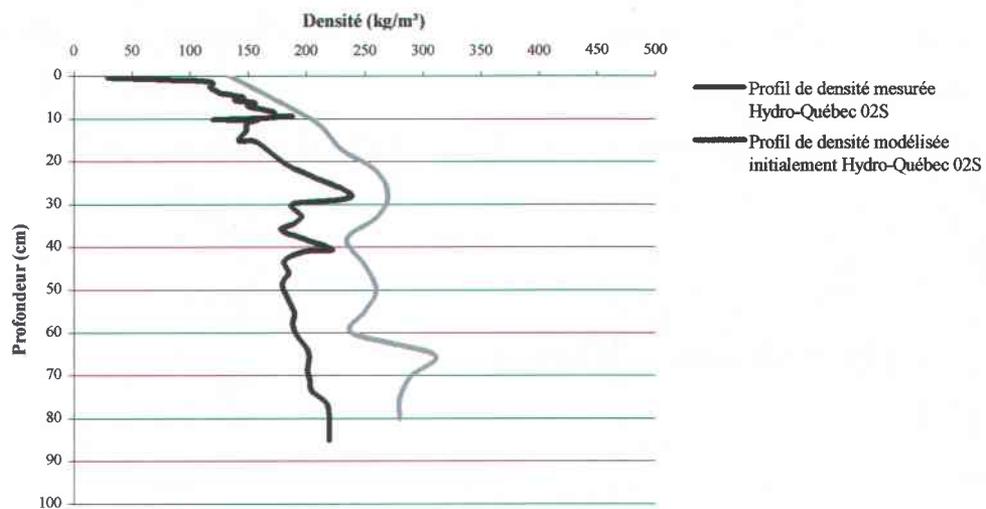


Figure 6.5 Profil de densité modélisée et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 18 mars 1998

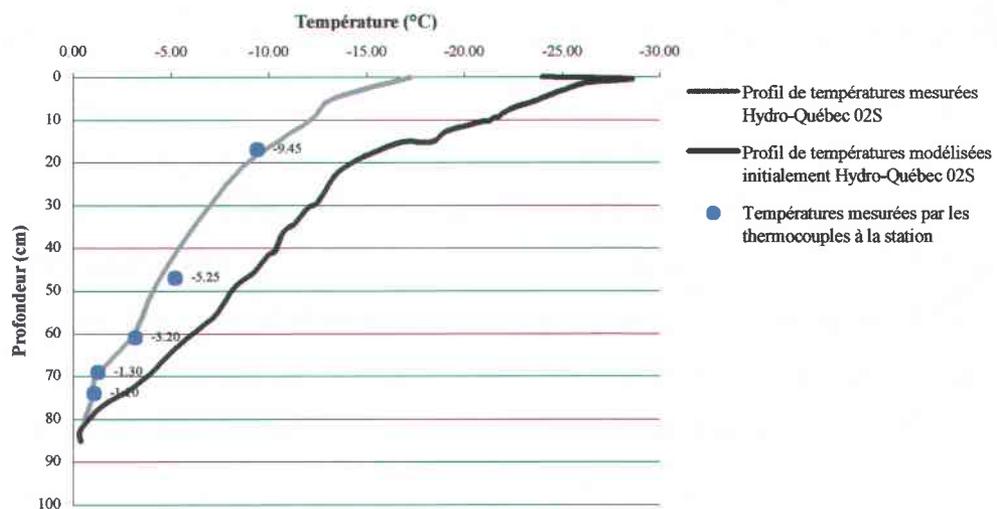


Figure 6.6 Profil de températures modélisées et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date du 18 mars 1998.

Il est à noter que la totalité des résultats initiaux pour l'ensemble des stations sont présentés à l'annexe 7.

Bien que la correction des précipitations contribue à l'amélioration des résultats et ce, pour l'ensemble des stations, certaines lacunes demeurent et exigent l'ajustement du modèle CROCUS afin de mieux représenter l'évolution des différents paramètres mis en valeur.

## 6.2 Analyse des résultats initiaux

Dans le but de cibler les paramètres qui doivent être ajustés aux conditions du Nord du Québec, un regard plus critique sur les résultats présentés aux figures 6.1 à 6.6 permet alors de souligner les erreurs suivantes.

1. L'épaisseur du couvert de neige (figure 6.1) est sensiblement trop importante au cours de la période d'accumulation, c'est-à-dire entre le 10 décembre 1997 et le 10 février 1998. L'équivalent en eau du couvert nival (figure 6.2) demeure, quant à lui, strictement inférieur aux valeurs prises sur le terrain ou encore calculées à partir des profils de densité. Par conséquent, les profils de densité modélisée (figure 6.3 et 6.5) sous-estiment ceux mesurés. De tels écarts peuvent être attribués, entre autres, à la provenance des mesures de précipitations et également à l'incapacité du modèle à traiter les phénomènes de tassement de la neige causé par le vent (Brun et Martin, 1997) alors que les stations Hydro-Québec 02s, 11e et 19e sont situées sur des sites exposés aux vents.
2. L'évolution du couvert nival (figure 6.1) est caractérisée par d'importantes fluctuations de l'épaisseur du manteau neigeux tout au long de la période d'accumulation mentionnée au point précédent. Ces fluctuations se démarquent par des pointes suivies de l'affaissement de l'épaisseur du couvert de neige. Elles résultent, par exemple, de l'attribution de densités trop faibles aux couches de neige fraîche ajoutées, suivies de leur tassement. En effet, la densité de la neige en surface, en milieu nordique sujet à des températures assez froides, comme celui du

bassin hydrographique LG4, est souvent beaucoup plus grande que celle observée sur des sites plus tempérés comme les sites français pour lesquels le modèle CROCUS a été développé et préalablement ajusté.

3. La fonte drastique du couvert de neige (figure 6.1) survenant lors de la période printanière comprise entre le 27 mars et le 31 mai 1998. Cette fonte trop accentuée résulte, entre autres, du réchauffement trop rapide des couches de neige et de l'écoulement, vers les couches profondes de l'eau de fonte, facilité par la faible densité du profil de neige (figure 6.5). En effet, cette dernière contribue au réchauffement du couvert en raison du transfert de chaleur entre l'eau et la neige.
4. Les profils de températures fournies par le modèle (figure 6.4 et 6.6) sont caractérisés par des températures généralement plus froides que celles mesurées et enregistrées à différentes profondeurs par les thermocouples de chacune des stations. Cet écart, qui est toutefois beaucoup plus important en surface qu'en profondeur peut être attribué à une trop forte conductivité thermique du couvert en surface ou encore à un trop faible albédo des couches de neige soumises au rayonnement infrarouge et solaire. Cet écart peut également être attribué à des valeurs erronées de rayonnement, sachant que leur calcul s'effectue à l'aide de données provenant en partie de la station YAH (Nébulosité, température du point de rosée) et qu'il ne prend pas en compte la présence de végétation à proximité des stations.

Pour permettre l'obtention de meilleures modélisations des caractéristiques du couvert nival, certains ajustements seront apportés aux modèles. Cet étalonnage sera effectué à l'aide des résultats obtenus pour la station Hydro-Québec 02s qui présente un suivi soutenu et rigoureux du couvert de neige pour les deux périodes hivernales modélisées.

Une fois le modèle CROCUS étalonné, il pourra alors être testé sur l'ensemble des stations et périodes restantes.

### 6.3 Étalonnage du modèle CROCUS

L'étalonnage du modèle, permettant l'obtention de meilleures modélisations, vise essentiellement l'ajustement du modèle CROCUS aux conditions météorologiques du secteur d'étude, par l'intermédiaire des paramètres mis en évidence à la section 2.2.3.

De plus, une étude statistique permettra de mieux comparer les modélisations pour certains points précis de cet étalonnage et ainsi limiter la subjectivité des commentaires. Afin de rendre possible de telles comparaisons, l'étude mentionnée utilisera la distance quadratique moyenne (rmse) comme indicateur d'erreur entre les valeurs modélisées et les valeurs mesurées. Cette distance quadratique peut être présentée selon l'équation suivante :

$$rmse = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{mes} - x_{mod})^2}{n-1}} \quad (6.1)$$

Dans l'équation précédente  $n$  représente le nombre de données,  $x_{mes}$  et  $x_{mod}$  les données mesurées et modélisées.

Cet indicateur d'erreur pourra être utilisé dans le but d'évaluer la qualité des modélisations par rapport aux données mesurées. Plus précisément, son application s'étendra sur l'évolution de l'épaisseur du couvert de neige ainsi que sur les profils de densité et de température. L'étalonnage pourra être vérifié en certains points par la diminution progressive de cette distance quadratique moyenne.

Il est à noter que les valeurs de distances quadratiques moyennes calculées pour les résultats initiaux (figure 6.1 à 6.6) sont respectivement de 10.800cm pour l'évolution de l'épaisseur, 96.163kg/m<sup>3</sup> pour les profils de densité combiné et de 4.962°C pour les profils de températures combinés. Toutefois, les valeurs obtenues pour les profils de densité et de températures sont approximatives en raison de la différence entre la

profondeur des points de mesure et celle calculée à partir de l'épaisseur des couches de neige générées par le modèle.

### 6.3.1 Ajustement du tassement

Tel que mentionné précédemment, l'épaisseur du couvert neige modélisée surestime celle mesurée par la sonde alors que l'équivalent en eau modélisé est quant à lui inférieur aux valeurs obtenues sur le terrain (figure 6.1 et 6.2). Ces deux erreurs se reflètent conjointement dans les profils de densité trop faible fournis par le modèle (figure 6.3 et 6.5). En ce sens, tel que mentionné à la section 2.2.3.1, certaines études présentent également, des problèmes similaires de sous-estimation systématique de la densité de la neige dans le cadre de modélisation en milieu polaire (Brun et Martin 1997). Afin de rectifier cette sous-estimation face aux conditions météorologiques des différents sites, le calcul du tassement mécanique utilisé par CROCUS doit être modifié. Cette modification peut être intégrée à l'équation du calcul de la viscosité (Eq. 2.19). Plus précisément, la valeur de  $zsvisc$  doit être diminuée en tout temps.

Dans le but de déterminer les modifications à apporter à cette équation, la comparaison avec d'autres modèles contribue à la compréhension du tassement et à l'ajustement du présent modèle. Le modèle SNTHRM propose, quant à lui, des équations différentes qui toutefois peuvent être présentées dans la même optique. Il est à noter que SNTHRM considère également la neige comme un fluide newtonien et propose un calcul du tassement basé sur les travaux d'Anderson (1976).

#### 1. Calcul du tassement occasionné par la métamorphose des grains

$$\frac{1}{\Delta z} \frac{\partial \Delta z}{\partial t} = -2.778 \times 10^{-6} * c3 * c4 * e^{-0.04(273.15 - T_s)} \quad (6.2)$$

$$\begin{aligned} c3 = c4 = 1 & \quad \text{si } \rho_i = 0 \text{ et } \rho_i \leq 150 \text{ kg/m}^3 \\ c3 = e^{[-0.046(\rho_i - 150)]} & \quad \text{si } \rho_i \geq 150 \text{ kg/m}^3 \\ c4 = 2 & \quad \text{si } \rho_i \geq 0. \end{aligned}$$

Dans l'équation 6.2,  $z$  représente l'épaisseur de la couche de neige,  $\delta\Delta z/\delta t$ , le taux de compaction de la couche de la neige pour un temps  $t$ ,  $T_s$ , la température de la couche de neige,  $\rho_i$  représente le ratio entre la masse d'eau libre présente dans la couche de neige et le volume total de la couche de neige ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) alors que  $\rho_s$ , celui entre la masse de neige sur le volume total de la couche de neige ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

## 2. Calcul du tassement induit par la charge de neige

$$\frac{1}{\Delta z} \frac{\partial(\Delta z)}{\partial t} = \frac{-P_s}{\eta_0} e^{-c5(273.15-T_s)} * e^{-c6\rho_s} \quad (6.3)$$

Dans l'équation 6.3,  $P_s$  représente la charge induite par les couches de neige supérieures et  $\rho_s$ , la densité de la couche de neige. De plus,  $\eta_0 = 3.6\text{E}06 \text{ N s}/\text{m}^2$ ,  $c5 = 0.08\text{K}^{-1}$  et  $c6 = 0.021 \text{ m}^3/\text{kg}$

Ainsi, l'équation générale du tassement peut être présentée sous la forme suivante :

$$\text{CR} = -\frac{1}{\Delta z} \frac{\partial\Delta z}{\partial t} = 2.778 \times 10^{-6} * c3 * c4 * e^{-0.04(273.15-T_s)} + \frac{-P_s}{3.6 \times 10^6} e^{-0.08(273.15-T_s)} * e^{-0.021\rho_s} \quad (6.4)$$

où CR représente le taux de compaction fractionnaire de la couche de neige.

Pour permettre son intégration au modèle et faciliter sa comparaison avec l'équation présente dans CROCUS, le calcul du taux de compaction fractionnaire(CR) peut être exprimé sous la forme suivante :

$$\text{CR} = -2.778 \times 10^{-6} * c3 * c4 * e^{-0.04(273.15-T_s)} - zssmas * 2.777 \text{E} - 07 e^{-0.08(273.15-T_s)} * e^{-0.021\rho_s} \quad (6.5)$$

où chacune des variables indépendantes ( $T_s$ ,  $\rho_s$ ,  $zmass$ ) sont identiques à celles présentes dans les équations du modèle CROCUS (Eq 2.19 et 2.20). Toutefois, la densité ( $\rho_i$ ) est exprimée en  $\text{kg}/\text{m}^3$  et la masse ( $zssmas$ ) en kg. Il est à noter que ces équations sont extraites du rapport de Jordan (1991).

Face aux similitudes entre les deux équations, l'implantation de celle proposée par SNTHRM dans CROCUS offre un atout important dans la comparaison du comportement des méthodes de calcul du tassement. Ainsi, l'intégration de l'équation du tassement utilisée par le modèle SNTHRM (Eq. 6.5) permet d'obtenir les résultats présentés aux figures 6.7 et 6.8

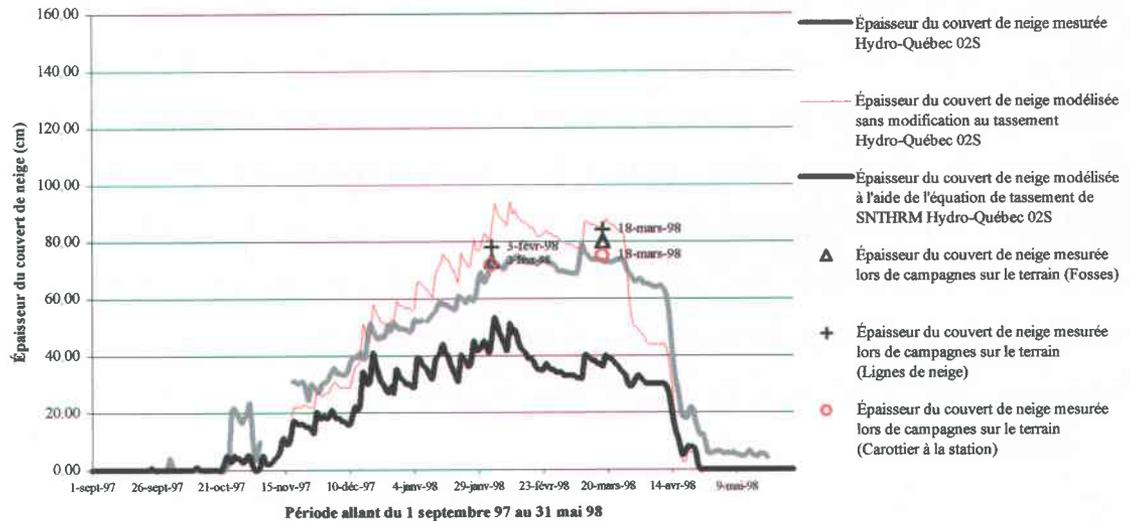


Figure 6.7 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 02s après l'intégration dans CROCUS de l'équation de tassement utilisée par SNTHRM

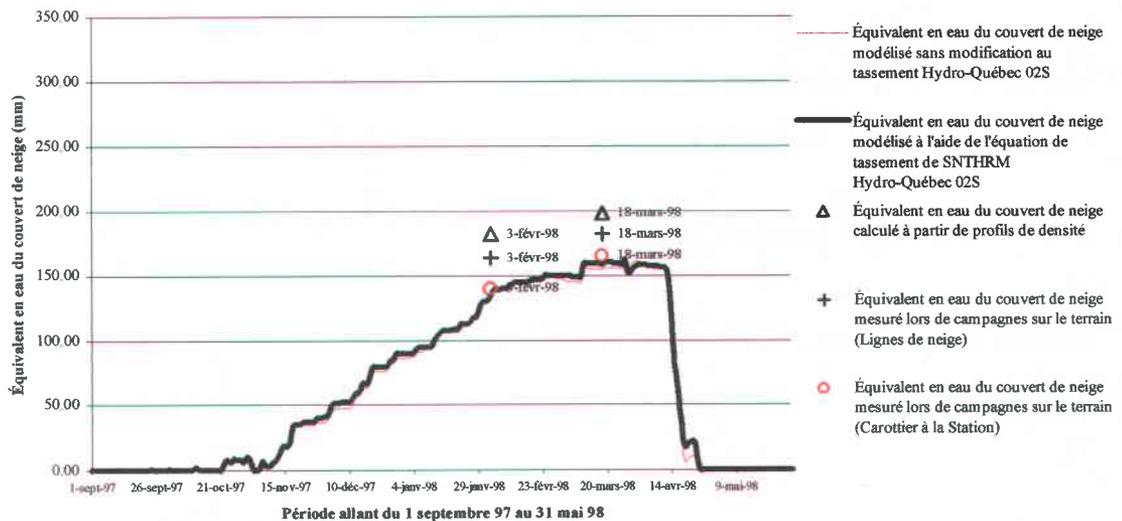


Figure 6.8 Évolution de l'équivalent en eau du couvert de neige à la station Hydro-Québec 02s après l'intégration dans CROCUS de l'équation de tassement utilisée par SNTHRM.

Face aux résultats obtenus à l'aide de l'équation de tassement proposée par le modèle SNTHRM (figure 6.7 et 6.8), il est facile de remarquer que la compaction du couvert de neige est beaucoup trop importante en comparaison avec les résultats précédents. Cette densification se signale par la sous-estimation de l'épaisseur du couvert tout au long de la période hivernale alors que l'évolution de l'équivalent en eau subit très peu de changement par rapport aux résultats antérieurs. Toutefois, la magnitude du tassement occasionnée par cette dernière équation favorise la possibilité de modifier le calcul initial suggéré par CROCUS pour ainsi obtenir un tassement raisonnable compris à l'intérieur des limites des résultats obtenus à partir des équations originales relatives à chacun des modèles. De plus, l'équation du calcul de la viscosité (Eq. 2.19) fait appel à des coefficients d'ajustement dont la valeur résulte d'études menées sur des sites français soumis à des conditions météorologiques différentes de celles des sites de la présente recherche. Par conséquent, la modification de ces coefficients semble d'autant plus appropriée.

L'unique modification apportée au calcul du tassement mécanique repose sur l'ajustement du coefficient VRO11 pour lequel la valeur sera augmentée à 1.00 dans le calcul de la viscosité, de chaque couche de neige, présenté précédemment (Eq. 2.19). Un tel ajustement provoque simplement la multiplication par 4 de la viscosité de chacune des couches et par le fait même la modification du coefficient de tassement présent dans le calcul de la nouvelle épaisseur (Eq. 2.20) repris à l'équation 6.6.

$$E_p = E_{p_i} * \text{Max} \left( 0.3, \left( 1 - \frac{(3600 * \text{Max}(z_{ssmas} * \cos(\text{incli} * \pi / 180), 1))}{z_{svisc}} \right) \right) \quad (6.6)$$

Suite à cet ajustement, les résultats modélisés prennent alors la forme présentée aux figures 6.9 et 6.10.

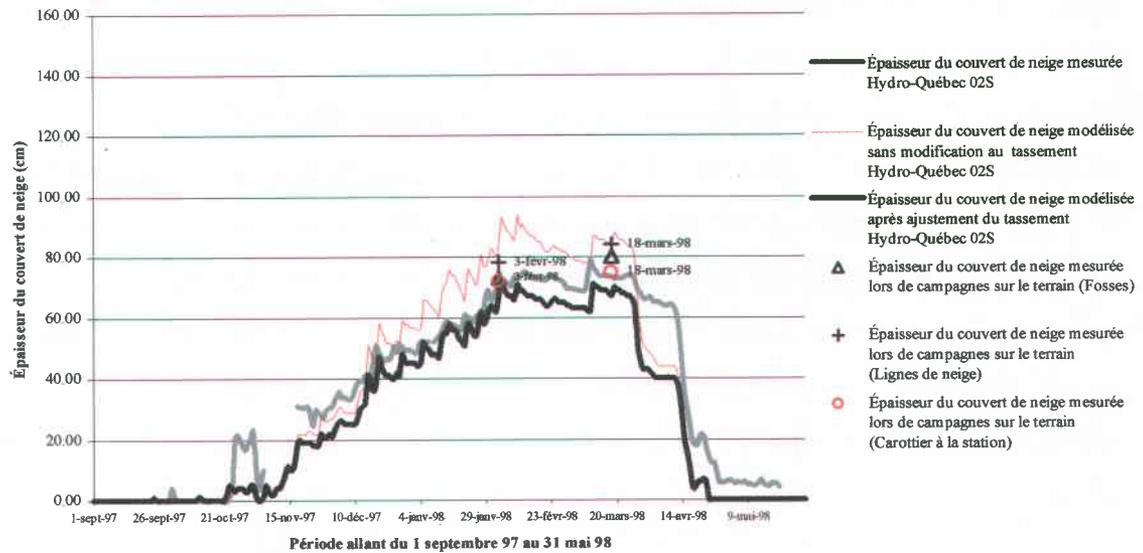


Figure 6.9 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 02s après ajustement du tassement dans le modèle CROCUS

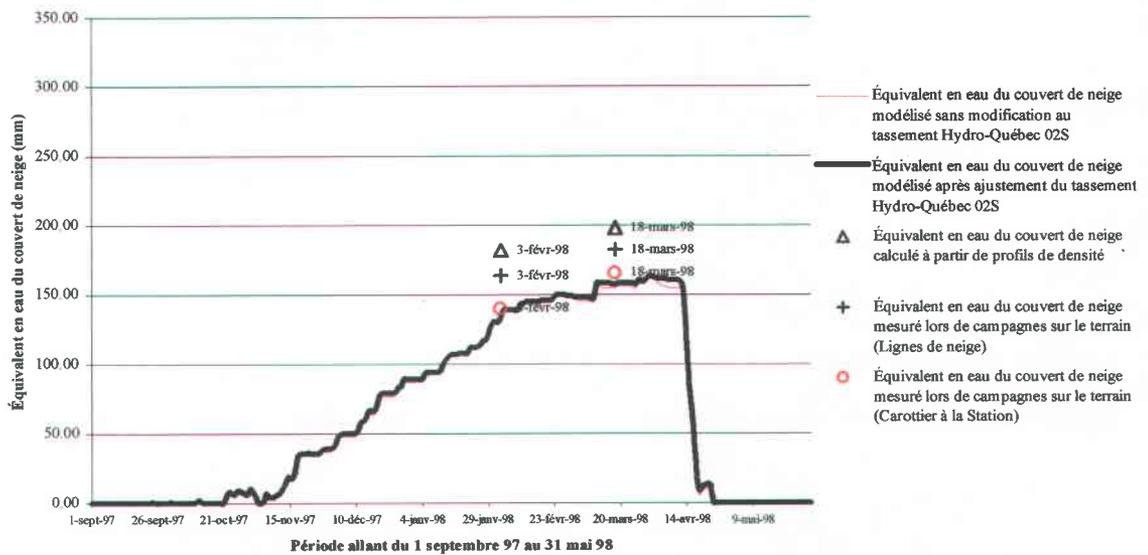


Figure 6.10 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 02s après ajustement du tassement dans le modèle CROCUS

Les résultats obtenus suite à l'ajustement du tassement soulignent une nette amélioration de l'évolution de l'épaisseur du couvert de neige pour laquelle la nouvelle valeur de la distance quadratique moyenne passe à 9.777cm en comparaison avec la valeur initiale de 10.800cm. En ce sens, celle-ci prend alors une forme s'approchant de celle enregistrée par la station bien qu'elle souffre de fluctuations importantes et que la fonte printanière demeure à la fois précipitée et trop hâtive (figure 6.9). Il faut également noter que le modèle sous-estime légèrement l'importance du couvert tout comme celui de l'équivalent en eau. Néanmoins, les profils de densité, obtenus à partir de ces résultats, subissent une augmentation notable (figure 6.11 et 6.12) sans toutefois rejoindre ceux mesurés sur le terrain.

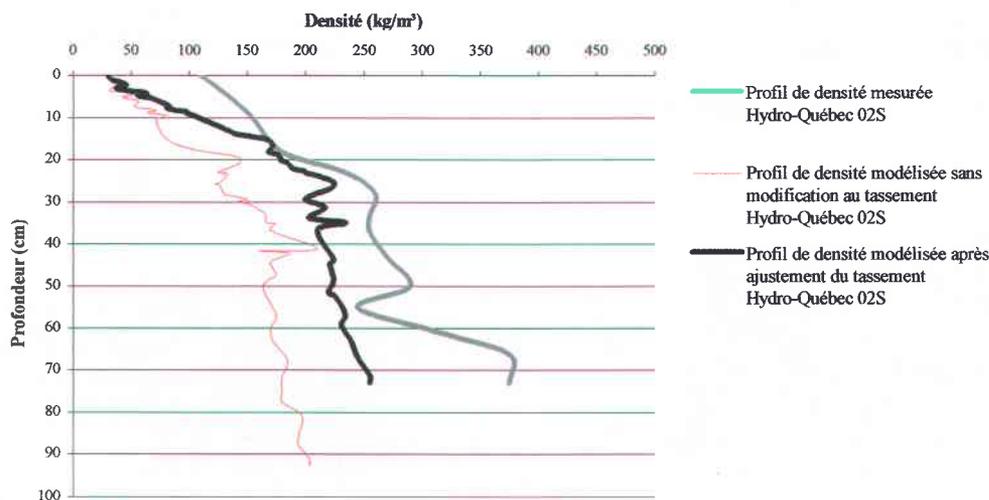


Figure 6.11 Profil de densité modélisée, après ajustement du tassement dans CROCUS, et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 3 février 1998

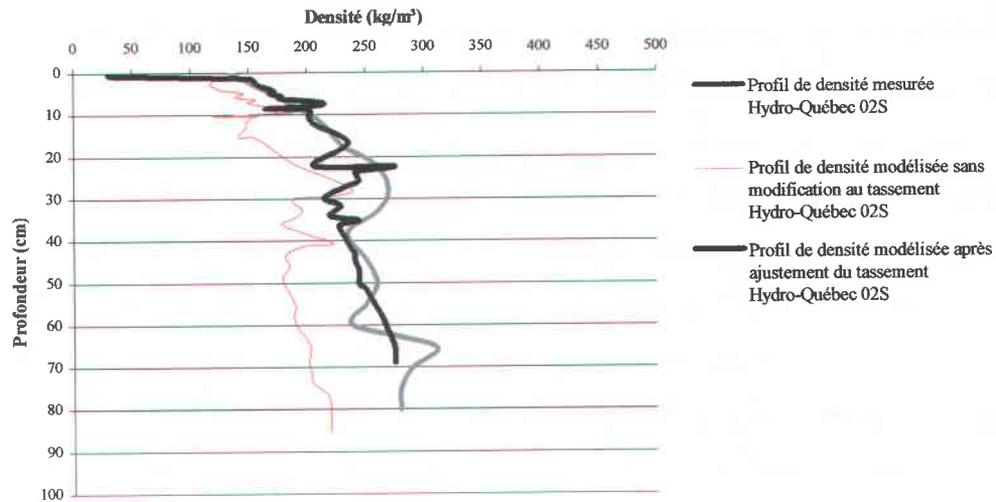


Figure 6.12 Profil de densité modélisée, après ajustement du tassement dans CROCUS, et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 18 mars 1998

Par comparaison avec les résultats antérieurs, les profils de densité modélisée (figures 6.11 et 6.12) sont grandement améliorés. En effet, la nouvelle valeur de la distance quadratique est de  $59.690 \text{ kg/m}^3$  par rapport à la valeur initiale  $96.163 \text{ kg/m}^3$ . Toutefois, la densité des couches de neige en surface est beaucoup trop faible, ce qui témoigne d'un biais dans le calcul de la densité de la neige fraîche. Ainsi, d'autres corrections doivent être apportées au modèle CROCUS.

### 6.3.2 Ajustement du calcul de la densité de la neige fraîche

Bien que l'épaisseur du couvert de neige modélisée présente une évolution comparable à celle mesurée à la station, elle souffre également de fluctuations assez importantes qui se signalent par des augmentations drastiques suivies d'un tassement sévère du couvert de neige et ce, au cours de la période d'accumulation comprise entre le 10 décembre 1997 et le 10 février 1998 (figure 6.9).

Ces fluctuations peuvent être attribuées au calcul de la densité de la neige fraîche qui octroie des valeurs de densité trop faible qui se traduisent par une épaisseur trop grande. En ce sens, des études antérieures ont démontré que la densité de la neige en surface, en milieu nordique exposé au vent et soumis à des températures assez froides est souvent beaucoup plus grande que celle en milieu faiblement exposé aux vents (Brun et Martin, 1997). Le modèle CROCUS présente quant à lui un calcul de la densité de la neige fraîche comportant des coefficients ajustés pour des sites plus faiblement exposés à l'action du vent et soumis à des températures plus tempérées (Essery *et al.*, 1999). De plus le modèle ne tient pas compte de l'effet du vent sur la densification du couvert. Ainsi, afin d'obtenir des densités de neige fraîche plus importante et de permettre la prise en compte indirecte de l'action du vent, l'équation du modèle permettant ce calcul (Eq. 2.21) doit être modifiée.

Les modifications apportées à l'équation du calcul de la densité de la neige fraîche (Eq. 2.21) sont décrites ainsi:

1. Pour des températures supérieures à  $-5^{\circ}\text{C}$ , l'équation utilisée reste la même, toutefois pour des températures inférieures à  $-5^{\circ}\text{C}$ , l'équation prend alors la forme suivante :

$$AHRO1 = 0.094 + 0.003 * (AHT1 - 273.15) + 0.026 * (AHV1 * 0.01)^{0.5} \quad (6.7)$$

Cette nouvelle équation assure le calcul de densité plus élevée pour des températures plus froides, ce qui permet l'intégration de façon indirecte de l'action du vent, tel que mentionné précédemment.

2. Le seuil de densité minimale de la neige fraîche est augmenté à  $0.05\text{g/cm}^3$  pour ainsi limiter de façon plus importante la présence de valeurs trop faibles rarement rencontrées en région nordique.
3. Le seuil minimal de précipitations ( $0.05\text{mm}$ ) est abaissé à  $0.01\text{mm}$  dans le but de considérer la présence de très faibles précipitations horaires résultantes de la répartition de faibles événements journaliers.

Par conséquent, la représentation graphique des précédentes modifications prend alors la forme suivante :

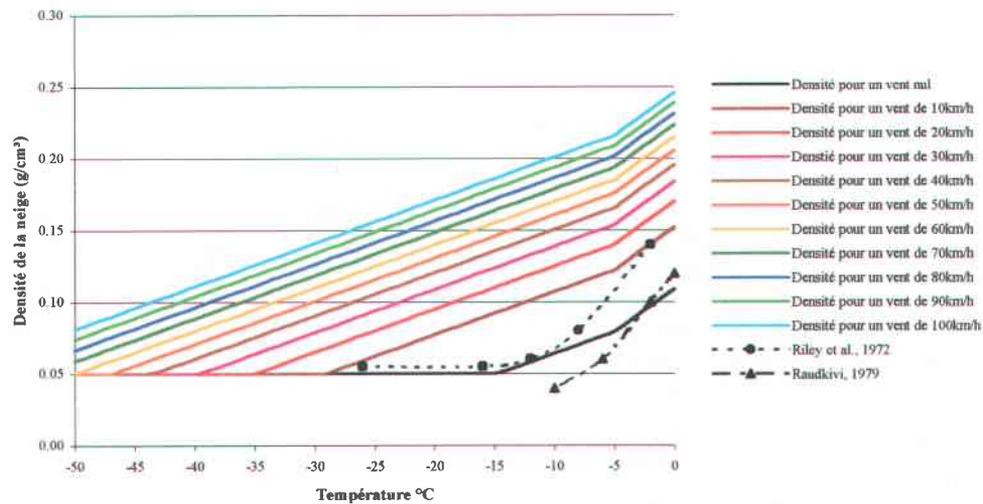


Figure 6.13. Représentation graphique du calcul modifié de la densité de la neige fraîche effectué par CROCUS en fonction de la température et du vent

La courbe résultante du calcul modifié de la densité de la neige fraîche pour un vent nul s'apparente alors à celles proposées par Raudkivi, 1979 et Riley et al., 1972 (Langham, 1981).

Suite à ces modifications, le modèle permet d'obtenir les modélisations présentées aux figures 6.14, 6.15, 6.16 et 6.17.

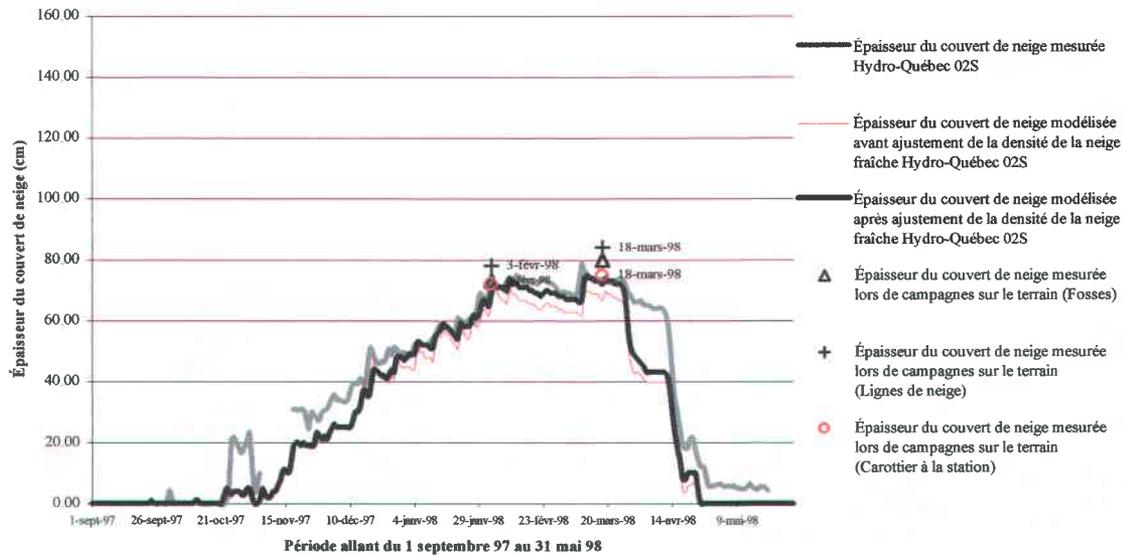


Figure 6.14 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 02s après ajustement du calcul de la densité de la neige fraîche dans CROCUS

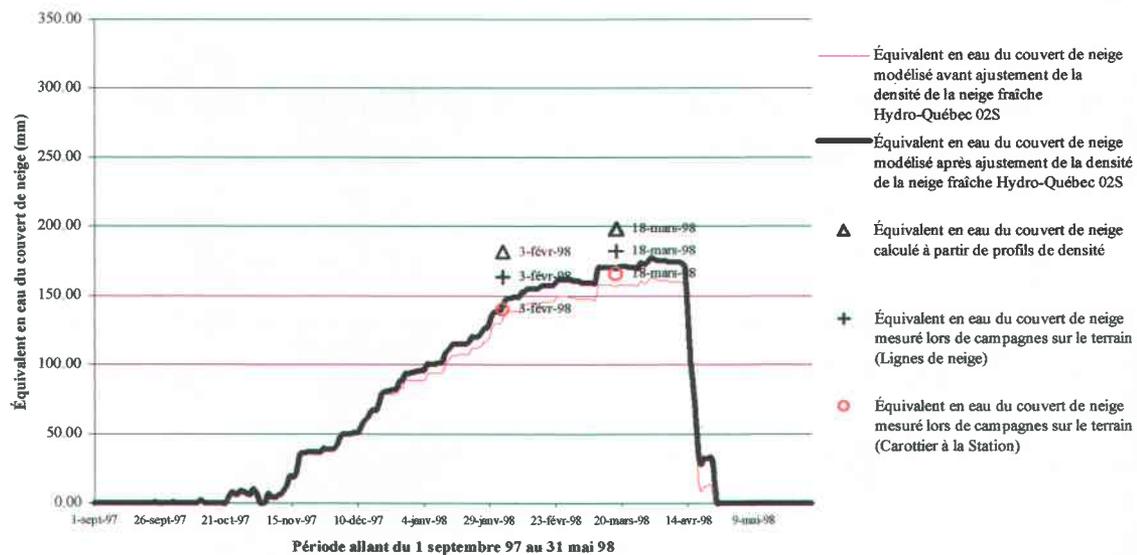


Figure 6.15 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 02s après ajustement du calcul de la densité de la neige fraîche dans CROCUS

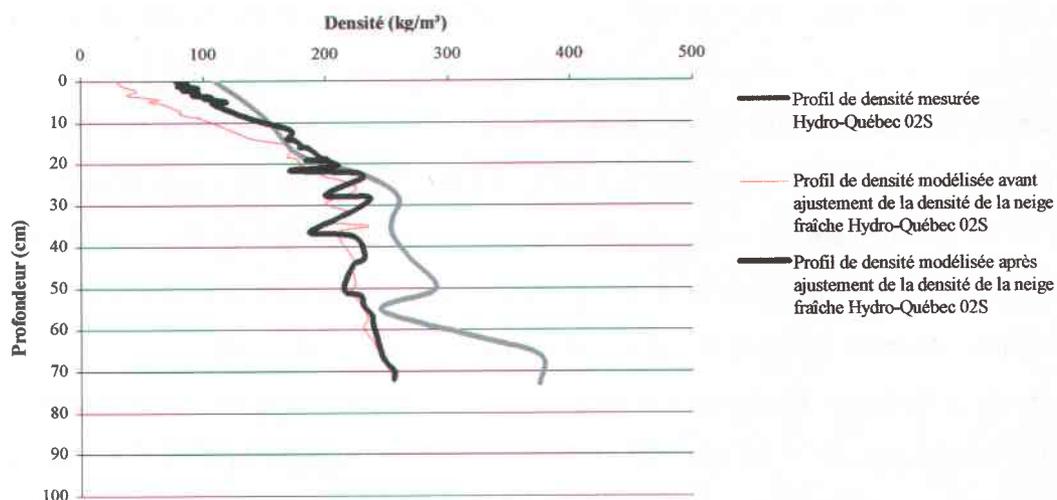


Figure 6.16 Profil de densité modélisée, après ajustement du calcul de la densité de la neige fraîche dans CROCUS, et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 3 février 1998

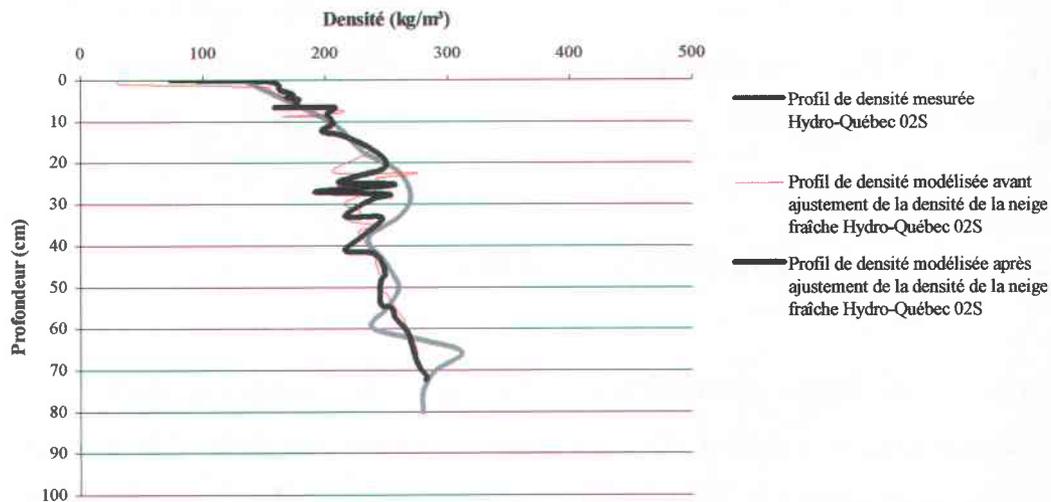


Figure 6.17 Profil de densité modélisée, après ajustement du calcul de la densité de la neige fraîche dans CROCUS, et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 18 mars 1998

Les nouveaux résultats obtenus, suite aux modifications apportées au calcul de la densité de la neige fraîche, présentent des améliorations à la fois, dans le suivi de l'évolution de l'épaisseur du couvert nival, dans celui de l'équivalent en eau et dans la modélisation des profils de densité. Plus précisément, l'évolution de l'épaisseur de neige (figure 6.14) se rapproche grandement de celle mesurée à la station en raison de l'adoucissement des fluctuations induites par l'ajout de neige fraîche plus dense bien que la période de fonte printanière demeure trop hâtive. D'ailleurs, ce rapprochement se signale également par la valeur de la distance quadratique moyenne qui passe à 8.189cm en comparaison avec la valeur précédente de 9.777cm. De plus, la prise en compte des faibles mesures de précipitations horaires par l'abaissement du seuil de précipitations contribue à l'augmentation de l'équivalent en eau du couvert (figure 6.15) et par le fait même, à l'augmentation de l'épaisseur de ce dernier. Finalement, l'augmentation de la densité de la neige fraîche permet de combler l'écart entre la densité modélisée de la neige en surface et celle mesurée (figures 6.16 et 6.17) créant ainsi un rapprochement des profils de densité modélisée et observée. Cette augmentation permet également d'abaisser la valeur de la distance quadratique moyenne à 45.947kg/m<sup>3</sup> par rapport à la valeur précédente de 59.690kg/m<sup>3</sup>.

### 6.3.3 Ajustement de la fonte printanière

Bien que la modélisation de l'évolution de l'épaisseur du couvert s'approche grandement de celle mesurée par la station, celle-ci présente une fonte printanière à la fois trop hâtive et trop rapide (figure 6.14). Dans le cadre de cette recherche, il est assez difficile de cibler un paramètre responsable de ce phénomène en raison de la complexité des processus de fonte qui sont déterminés par un nombre considérable de facteurs contribuant à éliminer ou à réduire le déficit calorifique du couvert de neige. Ces facteurs sont entre autres :

- L'augmentation du rayonnement solaire de courte longueur d'onde absorbé par le stock de neige;
- Le rayonnement net dans l'infrarouge thermique à l'interface air-neige ;

- Le gain ou la perte de chaleur par sublimation, condensation ou évaporation à l'interface neige-air ;
- Le transfert convectif de chaleur sensible à l'interface neige-air (Flux turbulents);
- L'advection de chaleur ou de froid par les précipitations.

En raison du nombre de facteurs et de l'imprécision des données d'entrée du modèle calculées, aux stations Hydro-Québec 02s, 11e, 19e, à partir de mesures effectuées à la station YAH, il est fort peu pertinent de tenter de modifier les processus physiques qui sont déterminants dans l'évolution du couvert de neige. En ce sens, la modification des transferts convectifs de chaleur sensible à l'interface neige-air aussi appelé flux turbulents, semble un juste compromis puisque ce processus gagne en importance lors de période de réchauffement. De plus, la présente recherche ne vise pas à modifier dans sa totalité ce processus mais seulement l'ajustement d'un paramètre afin de réduire ces échanges convectifs de chaleurs.

Tel que mentionné à la section 2.2.3.3, le modèle CROCUS fait appel à plusieurs paramètres permettant le calcul des flux turbulents. Ces paramètres-ci incluent entre autres, deux coefficients empiriques appelés VCU2 et VCU3 prenant part à la linéarisation des échanges turbulents. Par conséquent, il est raisonnable de tenter de déterminer de nouveaux coefficients propres aux présents sites d'étude. Bien qu'il soit impossible de mener une étude exhaustive conduisant à la détermination de nouvelles valeurs pour les coefficients VCU2 et VCU3, l'attribution d'une nouvelle valeur au coefficient VCU2 peut être encouragée par les caractéristiques du secteur d'étude. Plus précisément, le coefficient VCU2 est le coefficient traduisant les échanges turbulents. En ce sens il s'exprime en fonction du vent, de la différence de température, et d'un coefficient C. Ce dernier dépend de la stabilité de l'air et du caractère plus ou moins rugueux de la surface. Les échanges turbulents (donc C) augmentent donc avec l'instabilité de l'air et la rugosité du sol.

Dans le cas de CROCUS, le coefficient  $C$  (donc  $VCU2$ ) ne dépend pas de la stabilité de l'air. Il est le reflet du caractère plus ou moins rugueux du sol. Il est calé de manière empirique et dépend du site (plat, montagne, végétation, ...). Par conséquent, l'exposition du secteur d'étude aux vents est susceptible d'occasionner une diminution de la rugosité des sites. Ainsi, il est tout-à-fait logique de proposer un coefficient plus faible (Martin et Lejeune, 1998). La valeur de  $VCU2$  passera donc de  $7.4E-07$  à  $3.7E-07$  et ce, pour l'ensemble des stations pour lesquelles des modélisations sont effectuées. Suite à cette modification du coefficient empirique  $VCU2$ , l'évolution de l'épaisseur du couvert prend alors la forme présentée aux figures 6.18 et 6.19.

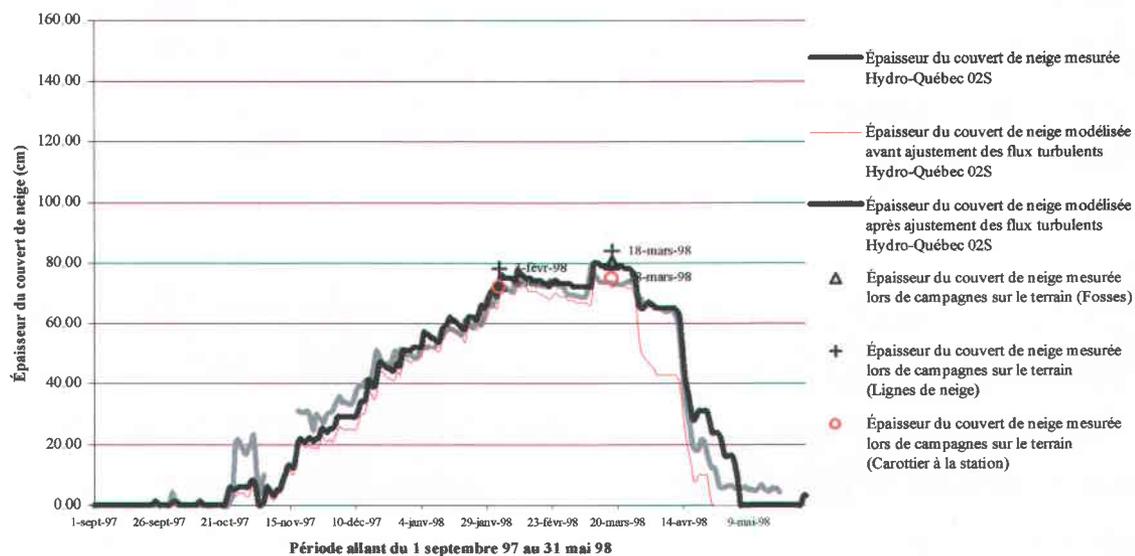


Figure 6.18 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 02s après ajustement des flux turbulents

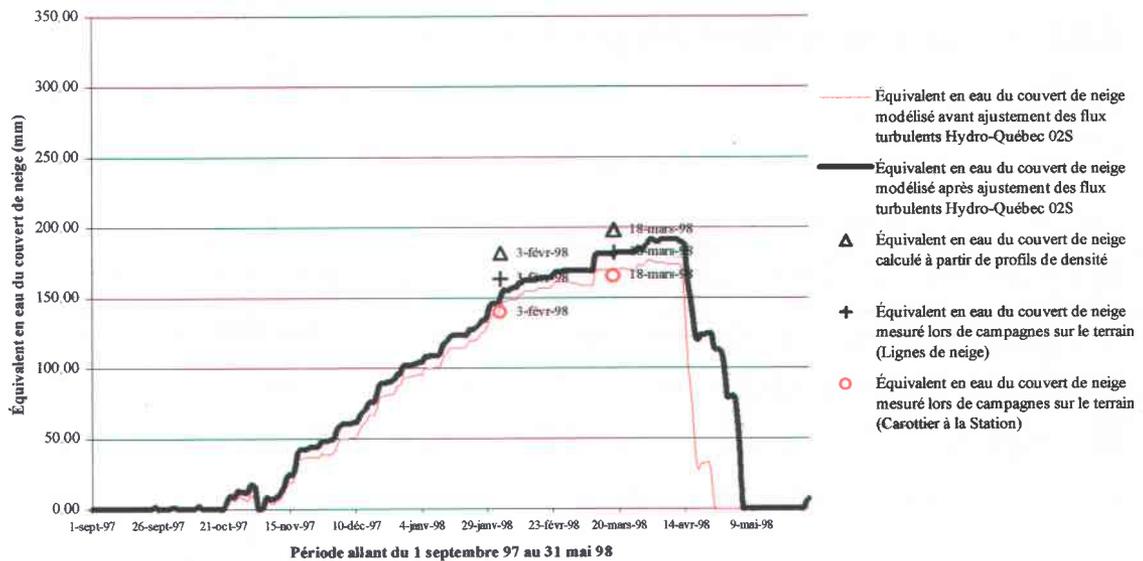


Figure 6.19 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 02s après l'ajustement des flux turbulents

Les résultats obtenus suite à l'ajustement des flux turbulents par la modification du coefficient empirique VCU2 sont caractérisés par une nette amélioration de la fonte printanière du couvert neige qui coïncide de façon marquée avec celle mesurée par la sonde (figure 6.18). Par conséquent, la valeur de la distance quadratique moyenne est abaissée à 5.574cm en comparaison avec la valeur précédente de 8.189cm. De plus, l'équivalent en eau du couvert augmente quelque peu pour s'approcher d'une valeur médiane estimée à l'aide des mesures prises sur le terrain et sensiblement égale à la valeur correspondant aux lignes de neige (figure 6.19). Ces deux améliorations résultent de la diminution du transfert convectif de chaleur sensible à l'interface air-neige.

Toutefois, il est à noter que l'équivalent en eau du couvert nival semble légèrement inférieur ou égal aux valeurs de lignes de neige. Ainsi, un ajustement final des précipitations peut être tenté.

### 6.3.4 Ajustement régional des précipitations

Tel que mentionné, les résultats obtenus, suite à l'ajustement des échanges turbulents, s'accordent grandement avec les mesures effectuées à la station. Cependant, l'évolution de l'équivalent en eau pour cette période demeure légèrement inférieure ou égale aux valeurs de lignes de neige qui sont représentatives de l'équivalent en eau du secteur environnant la station Hydro-Québec 02s dans le cas présent. Par conséquent, un ajustement des précipitations peut être tenté dans le but d'augmenter l'équivalent en eau du couvert tout en préservant la qualité des autres résultats.

Un tel ajustement des précipitations peut être expliqué par la provenance des mesures de précipitations journalières. En effet, les stations LG4-Sud et YAH, qui fournissent les données de précipitations utilisées à la station Hydro-Québec 02s et 11e pour cette période, se situent à des distances assez importantes (supérieure à 40km) de ces deux stations.

Ainsi, il est raisonnable de poser l'hypothèse que les précipitations aux stations de modélisation diffèrent de celles enregistrées aux stations LG4-Sud et YAH et ce, malgré leurs corrections.

Cette différence peut entre autres, être attribuée à des variations spatiales tout-à-fait normales des événements météorologiques. Il est à noter que l'hypothèse énoncée n'est toutefois pas valable pour la station Hydro-Québec 19e en raison de la proximité de la station YAH.

Afin de répondre à cette hypothèse et tel que mentionné à la section 2.2.3.4, CROCUS dispose d'un coefficient multiplicatif des précipitations portant la dénomination VRR3 et pouvant être ajusté au besoin. Dans le cadre de cette recherche, ce coefficient sera employé pour ajuster les précipitations utilisées pour réaliser le suivi du couvert de neige

---

aux stations Hydro-Québec 02s et 11e. Les valeurs attribuées au coefficient VRR3, permettront de vérifier la représentativité des mesures de précipitations enregistrées aux stations LG4-Sud et YAH. Par contre, l'ajustement des précipitations vise également à minimiser la variabilité entre les valeurs attribuées au coefficient, à l'exception de la période comprise entre le 1 septembre 1998 et le 31 mai 1999, en raison des écarts assez importants entre les mesures de précipitations enregistrées aux stations LG4-Sud et YAH. Ainsi, les valeurs composant le fichier de précipitations provenant de LG4-Sud et YAH peuvent être augmentées ou diminuées de 2.5% ( $VRR3=1.025$ ) à la station Hydro-Québec 02s pour la période comprise entre le 1 septembre 1997 et le 31 mai 1998. Un tel ajustement tente premièrement de palier à la sous-estimation de l'équivalent en eau du couvert de neige et deuxièmement d'évaluer la représentativité des mesures de précipitations utilisées pour la période et la station de modélisations présentes. L'ensemble des résultats obtenus à la stations Hydro-Québec 02s, suite à ces modifications sont présentés aux figures 6.20 à 6.25.

Dans un premier temps, les figures 6.20 et 6.21 permettent l'évaluation de l'influence de l'augmentation et de la diminution des précipitations sur l'épaisseur du couvert de neige et de son équivalent en eau.

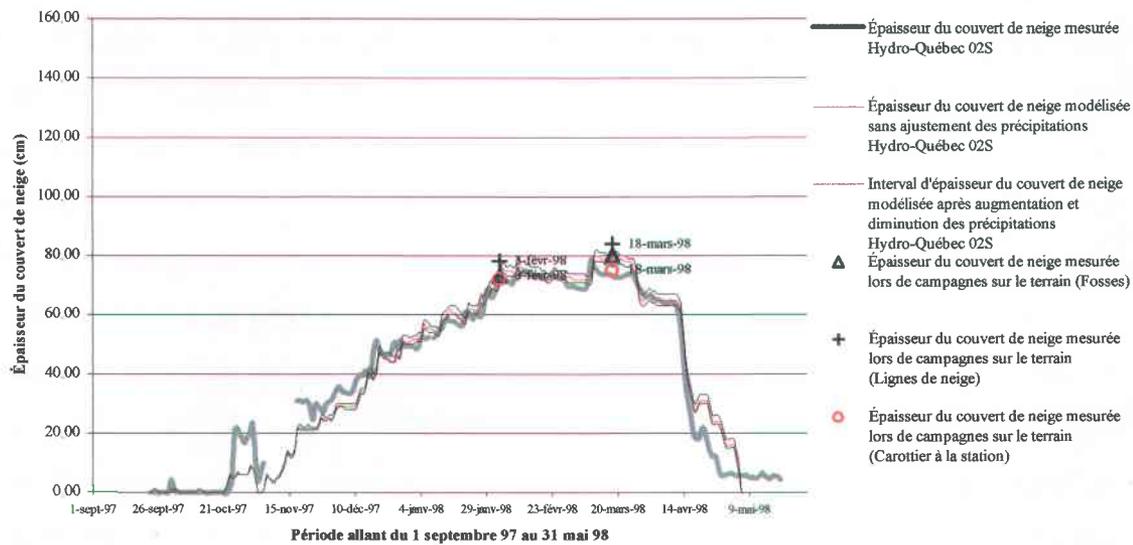


Figure 6.20 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 02s après l'ajustement régional des précipitations

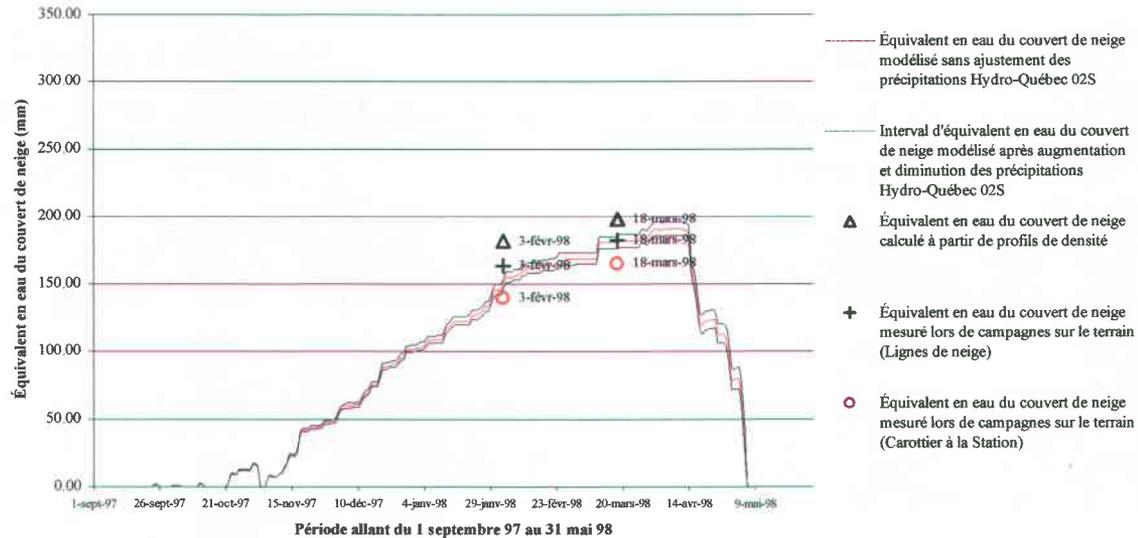


Figure 6.21 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 02s après l'ajustement régional des précipitations

Les figures 6.20 et 6.21 démontrent que l'augmentation ou la diminution de 2.5% des précipitations influence peu l'évolution de l'épaisseur du couvert de neige. L'équivalent en eau quant à lui garde la même forme et présente une faible distribution de données. Toutefois, la diminution des précipitations occasionne une diminution de l'équivalent en eau du couvert et par le fait même, son éloignement des valeurs des lignes de neige qui sont jugées représentatives du site. De plus, la valeur de la distance quadratique moyenne entre l'épaisseur du couvert nival modélisée et mesurée est détériorée par l'augmentation des précipitations. En effet, la valeur atteinte précédemment passe de 5.574cm à 6.091cm.

Face à de telles conséquences, il est raisonnable de conclure que les précipitations utilisées semblent représentatives du site et de la période de modélisation présentes. Cette conclusion permet d'avancer l'hypothèse que l'ajustement des précipitations pour les stations Hydro-Québec 02s et 11e sera tout aussi faible pour la première et la dernière période de modélisation voire même nul. À cette hypothèse, il est difficile d'inclure la période de modélisation comprise entre le 1 septembre 1998 et le 31 mai 1999 en raison de la grande variation entre les mesures de précipitations enregistrées aux stations LG4-Sud et YAH. Ainsi les valeurs finales attribués au coefficient d'ajustement des précipitations VRR3 aux différentes stations et périodes de modélisations sont présentées au tableau 6.1

Tableau 6.1 Valeurs finales du coefficient VRR3 aux différentes stations et périodes de modélisations

Période	Précipitations	Valeurs finales du coefficient VRR3		
		Hydro-Québec 02s	Hydro-Québec 11e	Hydro-Québec 19e
1997-1998	LG4-Sud, YAH	1.00	1.00	1.00
1998-1999	YAH	0.90	0.90	
1999-2000	LG4-Sud	1.00		

Aux résultats de modélisation de l'épaisseur du couvert de neige et de son équivalent en eau (figures 6.20 et 6.21), s'ajoutent les profils de densité et de températures pour lesquels le coefficient d'ajustement des précipitations (VRR3) demeure inchangé c'est-à-dire que sa valeur est maintenue à 1.00. Ces résultats sont présentés aux figures 6.22, 6.23, 6.24 et 6.25.

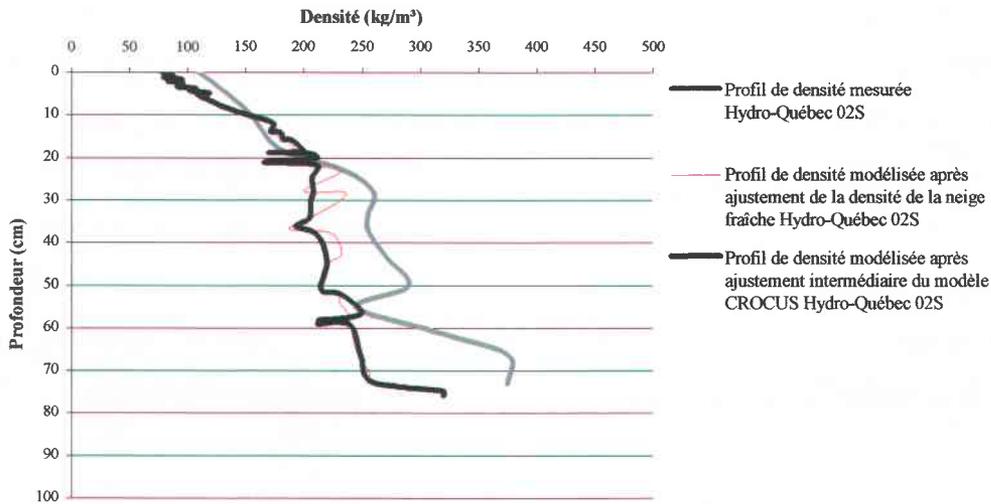


Figure 6.22 Profil de densité modélisée, après ajustement intermédiaire du modèle CROCUS, et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 02 février

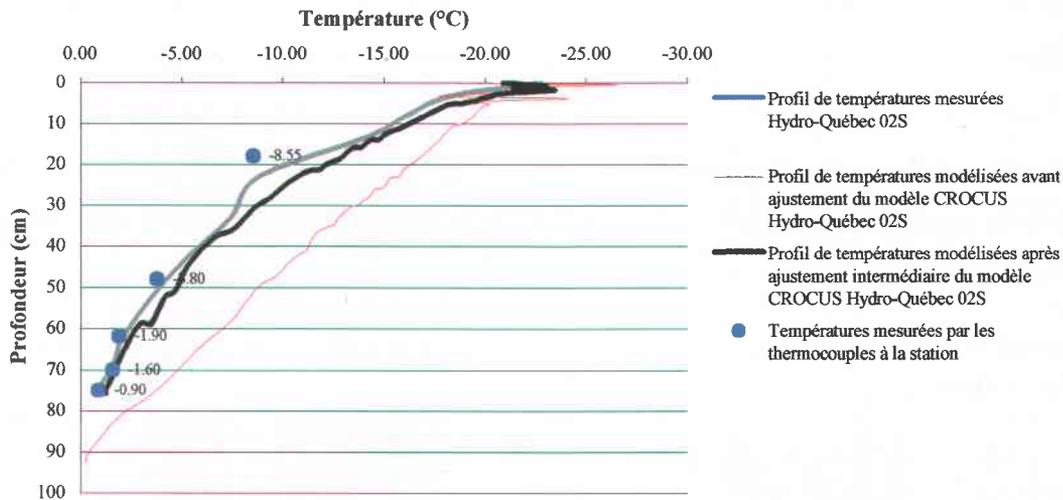


Figure 6.23 Profil de températures modélisées, après ajustement intermédiaire du modèle CROCUS, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date du 03 février 1998

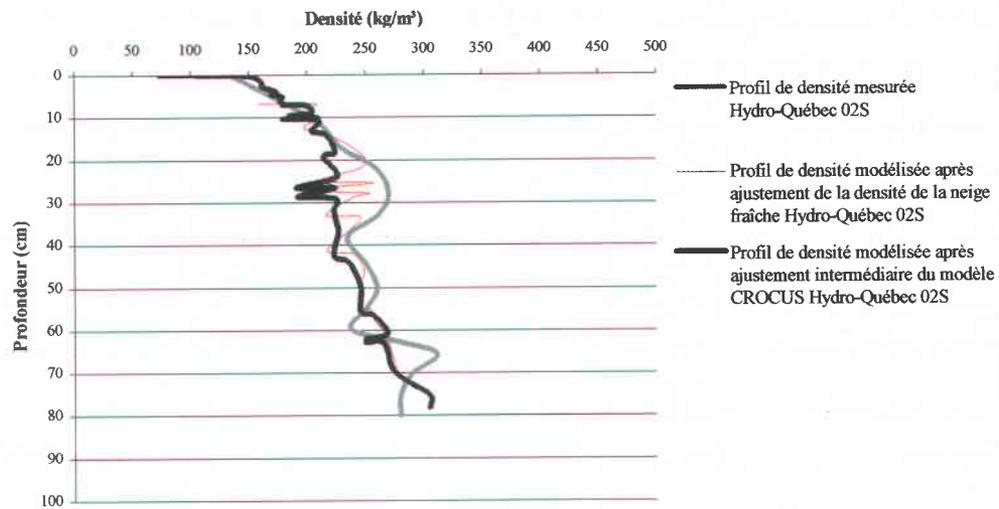


Figure 6.24 Profil de densité modélisée, après ajustement intermédiaire du modèle CROCUS, et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 18 mars 1998

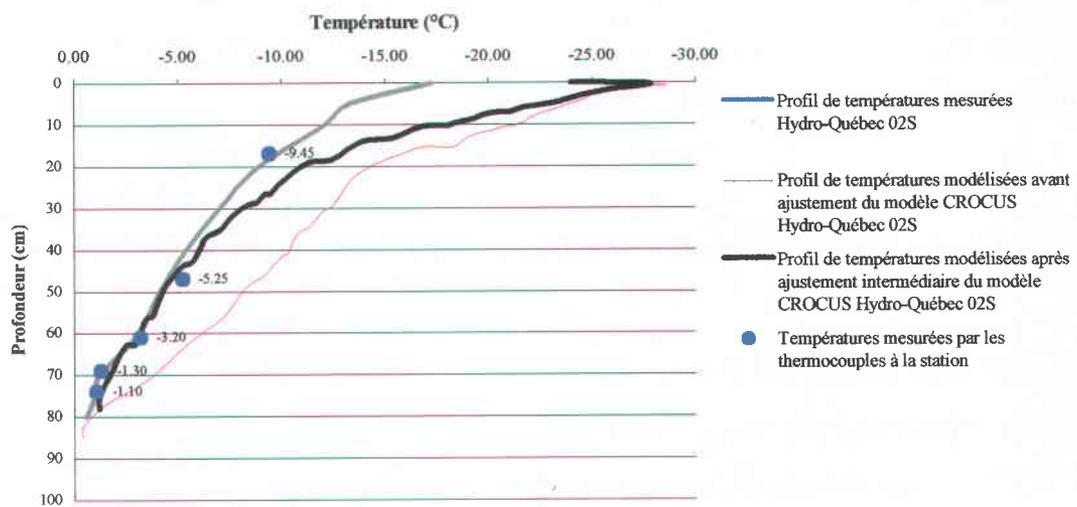


Figure 6.25 Profil de températures modélisées, après ajustement intermédiaire du modèle CROCUS, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date du 18 mars 1998

En regard des résultats obtenus, il est facile de noter que la qualité des profils de densité (figures 6.22 et 6.24) est préservée et demeure acceptable en fonction des données météorologiques d'entrée du modèle. D'ailleurs, la valeur de la distance quadratique reste semblable à la précédente c'est-à-dire  $48.132\text{kg/m}^3$  par rapport  $45.947\text{kg/m}^3$ . Toutefois, ces profils sont quelque peu inférieurs à ceux mesurés sur le terrain en raison de l'équivalent en eau du couvert qui reste inférieur aux valeurs obtenues à partir des profils de densité mesurés dans les fosses. Finalement, les profils de températures (figures 6.23 et 6.25) sont nettement améliorés en comparaison avec ceux modélisés initialement bien que les températures des couches supérieures modélisées en date du 18 mars 1998 soient inférieures à la fois à celles enregistrées et à celles mesurées sur le terrain en cette date précise. La valeur de la distance quadratique passe ainsi de  $4.962^\circ\text{C}$  à  $2.728^\circ\text{C}$ .

Ainsi, dans le but de tenter de mieux comprendre les mécanismes qui influencent le calcul, par le modèle CROCUS, de la température de surface, une étude plus poussée sur l'évolution de la température du couvert de neige doit être menée afin d'améliorer les profils de températures présentés.

### 6.3.5 Étude et correction de la température du couvert de neige

La température du couvert de neige est un paramètre sensible qui est influencé par un bon nombre de processus physiques comme :

- La conduction de chaleur à travers le stock de neige;
- Les échanges de chaleur entre l'eau de percolation et la neige;
- Les échanges de chaleur entre le sol et la neige;
- Les échanges convectifs de chaleur à l'interface air-neige;
- L'absorption des rayonnements de courtes et grandes longueurs d'ondes par les couches de neige en surface.

Afin de mieux cibler les processus physiques les plus influents sur la température des couches supérieures de neige, qui est problématique dans le cas présent, une étude sur l'évolution de la température en surface et proche de celle-ci (5cm sous la surface) sera menée dans le cadre de la présente recherche. Toutefois, bien que les résultats précédents obtenus à la station Hydro-Québec 02s pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998 aient été utilisés pour l'ajustement du modèle, ceux-ci ne pourront l'être pour cette étude sur les températures, en raison de la trop faible amplitude du couvert de neige qui ne permet pas l'attribution de valeur sous la surface, plus précisément à 5cm. Par conséquent, ce sont les résultats pour la période suivante, c'est-à-dire celle comprise entre le 1 septembre 1998 et le 31 mai 1999, qui seront employés. Ces résultats pourront être comparés aux mesures de températures enregistrées par les thermocouples à proximité de la surface (5cm) du couvert de neige.

Dans le but de cibler les facteurs déterminants dans le calcul de la température de surface, une étude plus poussée de l'évolution de la température doit être menée sur l'évolution temporelle de la température du couvert dans le but de tenter de corriger les profils présentés. Cette étude ne vise pas la modification du modèle mais plutôt l'ajustement des données d'entrée du modèle. Afin de procéder à cette étude, il est nécessaire de déterminer une période assez courte (entre 24 et 48 heures) bornée par une forte similitude entre les températures modélisées et mesurées à proximité de la surface et au cours de laquelle ces températures s'éloignent pour ensuite se rejoindre. Les figures 6.26, 6.27, 6.28 et 6.29 présentent à la fois le cheminement effectué pour déterminer une telle période ainsi que cette dernière.

Premièrement, l'évolution hebdomadaire de la température (figure 6.26) bien qu'elle ne présente pas l'ensemble des fluctuations horaires de la température, permet tout de même de déterminer une période journalière (figure 6.27) au cours de laquelle l'épaisseur du couvert de neige est suffisamment importante et les températures mesurées des couches supérieures de neige s'éloignent de celles modélisées. Par la suite, le même processus est

appliqué sur l'évolution journalière de la température (figure 6.27) dans le but de cibler une période horaire (figures 6.28 et 6.29).

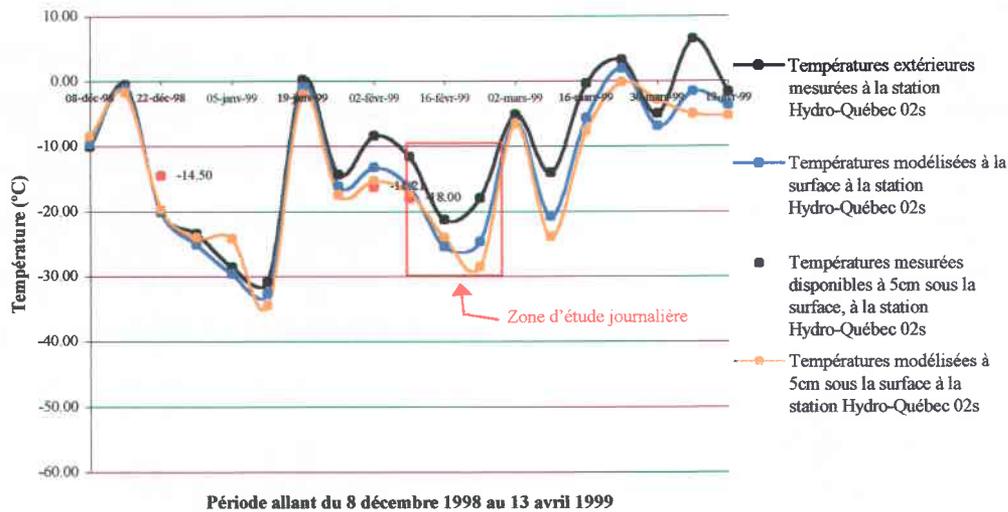


Figure 6.26. Évolution hebdomadaire de la température extérieure mesurée et de celles modélisées en surface et à 5cm sous la surface du couvert de neige à la station Hydro-Québec 02s entre le 8 décembre 1998 et le 13 avril 1999

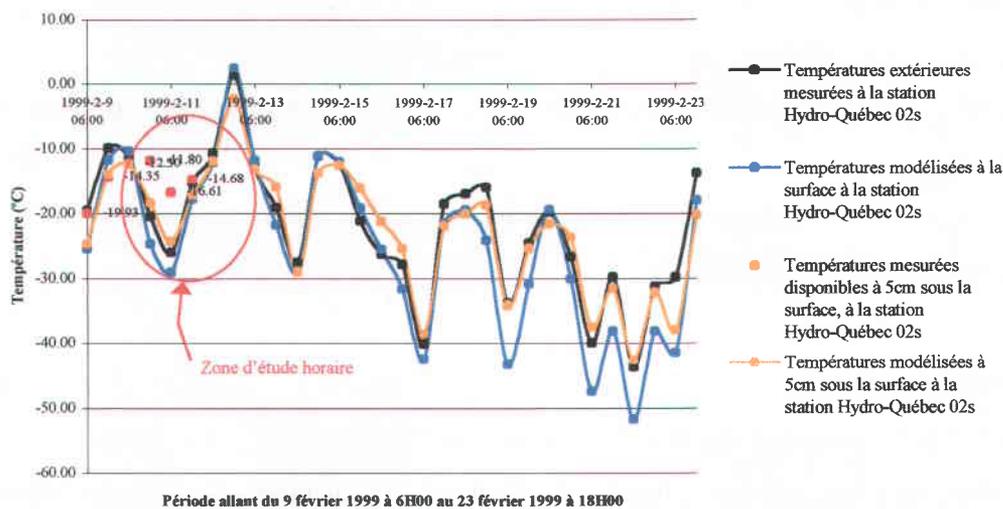


Figure 6.27 Évolution journalière de la température extérieure mesurée et de celles modélisées en surface et à 5cm sous la surface du couvert de neige à la station Hydro-Québec 02s entre le 09 et le 23 février 1999

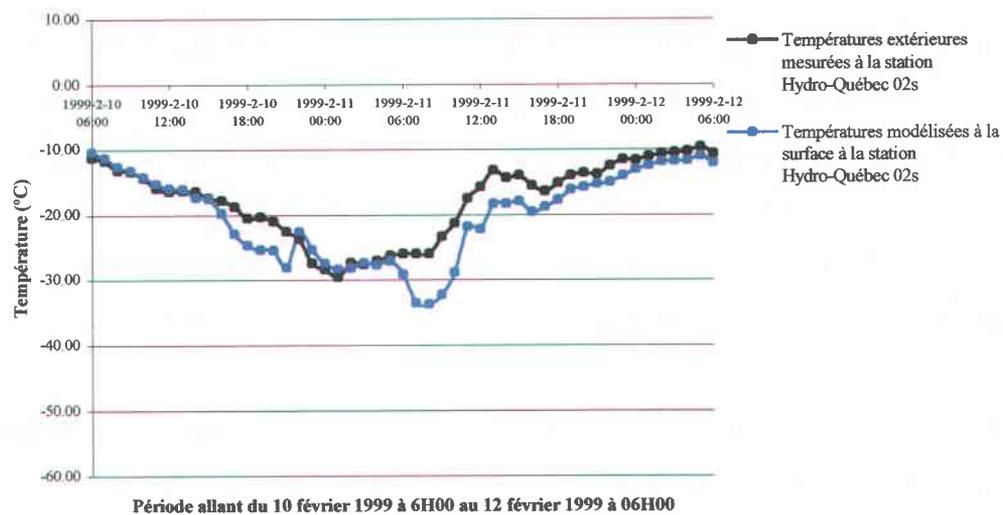


Figure 6.28 Évolution horaire de la température extérieure mesurée et modélisée à la surface du couvert de neige à la station Hydro-Québec 02s entre 10 février 1999 à 06H00 et le 12 février 1999 à 06H00

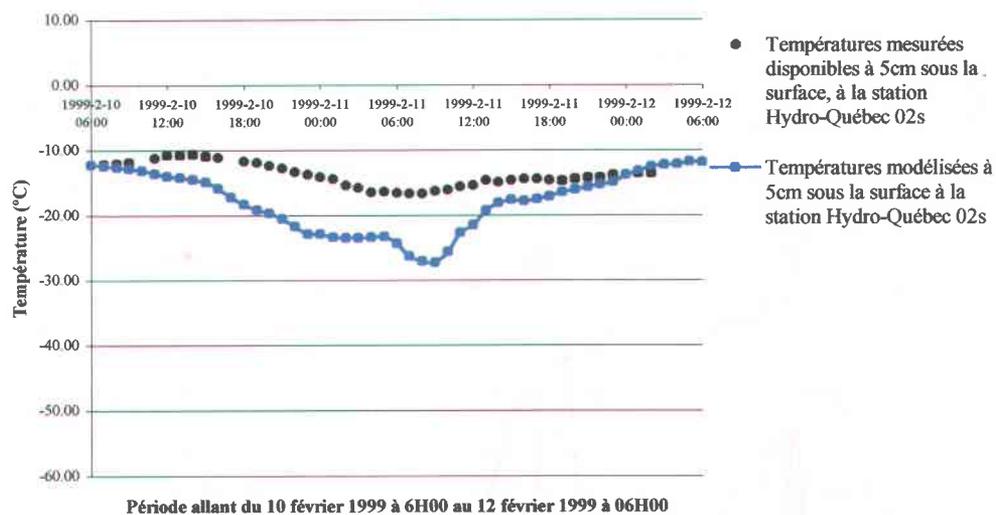


Figure 6.29 Évolution horaire de la température mesurée et modélisée à 5cm sous la surface du couvert de neige à la station Hydro-Québec 02s entre 10 février 1999 à 06H00 et le 12 février 1999 à 06H00

Cette période horaire (figures 6.28 et 6.29) est caractérisée par une bonne concordance entre les températures modélisées et celles mesurées à la fois en début et en fin de période. Toutefois, la portion médiane est caractérisée par une augmentation notable de l'écart entre la température modélisée à 5cm sous la surface et celle mesurée, suivi d'une diminution de cet écart entre celles-ci. La température modélisée à la surface du couvert de neige subit, quant à elle, deux décrochages suivis de deux rétablissements.

Afin de mieux comprendre la présence de ces écarts entre les températures modélisées et celles mesurées par les thermocouples à la stations Hydro-Québec 02s, il est grandement pertinent de porter en graphiques pour cette même période les différentes données d'entrée du modèle qui sont susceptibles d'influencer de façon déterminante les températures des couches supérieures de neige par leur effet sur le bilan énergétique du couvert nival. Ainsi, les figures 6.30 et 6.31 présentent les données d'entrée de précipitations et de rayonnement.

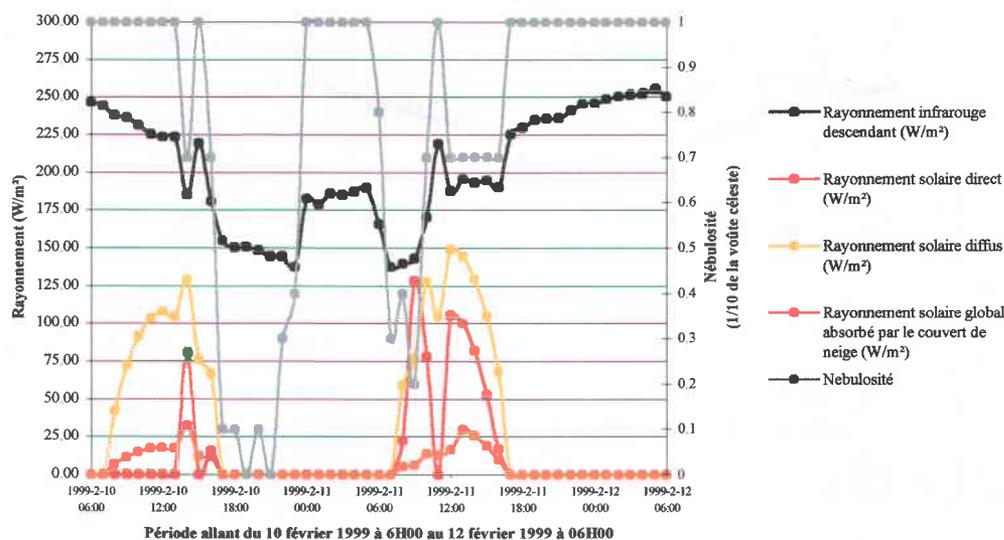


Figure 6.30 Données d'entrée de rayonnement et de nébulosité à la station Hydro-Québec 02s pour la période d'étude des températures des couches supérieures de neige comprise entre le 10 février 1999 à 06H00 et le 12 février 1999 à 06H00

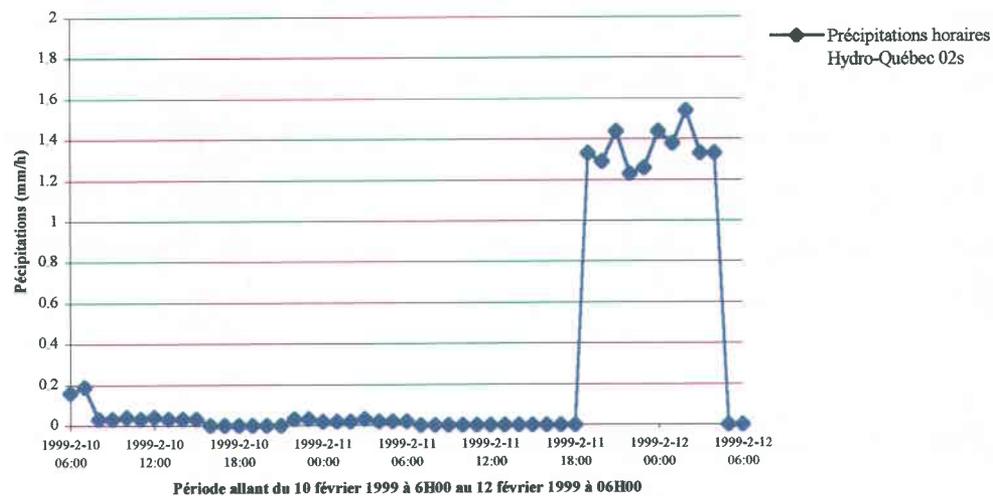


Figure 6.31 Données d'entrée de précipitations à la station Hydro-Québec 02s pour la période d'étude des températures des couches supérieures de neige comprise entre le 10 février 1999 à 06H00 et le 12 février 1999 à 06H00

Les données d'entrée présentées, permettent de faire les remarques suivantes :

1. Les rayonnements infrarouge, solaire direct et solaire diffus sont directement influencés par la nébulosité;
2. Les valeurs de rayonnement infrarouge sont largement supérieures à celles du rayonnement solaire direct et diffus;
3. Les valeurs de rayonnement solaire global absorbé sont grandement inférieures aux valeurs de rayonnement infrarouge incidentes au couvert de neige
4. Les précipitations essentiellement nulles sauf pour les douze dernières heures de la période d'étude.

En tenant compte de ces remarques, il est facile de constater que le rayonnement infrarouge est un élément très influent sur la température des couches supérieures du couvert de neige. Cette influence prédomine celle du rayonnement solaire en raison de l'albédo très élevé de la neige qui occasionne une plus faible absorption du rayonnement solaire en comparaison avec le rayonnement infrarouge (figure 6.30). Plus précisément, il existe une étroite corrélation entre la température de surface et le rayonnement infrarouge.

En effet, les chutes de températures en surface coïncident parfaitement avec les diminutions de rayonnement infrarouge. De plus, ces diminutions sont directement liées à celles du couvert nuageux. Par conséquent, l'hypothèse suivante peut être formulée : les décrochages de températures surviennent essentiellement en présence de ciel clair ou partiellement nuageux. Ce qui a pour effet d'occasionner une sous-estimation par le modèle CROCUS des températures des couches de neige à proximité de la surface.

### 6.3.5.1 Modifications du calcul du rayonnement infrarouge

Afin d'approfondir cette recherche, il devient pertinent de porter un regard soutenu sur le calcul du rayonnement infrarouge présenté à la section 2.2.3.6. Tel que mentionné précédemment, ce calcul est effectué selon la loi de Stefan-Boltzman présentée sous la forme de l'équation 2.23 à la section 2.2.3.5. De plus, il est à noter que le calcul du rayonnement infrarouge (Eq. 2.24 à 2.26) comporte certains coefficients préalablement ajustés pour la France. Ainsi il est raisonnable de croire que de tels coefficients peuvent engendrer des valeurs moins précises pour les sites d'études de la présente recherche. Par conséquent, la prise en compte de nouvelles formules, mieux adaptées aux conditions du Nord du Québec, semble une possibilité intéressante pour l'amélioration du calcul du rayonnement infrarouge.

#### Calcul du rayonnement infrarouge incident modifié

La nouvelle méthode de calcul propose :

1. Le calcul initial du rayonnement infrarouge par temps clair

$$R_{ldc} = \varepsilon_{ac} \sigma T_a^4 \quad (6.8)$$

Cette équation ne diffère pas de la précédente, toutefois le calcul de l'émissivité atmosphérique ( $\varepsilon_{ac}$ ) peut être modifié. En ce sens, Satterlund (1979) propose une équation empirique de l'émissivité atmosphérique qui tient compte de la

température de l'air et de l'humidité et qui offre une bonne réponse aux températures sous 0°C (Brutsaert, 1984).

2. Calcul de l'émissivité atmosphérique

$$\varepsilon_{ac} = 1.08 * \left[ 1 - \exp\left(-e_a^{T_a/2016}\right) \right] \quad (6.9)$$

Dans cette équation,  $e_a$  représente la tension de vapeur d'eau (mb) et  $T_a$ , la température de l'air.

3. Calcul de l'effet de la nébulosité

L'effet de la nébulosité est alors appliqué sur le calcul initial du rayonnement infrarouge par temps clair.

$$R_{ld} = R_{ldc} (1 + a * m_c^b) \quad (6.10)$$

Dans cette équation,  $m_c$  représente la nébulosité et  $a$  et  $b$  sont des constantes. Plus précisément  $a$  dépend du type de nuages. Ainsi Bolz (1949) présente différentes valeurs de  $a$  pour  $b$  égal à 2 (voir tableau 6.1). Dans le cadre de cette recherche, la valeur de la constante  $a$  sera fixée à 0.20.

Ainsi, les deux méthodes de calcul du rayonnement infrarouge incident peuvent être comparées à l'aide d'un graphique présentant les résultats de ces calculs pour différentes nébulosités (figures 6.32 et 6.33).

Tableau 6.2 Valeurs de paramètre de Bolz (a) pour b égale à 2 pour différents types de couverts nuageux d'après Bolz (1949)

Type de Nuage	a
Cirrus (Ci)	0.04
Cirrostratus (Cs)	0.08
Altostratus (As)	0.17
Altostratus (As)	0.20
Cumulonimbus (Cb)	0.20
Cumulus (Cu)	0.20
Stratocumulus (Sc)	0.22
Nimbostratus (Ns)	0.25
Brouillard	0.25

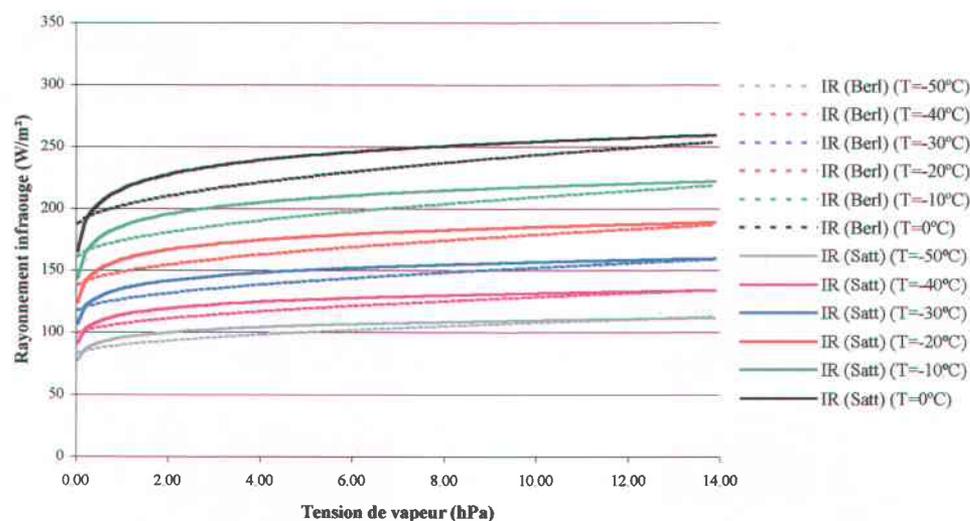


Figure 6.32 Comparaison des rayonnements infrarouge descendants (IR) calculés à l'aide des méthodes de Berlianda (Berl) et de Satterlund (Satt) pour un ciel clair et des températures comprises entre -50°C et 0°C

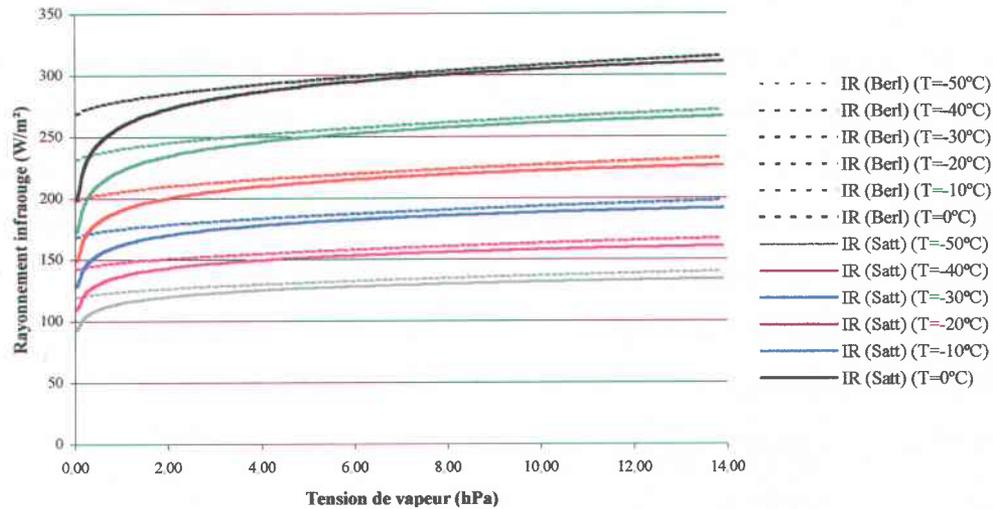


Figure 6.33 Comparaison des rayonnements infrarouge descendants (IR) calculés à l'aide des méthodes de Berlianda (Berl) et de Satterlund (Satt) pour un ciel couvert et des températures comprises entre -50°C et 0°C

Les deux figures précédentes (figures 6.32 et 6.33) permettent de constater que le calcul du rayonnement infrarouge proposé par Satterlund donne des valeurs supérieures pour un ciel clair alors que la méthode de Berlianda donne, quant à elle, des valeurs supérieures pour un ciel couvert. Par conséquent, le calcul final du rayonnement infrarouge atmosphérique incident sera effectué à l'aide des deux méthodes présentées en respectant la condition suivante : la valeur de rayonnement infrarouge attribuée sera calculée par pondération de chacune des méthodes en fonction de la nébulosité. Une telle condition peut s'exprimer selon l'équation mathématique suivante :

$$L \downarrow = Satt * (1 - Neb) + Berl * (Neb) \quad (6.11)$$

où Satt et Berl représentent les valeurs de rayonnements infrarouge atmosphérique calculés à partir des méthodes de Satterlund (Eq. 6.9 et 6.10) et de Berlianda (Eq. 2.23 à 2.26) alors que Neb représente la nébulosité. Par exemple, pour une nébulosité de 30% les pourcentages attribués respectivement aux deux méthodes seront de 70% pour le calcul de Satterlund et 30% pour le calcul original proposé par Berlianda.

Cette modification permet donc une légère augmentation du rayonnement infrarouge par temps clair, toutefois, elle demeure incomplète. Bien que ce nouveau calcul peut être appliqué aisément sur des sites dégagés ou très peu d'éléments physiques n'interviennent dans le bilan radiatif de la surface du stock de neige, il ne semble pas entièrement approprié pour les sites visés par la présente recherche. En effet, la présence de forêts ouvertes aux stations Hydro-Québec 02s, 11e et 19e restreint quelque peu l'application directe de ce nouveau calcul et favorise la prise en compte de la végétation dans le calcul du rayonnement infrarouge.

### 6.3.5.2 Intégration de la végétation dans le calcul du rayonnement infrarouge

Tel que mentionné à la section 2.2.3.6, la végétation absorbe une partie des rayonnements solaires direct, diffus et infrarouge pour ensuite la retransmettre au couvert de neige sous forme de rayonnement thermique, l'énergie absorbée (Pomeroy et Dion, 1996). Une telle influence doit donc être intégrée aux différents calculs sollicités.

Puisque le modèle traite des valeurs de rayonnement incidentes au couvert de neige (Eq. 2.27), les modifications visant la prise en compte de la végétation peuvent être appliquées directement aux calculs des rayonnements solaires direct et diffus et infrarouge présents dans le programme utilitaire présenté à l'annexe 6.

Afin d'intégrer l'effet de la végétation sur le bilan radiatif à la surface du couvert de neige (Eq. 2.27) Pomeroy et Dion (1996) proposent le bilan radiatif modifié suivant :

$$Q^* = S \downarrow * (1 - \alpha) e^{\mu} + L \downarrow * (1 - C_c) - \epsilon_f \sigma T_s^4 + C_c \epsilon_f \sigma T_f^4 \quad (6.12)$$

où  $e^{\mu}$  représente la transmissivité du couvert végétal par rapport au rayonnement solaire,  $C_c$ , le pourcentage de couverture de la voûte céleste par la canopée de la forêt,  $\epsilon_f$ , l'émissivité de la végétation et  $T_f$ , la température de l'air mesurée à l'intérieur de la canopée.

Il est à noter que la présente recherche ne vise pas l'intégration complète de la végétation telle que décrite dans le bilan radiatif proposé par Pomeroy et Dion (1996). En ce sens, l'influence de la forêt sera essentiellement appliquée sur le rayonnement infrarouge atmosphérique ainsi que sur le rayonnement infrarouge émis par la forêt. Cette intégration limitée de l'effet de la végétation sur le bilan radiatif de la surface du couvert peut être justifiée par les points suivants :

1. L'insuffisance de données sur la végétation présente sur les sites de modélisation ;
2. L'albédo généralement élevé de la neige qui limite l'absorption du rayonnement solaire global ;
3. La faible proportion du rayonnement solaire global absorbé par rapport au rayonnement infrarouge ;

Il faut également préciser que la modification proposée, vise uniquement à vérifier et à démontrer l'effet du couvert végétal sur le calcul du rayonnement infrarouge et son influence sur la température des couches de neige en surface. Une approche plus précise et une étude plus poussée des caractéristiques du couvert végétal devront être mises en place dans le futur pour permettre l'intégration complète de l'effet de la végétation dans les calculs présentés (Eq. 6.12).

De plus, en raison de l'absence de mesures de températures de l'air à l'intérieur de la canopée ( $T_f$ ) cette dernière sera estimée égale à celle de l'air (Pomeroy et Dion, 1996). Également, étant donné que la littérature présente un large éventail de valeur d'émissivité du couvert végétal (entre 0.88 et 0.99), celle-ci sera fixée à une valeur médiane de 0.94. Finalement le tableau 6.2 présente l'ensemble des pourcentages de couverture de la voûte céleste ( $C_c$ ) par la canopée de la végétation aux stations Hydro-Québec 02s, 11e et 19e.

Tableau 6.3 Valeurs de couverture de la voûte céleste par la canopée de la végétation aux stations Hydro-Québec 02s, 11e et 19e

Stations	(%) de couverture de la voûte céleste par la canopée de la végétation
Hydro-Québec 02s	25%
Hydro-Québec 11e	12%
Hydro-Québec 19e	6%

Les nouvelles valeurs obtenues pour le rayonnement infrarouge incident à la surface du couvert de neige résultant des modifications décrites à la section précédente et de l'addition du rayonnement infrarouge émis par la forêt peuvent alors être portées en graphique et comparées aux valeurs antérieures (figure 6.34).

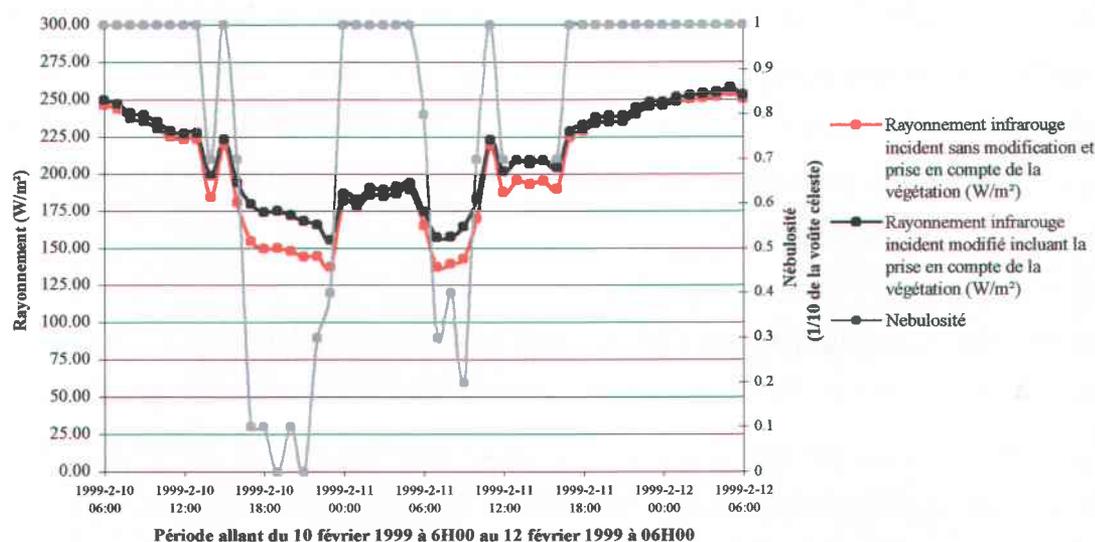


Figure 6.34 Données d'entrée de rayonnement infrarouge modifié et de nébulosité à la station Hydro-Québec 02s pour la période d'étude des températures des couches supérieures de neige.

Les nouvelles valeurs de rayonnement infrarouge incident à la surface du couvert de neige qui cumule à la fois le rayonnement infrarouge émis par l'atmosphère franchissant

le couvert végétal et celui émis par la végétation, présentent une nette augmentation par temps clair tout en préservant celles par temps couvert (figure 6.34). Une telle augmentation influencera directement la température de la surface du couvert de neige et par le fait même, celles des couches sous-jacentes. Ainsi, les nouvelles valeurs de températures à la surface et à 5cm sous celle-ci pour la période d'étude des températures ciblée précédemment sont présentées aux figures 6.35 et 6.36

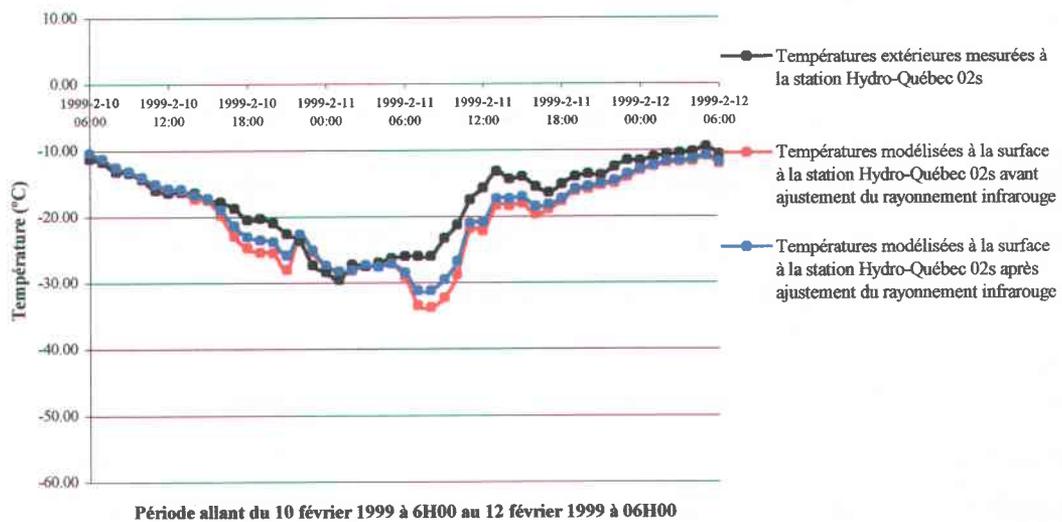


Figure 6.35 Évolution horaire de la température extérieure mesurée et modélisée à la surface du couvert de neige à la station Hydro-Québec 02s après ajustement du rayonnement infrarouge incident à la surface du couvert de neige

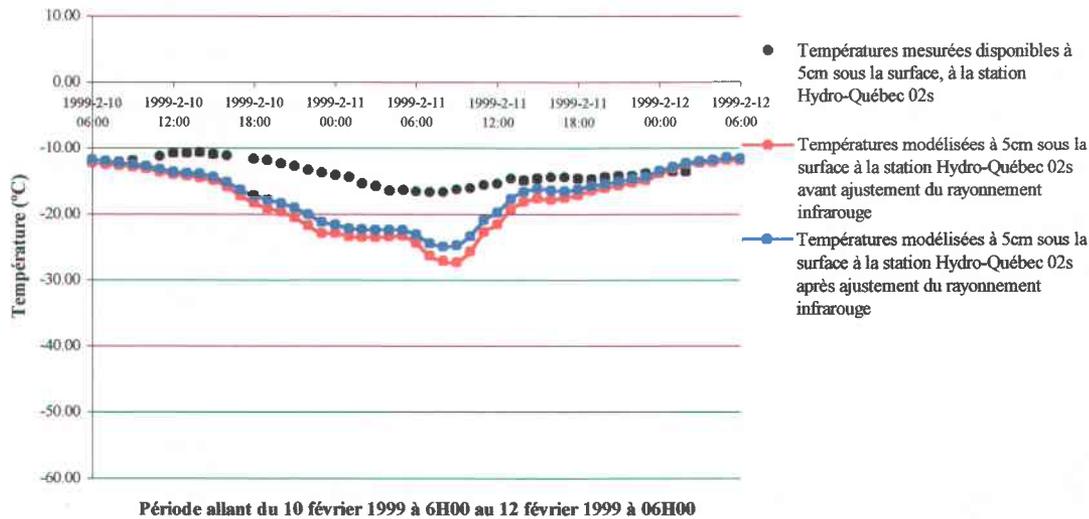


Figure 6.36 Évolution horaire de la température extérieure mesurée et modélisée à 5cm sous la surface du couvert de neige à la station Hydro-Québec 02s après ajustement du rayonnement infrarouge incident à la surface du couvert de neige

Suite aux modifications du calcul du rayonnement infrarouge atmosphérique et de l'intégration de l'effet de la forêt sur le bilan radiatif infrarouge incident à la surface du couvert de neige, les écarts entre les températures mesurées et modélisées de la surface du couvert de neige et des couches sous-jacentes présentent une légère diminution (figures 6.35 et 6.36). Bien que ces écarts demeurent notables par temps clair, les modifications apportées au rayonnement infrarouge incident à la surface du couvert constituent une première étape d'importance dans l'amélioration de l'évolution temporelle de la température du couvert nival. Par la suite, il est pertinent de revenir aux résultats relatifs à la première période de modélisation dans le but d'évaluer l'impact des dernières modifications sur l'évolution de l'épaisseur du couvert et de son équivalent en eau ainsi que sur les profils de températures. Les figures 6.37, 6.38, 6.39 et 6.40 présentent donc cet impact.

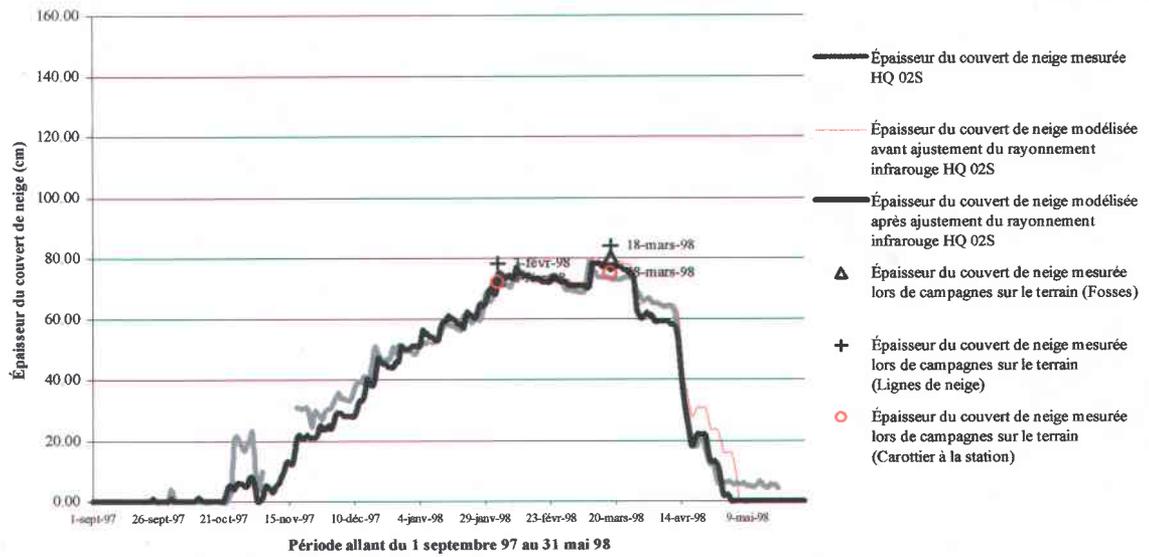


Figure 6.37 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 02s après l'ajustement du rayonnement infrarouge incident à la surface du couvert de neige

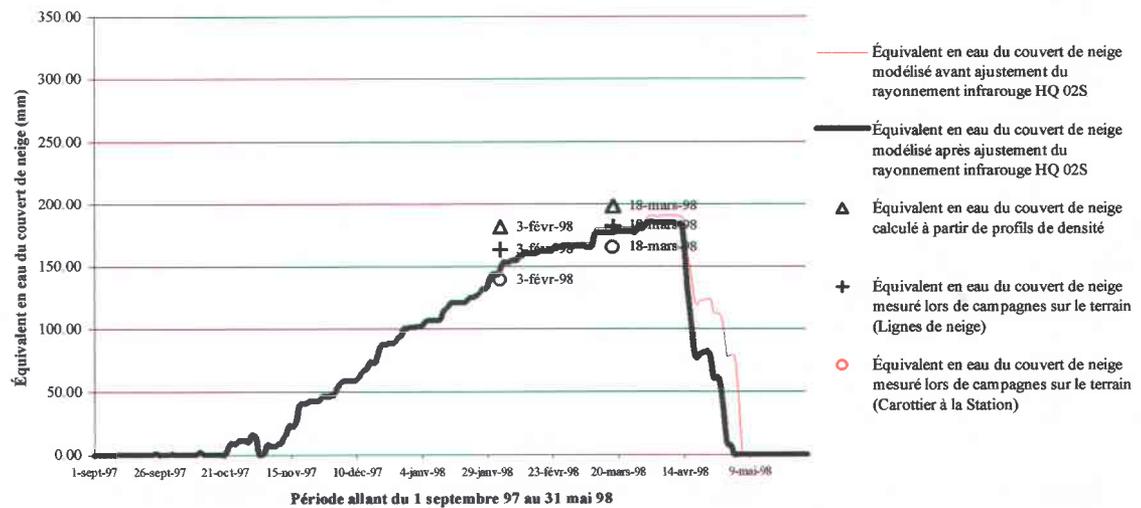


Figure 6.38 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 02s après l'ajustement du rayonnement infrarouge incident à la surface du couvert de neige

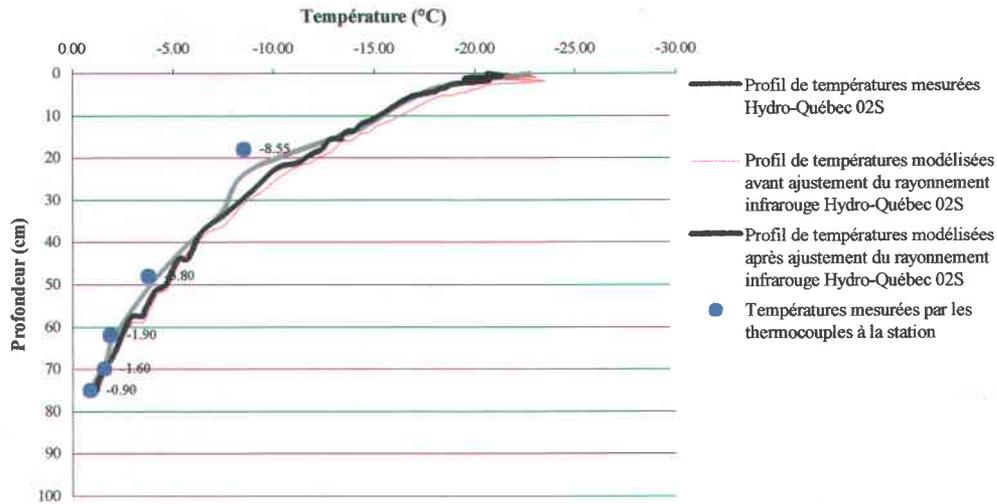


Figure 6.39 Profil de températures modélisées, après ajustement du rayonnement infrarouge, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date 03 février 1998

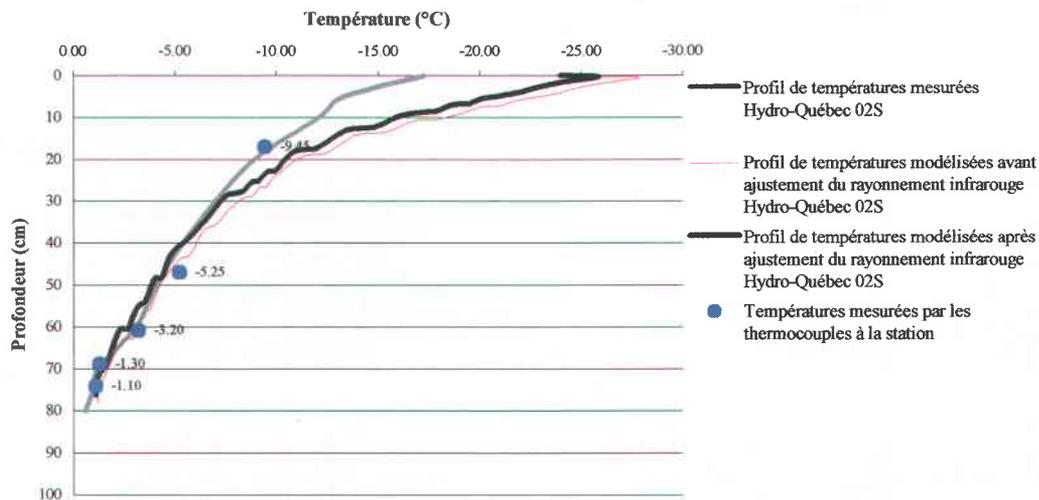


Figure 6.40 Profil de températures modélisées, après ajustement du rayonnement infrarouge, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date 26 janvier 1999

À l'aide des résultats précédents, il est facile de noter que les modifications apportées aux calculs du rayonnement infrarouge atmosphérique et l'intégration de l'effet de la forêt sur le bilan radiatif infrarouge incident à la surface du couvert de neige, contribuent à une certaine amélioration des profils de températures, plus spécifiquement celui datant du 18

---

mars 1998 qui présente un léger réchauffement par rapport aux résultats antérieurs (figure 6.40). En ce sens, la valeur de la distance quadratique moyenne passe à  $2.214^{\circ}\text{C}$  par rapport à la valeur précédente de  $2.728^{\circ}\text{C}$ . Toutefois, ce réchauffement occasionne le retour à une fonte trop rapide du couvert de neige (figure 6.37) et à une perte d'équivalent en eau entre le 28 février et le 9 mai 1998 (figure 6.38).

Les résultats précédents (figures 6.37 à 6.40) démontrent de façon assez claire l'importance du calcul du rayonnement infrarouge et de l'effet de la végétation sur ce dernier par rapport à la température des couches de neige en surface. Cette démonstration s'accorde avec les objectifs visés par cette étude de la température du couvert nival.

Toutefois, il semble nécessaire de procéder à un ajustement final des flux turbulents afin de diminuer les échanges convectifs de chaleur à l'interface air-neige tel que décrit à la section 6.3.3. En ce sens, la valeur de VCU2 passera donc de  $3.0\text{E}-07$  à  $1.7\text{E}-07$ . Suite à ce dernier ajustement, le modèle permet d'obtenir l'ensemble des résultats présentés aux figures 6.41 à 6.46.

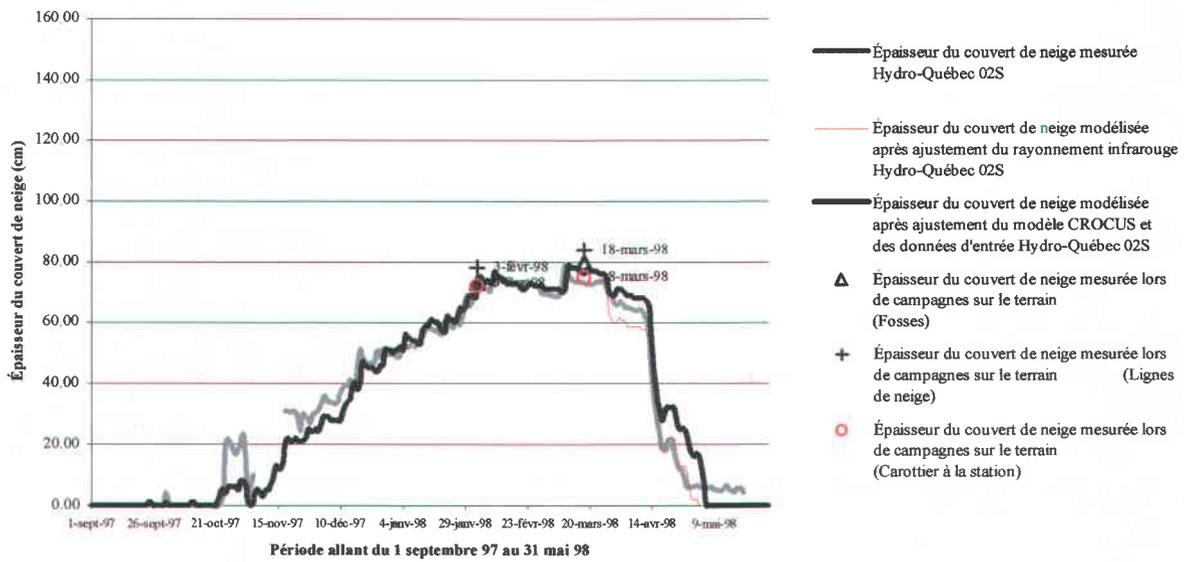


Figure 6.41 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 02s après l'ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée

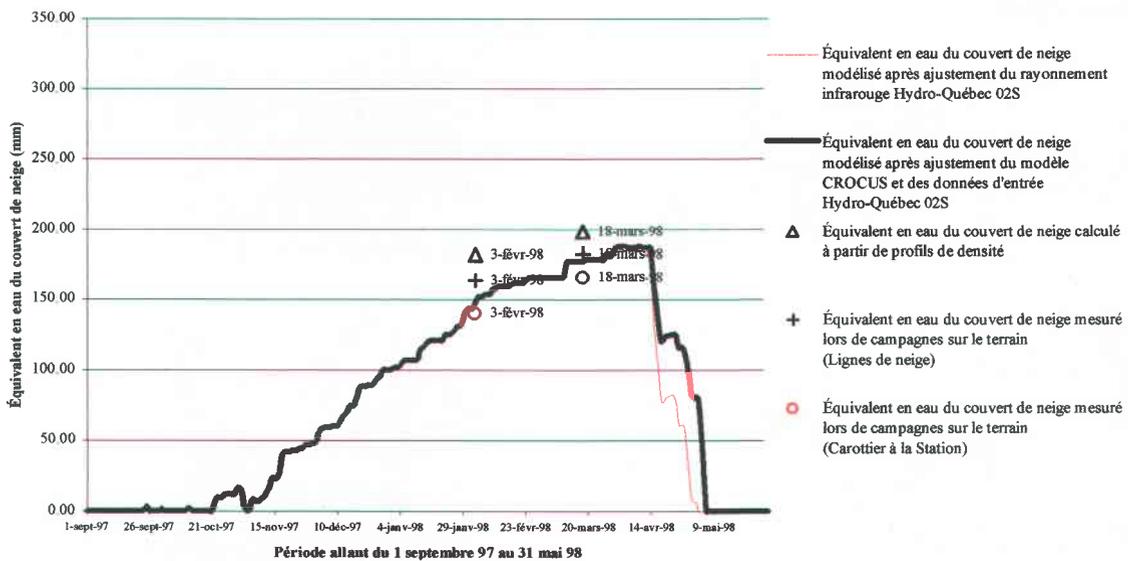


Figure 6.42 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 02s après l'ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée

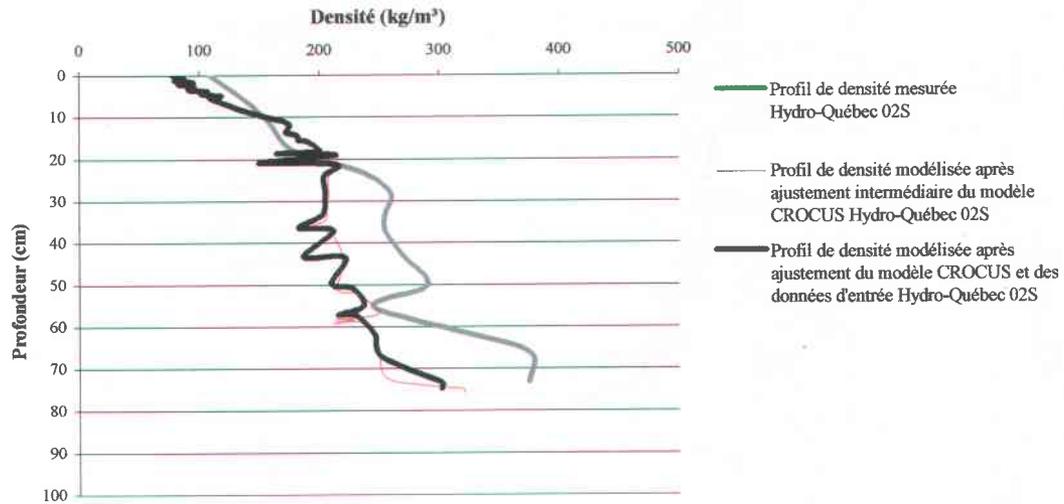


Figure 6.43 Profil de densité modélisée, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date du 03 février 1998

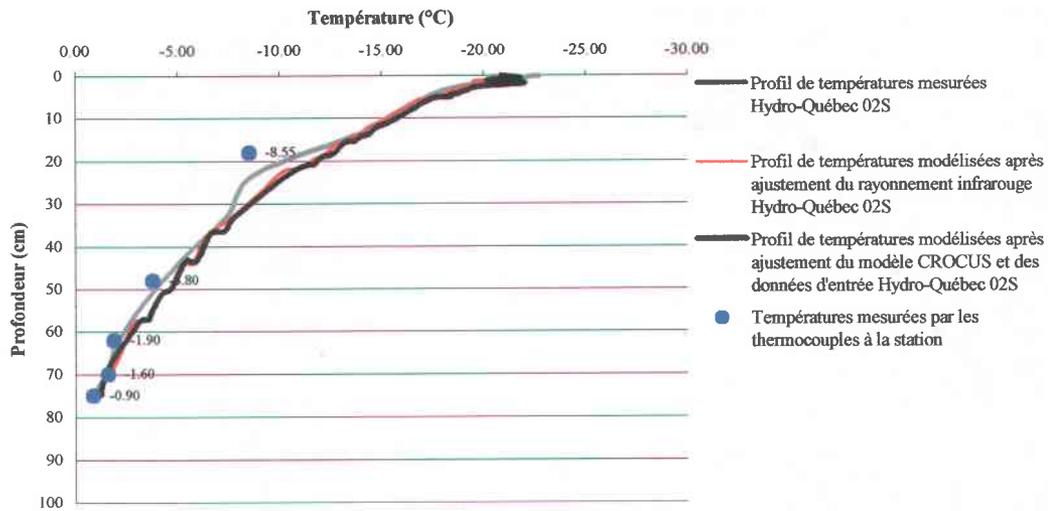


Figure 6.44 Profil de températures modélisées, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date 03 février 1998

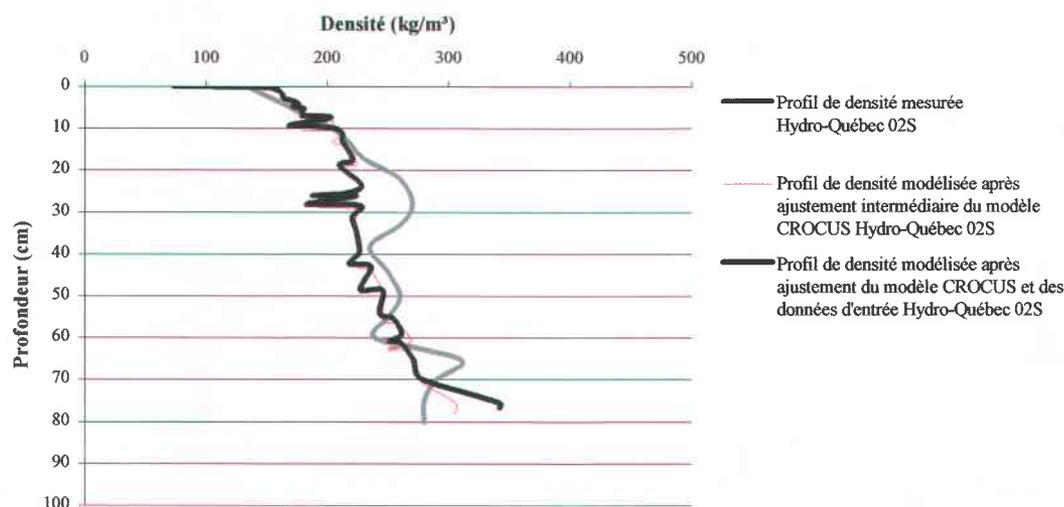


Figure 6.45 Profil de densité modélisée, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date du 18 mars 1998

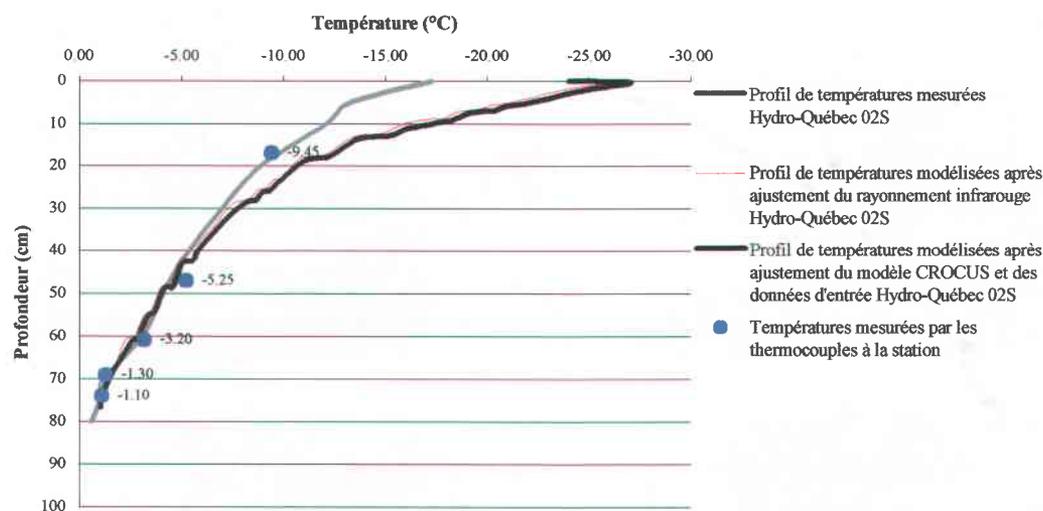


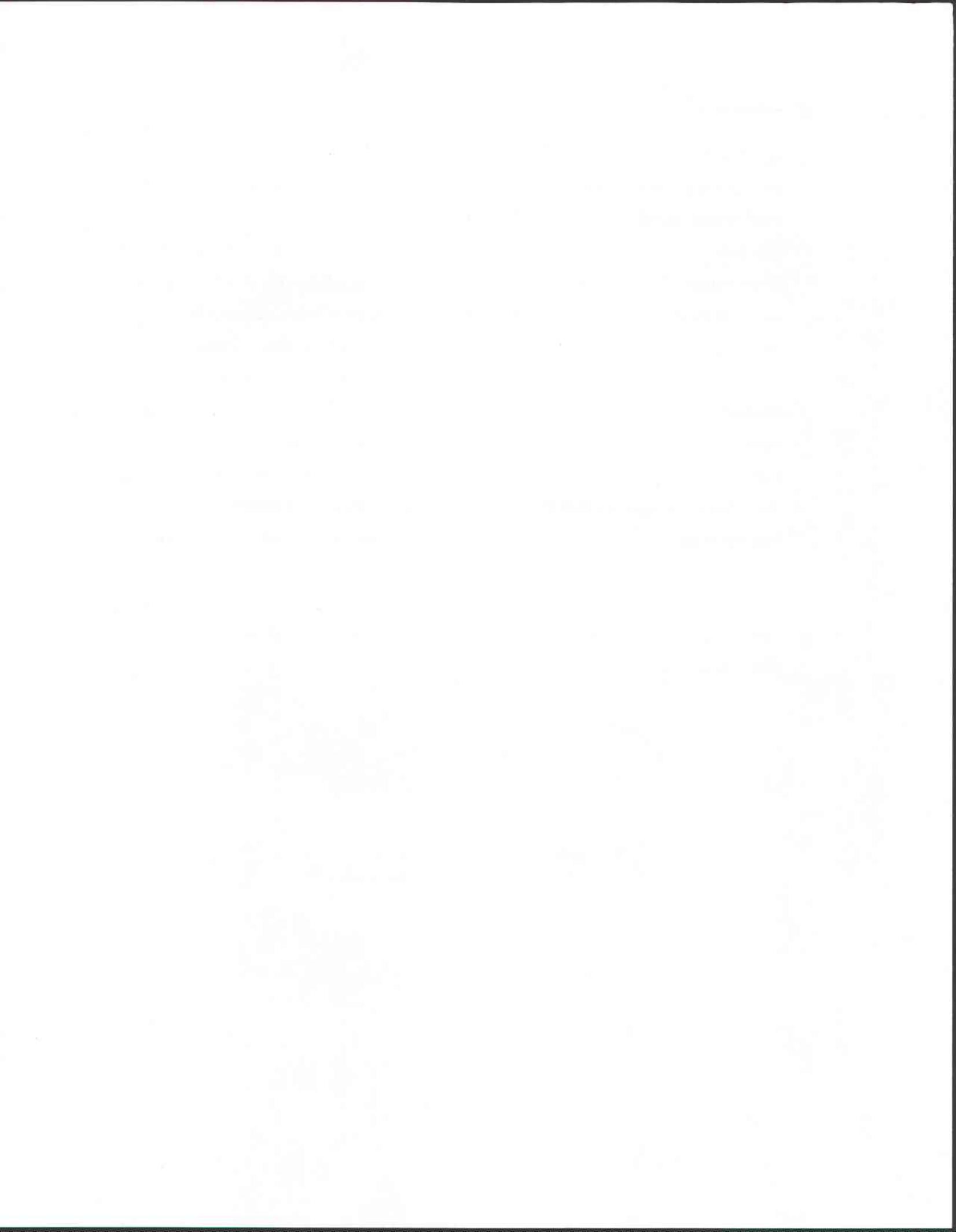
Figure 6.46 Profil de températures modélisées, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date 18 mars 1998

L'ajustement final de la fonte printanière, par la réduction des échanges convectifs de chaleur à l'interface air-neige, contribue grandement à rétablir la qualité des résultats tout en préservant celles obtenues suite à la modification du calcul du rayonnement infrarouge et à l'intégration des effets de la forêt sur le bilan radiatif à la surface du couvert de neige.

---

En effet, l'évolution de l'épaisseur du couvert de neige (figure 6.41) et de son équivalent en eau (figure 6.42) respecte grandement les mesures disponibles à la station Hydro-Québec 02s. De plus, les profils de densité modélisée (figures 6.43 et 6.45) s'approchent grandement de ceux mesurés lors de campagnes sur le terrain tout comme les profils de températures (figures 6.44 et 6.46). Toutefois, les températures des couches supérieures de neige en date du 09 mars 1999 demeurent inférieures à celles mesurées bien qu'elles présentent une certaine amélioration par rapport au profil modélisé initialement (figure 6.6). En ce sens, l'augmentation du rayonnement infrarouge incident par temps clair résultant des modifications décrites aux sections 6.3.5.1 et 6.3.5.2 constitue une première étape visant la compréhension complète ainsi que le traitement par CROCUS des phénomènes prenant part à la détermination des températures du couvert de neige. Toutefois le manque d'information, ainsi que la provenance des données météorologiques limitent grandement l'ajustement complet du modèle aux conditions du Nord du Québec.

Suite à l'ajustement du modèle, il semble alors pertinent de procéder à sa vérification sur l'ensemble des stations et ce, pour l'ensemble des périodes de modélisations mentionnées à la section 3.2.



## **7 VÉRIFICATION DU MODÈLE CROCUS**

---

Après avoir ajusté le modèle CROCUS à l'aide des modifications décrites à la section précédente, il est approprié de procéder à sa vérification aux stations Hydro-Québec 02s, 11e et 19e pour l'ensemble des périodes hivernales, dans le but d'évaluer la qualité finale des modélisations.

### **7.1 Période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998**

#### **7.1.1 Modélisation à la station Hydro-Québec 02s**

Bien que les résultats obtenus à la station Hydro-Québec 02s, pour cette période, aient été largement commentés lors de l'étalonnage du modèle, il demeure pertinent de discuter de la qualité des modélisations finales présentées aux figures 7.1 à 7.6. En ce sens, l'épaisseur du couvert de neige modélisée (figure 7.1) respecte grandement celle mesurée en continue par la station et lors de campagnes sur le terrain. D'ailleurs, l'erreur absolue moyenne est de 4.18cm. La qualité de l'évolution de l'épaisseur témoigne de l'efficacité du modèle quant à l'ajout de neige fraîche et du tassement général de l'ensemble du couvert nival. L'équivalent en eau du couvert de neige modélisé (figure 7.2) présente des valeurs qui s'approchent grandement de celles des lignes de neige qui sont jugées représentatives du secteur de la station Hydro-Québec 02s. Ainsi, les caractéristiques précédentes témoignent de la validité des données de précipitations provenant des stations LG4-Sud et YAH utilisées à cette station au cours de cette période.

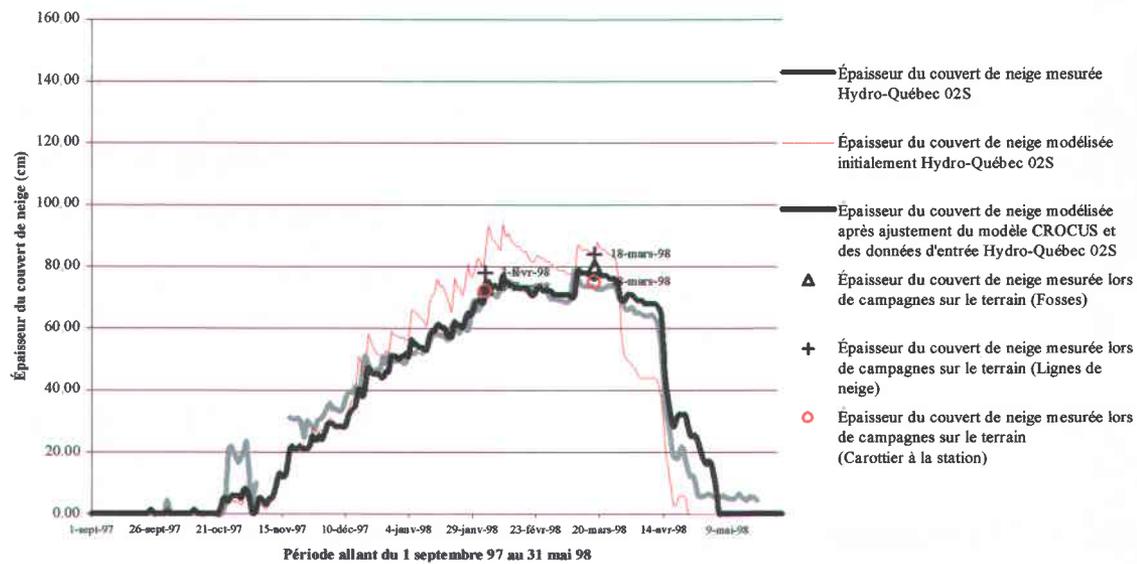


Figure 7.1 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 02s après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998

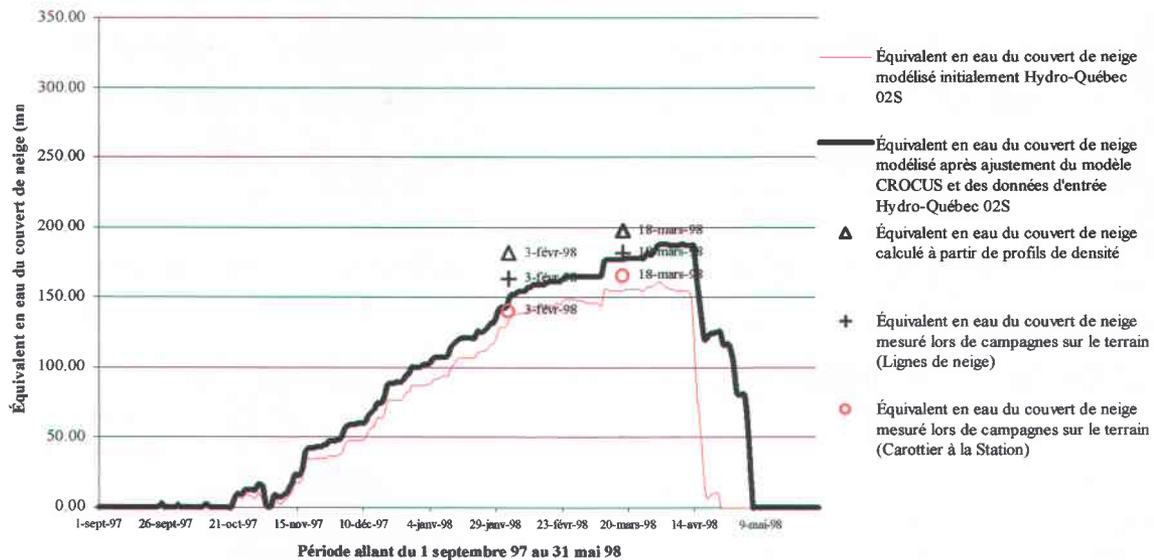


Figure 7.2 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 02s après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998

Les profils de densité modélisés (figures 7.3 et 7.5) s'approchent grandement de ceux mesurés sur le terrain. En ce sens, l'erreur relative moyenne est de 14.83% et l'erreur absolue moyenne est  $45.75\text{kg/m}^3$ . Toutefois, il est à noter que le modèle sous-estime la densité de  $60.0\text{kg/m}^3$  en moyenne entre 20 et 80cm de profondeur en date du 03 février 1998 (figure 7.3) et de  $42.0\text{kg/m}^3$  en moyenne entre 20 et 40 cm de profondeur en date du 18 mars 1998 (figure 7.5). Une telle sous-estimation peut être justifiée par l'équivalent en eau du couvert de neige qui est quelque peu inférieur aux valeurs estimées à partir des profils de densité mesurée sur le terrain.

Il est toutefois difficile de porter un véritable jugement sur les profils modélisés en raison de l'absence de données sur la variabilité spatiale de la densité du couvert à proximité de la station. Néanmoins, les profils de densité modélisés présentent des gradients comparables à ceux mesurés.

Finalement, les profils de températures (figures 7.4 et 7.6) présentent une grande amélioration en comparaison avec les profils modélisés initialement. D'ailleurs, l'erreur relative moyenne résultante est 18.27% alors que l'erreur absolue moyenne est de  $1.34^\circ\text{C}$ . Plus précisément, les températures modélisées en date du 03 février 1998 (figure 7.4) sont pratiquement identiques à celles mesurées sur le terrain tout comme celles modélisées entre 20cm et 80cm de profondeur le 18 mars 1998 (figure 7.6). Par contre, les températures des couches de neige supérieures à 20cm à cette dernière date sont inférieures à celles mesurées de  $5.29^\circ\text{C}$  en moyenne. Cette sous-estimation peut être attribuée à un bon nombre de facteurs qui influencent la température du couvert. Dans le cas présent, il est possible de cibler quatre facteurs majeurs qui sont dans l'ordre:

1. L'influence des mesures de nébulosité sur le calcul du rayonnement infrarouge (Eq 6.8 à 6.11) qui, tel que démontré à la section 6.3.5, influence grandement la température des couches de neige à la surface du couvert nival. En effet, la provenance des mesures de nébulosité (station YAH situé à une distance de 90km) est susceptible d'engendrer de valeurs moins précises de rayonnement infrarouge.

2. L'importance du vent dans le calcul des échanges de chaleur sensible (flux turbulents) à l'interface neige-atmosphère. Plus précisément, la vitesse du vent mesurée à la station YAH peut engendrer des valeurs quelque peu erronées de flux turbulent à la station Hydro-Québec 02s.
3. L'influence de la végétation à proximité de la station Hydro-Québec 02s sur la température du couvert de neige
4. L'absence de données sur la variabilité spatiale de la température du couvert de neige sur le secteur de la présente station.

Néanmoins compte tenu de la provenance des données météorologiques nécessaires aux modélisations à la station Hydro-Québec 02s et de l'importance de la température du couvert sur l'évolution de son épaisseur, les profils de températures modélisées demeurent acceptables.

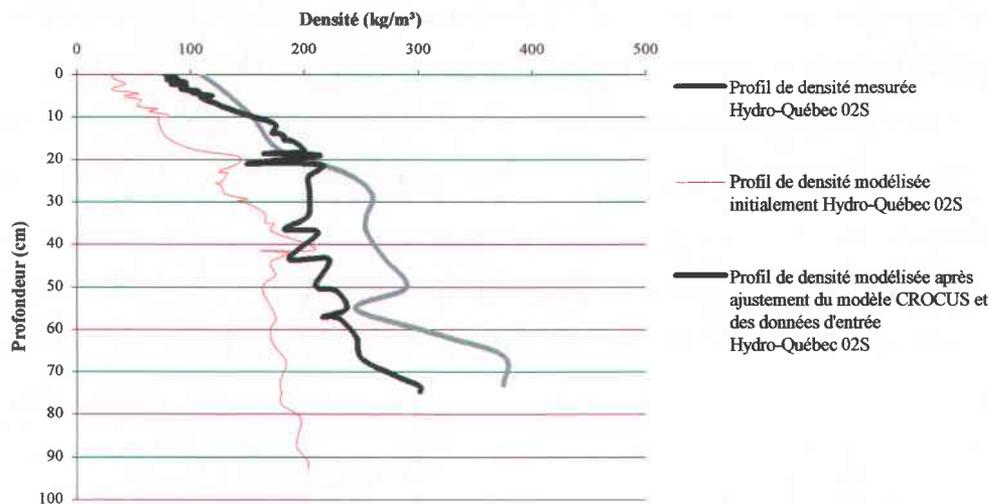


Figure 7.3 Profil de densité modélisée, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 03 février 1998

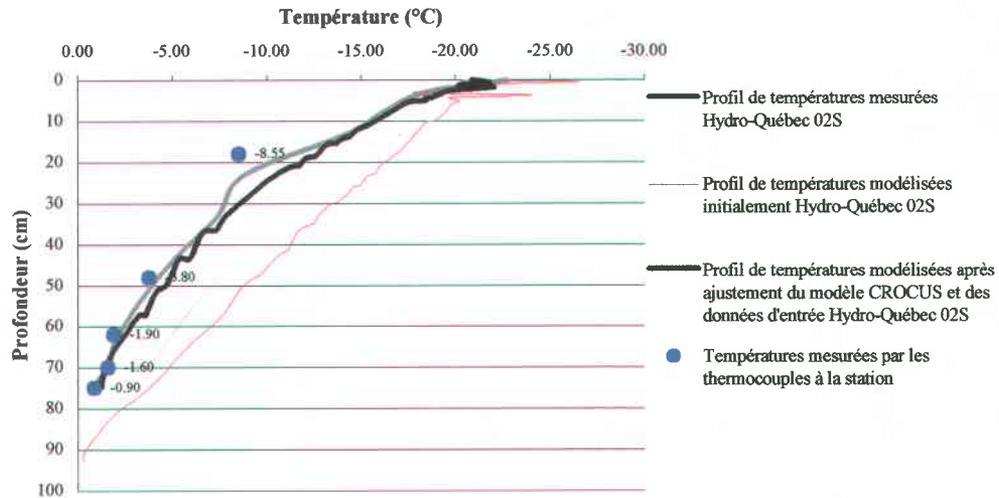


Figure 7.4 Profil de températures modélisées, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date du 03 février 1998

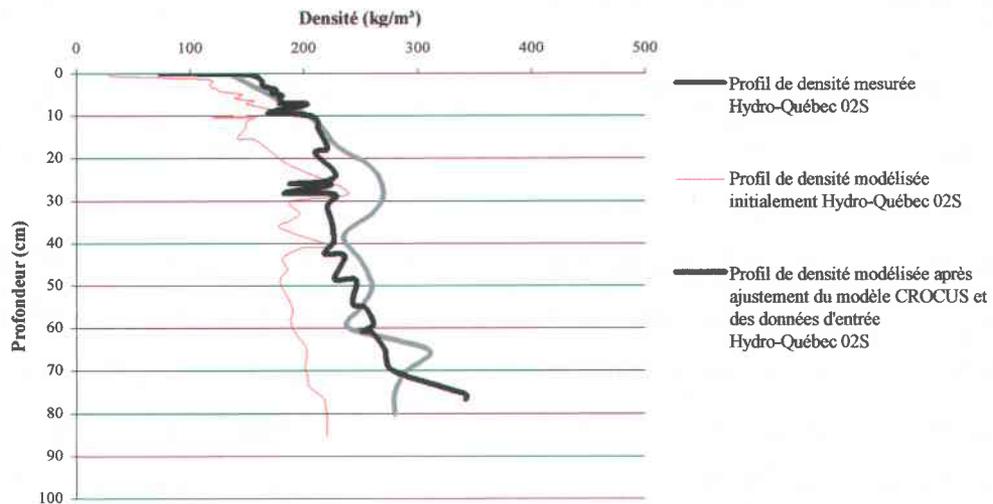


Figure 7.5 Profil de densité modélisée, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 18 mars 1998

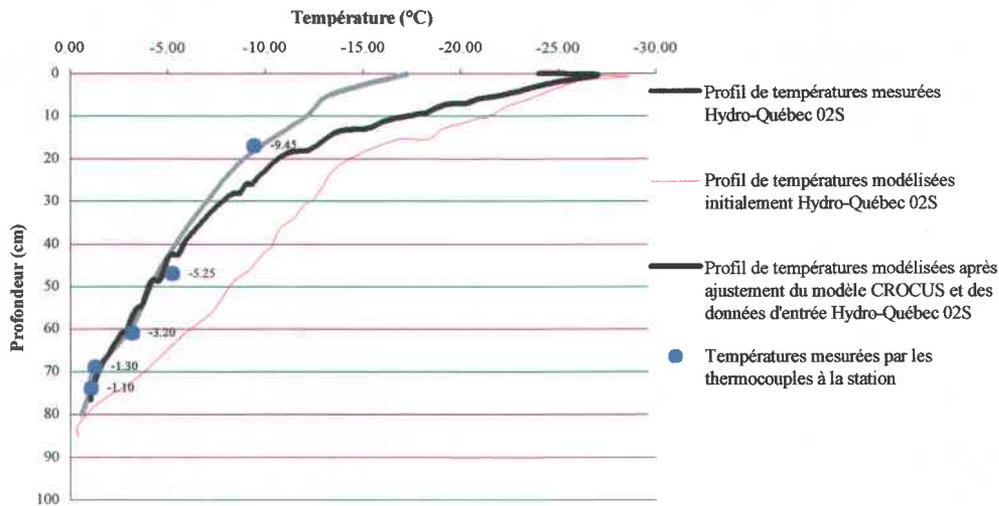


Figure 7.6 Profil de températures modélisées, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date du 18 mars 1998

### 7.1.2 Modélisation à la station Hydro-Québec 11e

Les résultats obtenus à la station Hydro-Québec 11e (figures 7.7 à 7.12), suite à l'étalonnage du modèle présentent, en général, une nette amélioration par rapport aux modélisations initiales. L'épaisseur du couvert de neige modélisée (figure 7.7) s'apparente grandement à celle mesurée par la station et lors de campagnes sur le terrain. Bien que les données d'épaisseur mesurée par la station couvrent une portion restreinte de la période de modélisation, l'erreur absolue moyenne pour cette période est de 3.37cm. L'équivalent en eau du couvert de neige modélisé (figure 7.8) est quant à lui acceptable, puisqu'il atteint des valeurs s'approchant de celles des lignes de neige bien qu'inférieure le 17 mars 1998. Cet écart entre l'équivalent en eau modélisé et mesuré peut être attribué la grande variabilité spatiale du couvert de neige à la station Hydro-Québec 11e en raison de la présence d'une haie d'arbres à proximité de la station. Malgré cet écart, l'évolution de l'équivalent en eau demeure acceptable puisque les valeurs modélisées passent à l'intérieur de l'intervalle des valeurs d'équivalent en eau mesurées.

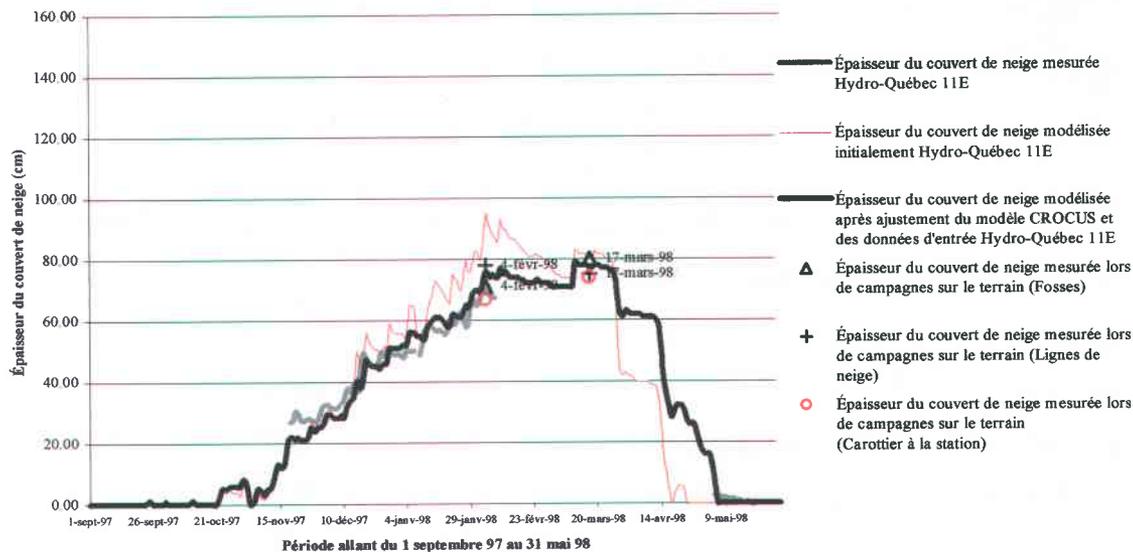


Figure 7.7 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 11e après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998

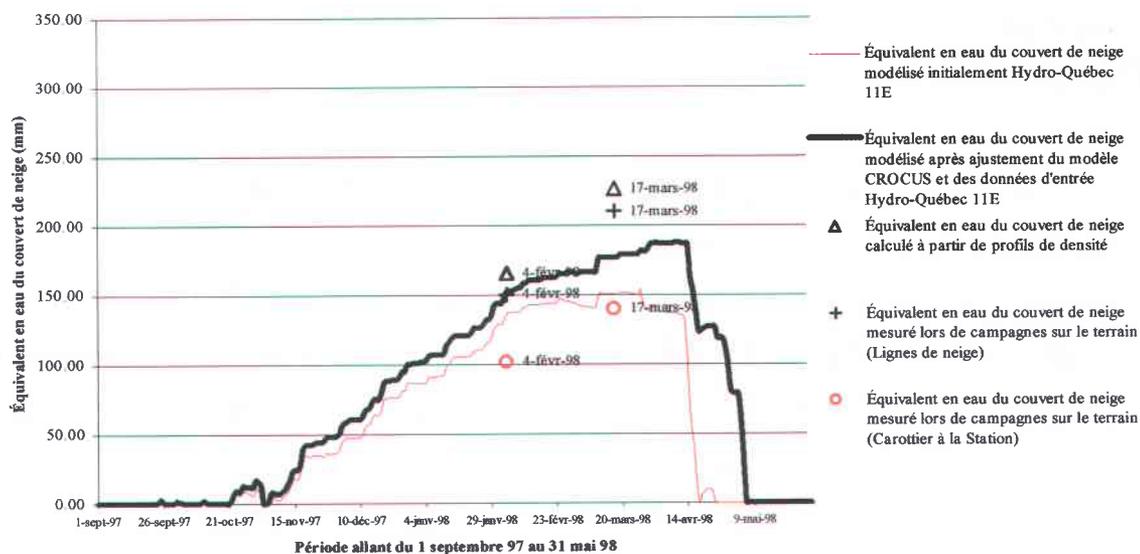


Figure 7.8 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 11e après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998

L'étalonnage du modèle CROCUS contribue également au rapprochement entre les profils de densité modélisée (figures 7.9 et 7.11) et mesurée. En ce sens, l'erreur relative moyenne est de 18.11% et l'erreur absolue moyenne est 47.16kg/m<sup>3</sup>.

Cependant, les densités modélisées sont strictement inférieures à celles mesurées sauf entre 60 et 80cm de profondeur en date du 17 mars 1998 (figure 7.11). Plus précisément, les densités modélisées sont inférieures à celles mesurées de 35kg/m<sup>3</sup> en moyenne en date du 04 février 1998 et de 60kg/m<sup>3</sup> en date du 17 mars entre 0 et 60cm de profondeur. Cette sous-estimation pratiquement systématique s'accorde avec celle de l'équivalent en eau du couvert de neige et peut être attribuée par exemple à la variabilité spatiale du couvert à cette station mentionnée précédemment.

Par contre, le profil modélisé en date du 04 février (figure 7.9) présente une forme et un gradient très semblable à celui mesuré en cette même date. Finalement l'écart notable entre les profils modélisés et mesurés en date du 17 mars 1998 (figure 7.11) peut être attribué à la sous-estimation de l'équivalent en eau du couvert de neige qui est sensiblement inférieur à la valeur estimée à partir du profil de densité mesurée sur le terrain en cette même date.

Contrairement aux profils de densité modélisée, les profils de températures ne présentent pas une amélioration par rapport aux profils initiaux. L'erreur relative moyenne et l'erreur absolue moyenne résultantes sont respectivement de 33.32% et 1.95°C. Bien que les températures modélisées en date du 04 février 1998 (figure 7.10) se rapprochent grandement de celle mesurées sur le terrain, celles modélisées en date du 17 mars 1998 (figure 7.12) s'éloignent des températures mesurées.

Malgré la similitude entre la forme des profils modélisé et mesuré le 17 mars 1998, la détérioration des températures modélisées peut être attribuée aux modifications apportées aux calculs des flux turbulents et du rayonnement infrarouge présentés aux sections 6.3.3 et 6.3.5 (Eq. 6.8 à 6.11). Toutefois, il est plus raisonnable de croire que l'écart entre les

températures observées et modélisées en date du 17 mars, peut être attribué à la sous estimation des densités en cette même date. En effet, la présence de densité plus faible occasionne une diminution de la conductivité thermique du couvert qui provoque à son tour une détérioration du profil de température correspondant.

Toutefois, les profils modélisés initialement et finalement demeurent approximatifs en raison du mauvais fonctionnement de la station Hydro-Québec 11e et par conséquent de l'absence de données de températures extérieures mesurées par cette station. Ainsi en présence de telles données manquantes, la température est estimée à partir des données disponibles aux autres stations. Cette estimation peut cependant ne pas être représentative des conditions météorologiques réelles à la station et ainsi générer des résultats défailants.

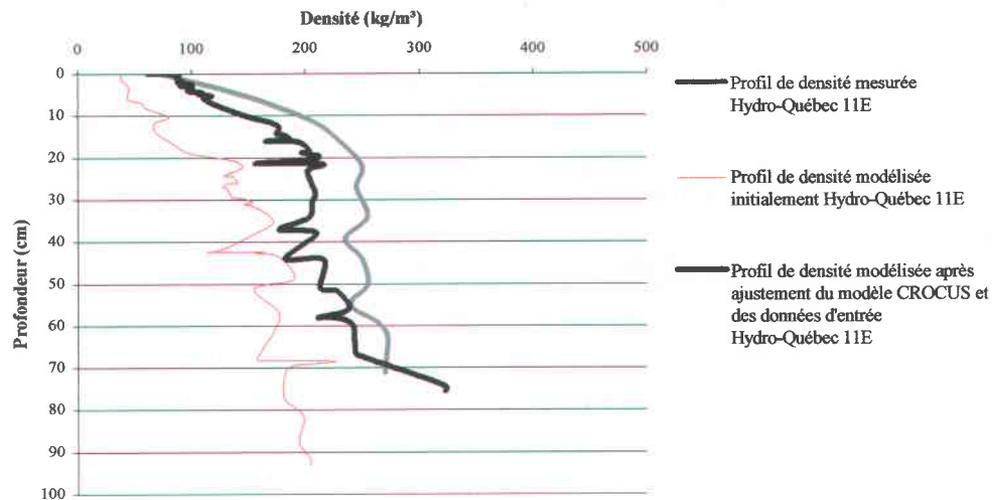


Figure 7.9 Profil de densité modélisée, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurée à la station Hydro-Québec 11e en date du 04 février 1998

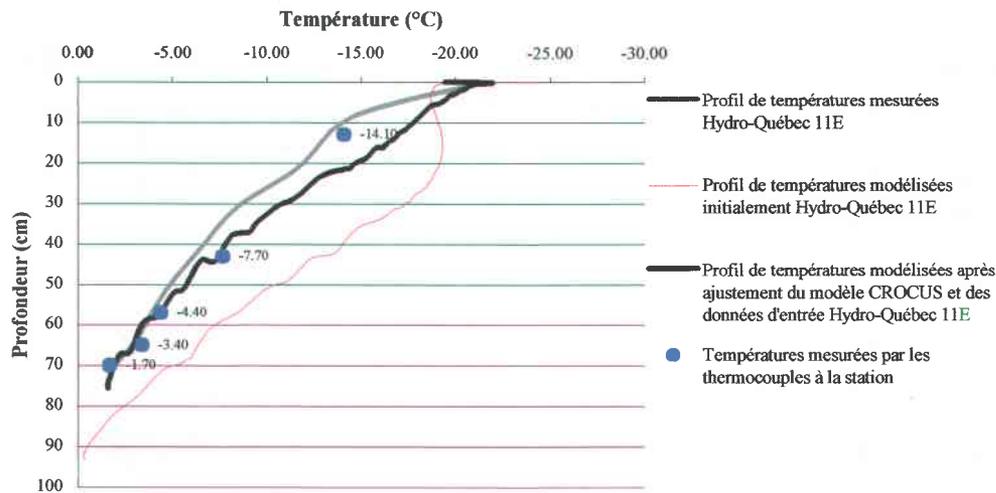


Figure 7.10 Profil de températures modélisées, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurées à la station Hydro-Québec 11e en date du 04 février 1998

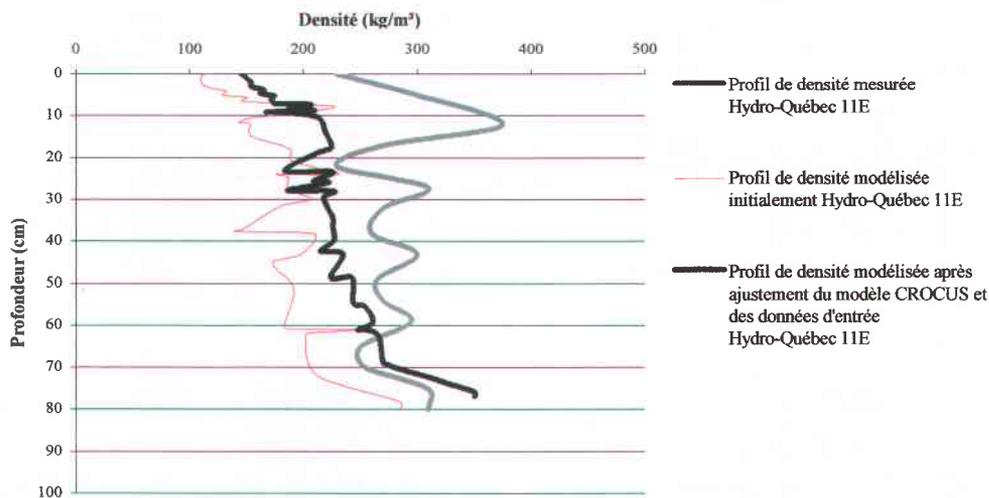


Figure 7.11 Profil de densité modélisée, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurée à la station Hydro-Québec 11e en date du 17 mars 1998

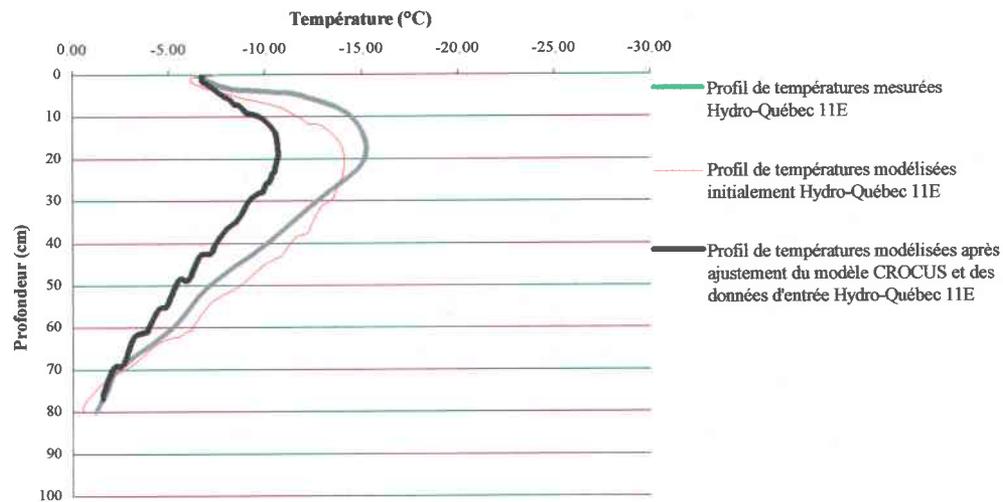


Figure 7.12 Profil de températures modélisées, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurées à la station Hydro-Québec 11e en date du 17 mars 1998

### 7.1.3 Modélisation à la station Hydro-Québec 19e

Dans le même sens que les deux stations précédentes, les résultats obtenus à la station Hydro-Québec 19e (figures 7.13 à 7.18) présentent également une nette amélioration par rapport aux résultats initiaux. Par contre, l'épaisseur du couvert de neige modélisée (figure 7.13) présente un écart constant avec celle mesurée par la station. En raison de la forme similaire entre l'évolution de l'épaisseur modélisée et mesurée, il est raisonnable de suspecter un mauvais seuillage de la sonde laser à la station Hydro-Québec 19e. L'hypothèse d'un mauvais fonctionnement de la station dans le cas présent est renforcée par la grande similitude entre les valeurs d'épaisseur mesurées lors de campagnes sur le terrain et celles modélisées. Ainsi l'évolution de l'épaisseur du couvert peut être jugée acceptable. L'équivalent en eau du couvert de neige modélisé (figure 7.14) présente à son tour des valeurs qui sont pratiquement identiques à celles des lignes de neige représentatives du secteur de la station Hydro-Québec 19e.

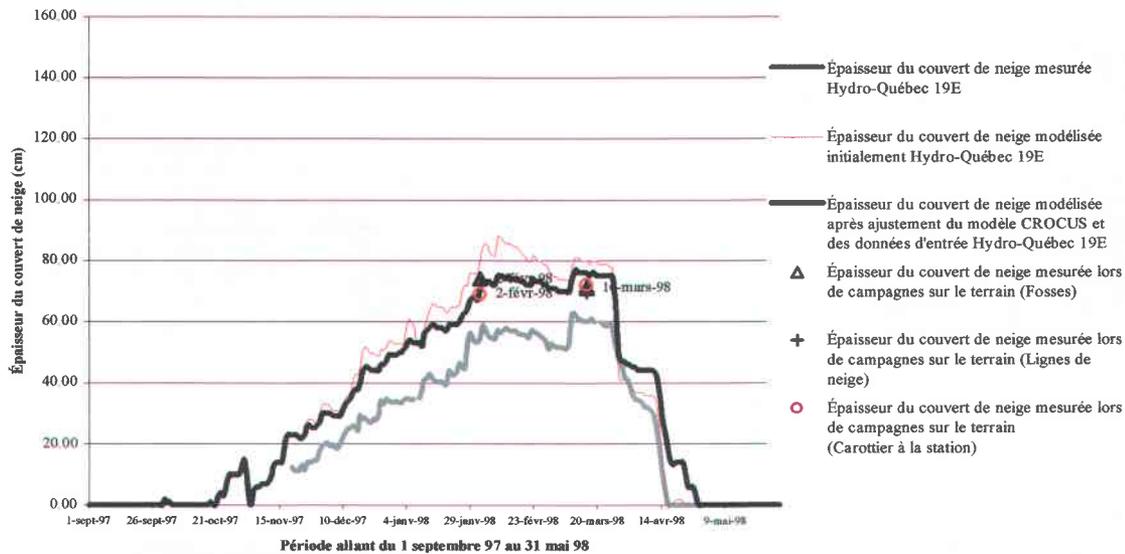


Figure 7.13 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 19e après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998

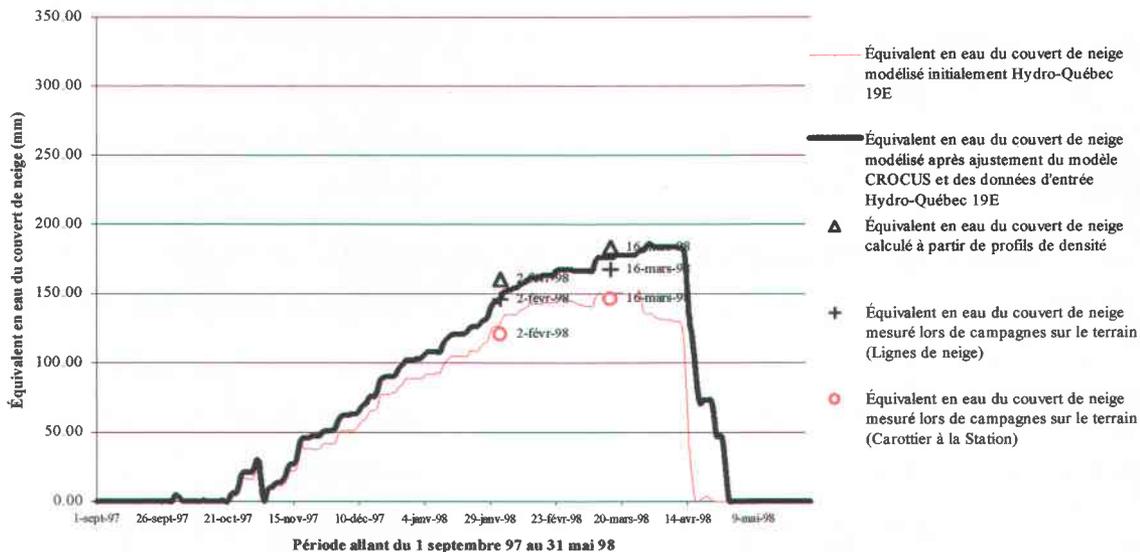


Figure 7.14 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 19e après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998

Les profils de densité (figures 7.15 et 7.17) sont grandement améliorés et ainsi l'erreur relative moyenne est de 15.92% et l'erreur absolue moyenne est  $40.37\text{kg/m}^3$ . Plus précisément, le profil modélisé en date du 02 février 1998 est grandement similaire à celui mesuré (figure 7.15) alors que le profil modélisé en date du 16 mars 1998 présente des densités inférieures (de  $65\text{kg/m}^3$  en moyenne) à celles mesurées entre 10 et 50cm (figure 7.17). Cet écart entre les densités modélisées et mesurées peut être attribué à la surestimation de l'épaisseur du couvert nival par rapport aux mesures prises sur le terrain en date du 16 mars 1998 alors que l'équivalent est pratiquement identique à la valeur estimé à partir du profil de densité en cette même date. Ces deux phénomènes conjoints provoquent donc une légère sous-estimation des densités.

Néanmoins ces profils demeurent de bonne qualité voire même excellente, dans le cas du 02 février, quant à leur forme et gradient en comparaison avec ceux mesurés.

Les profils de températures (figures 7.16 et 7.18) présentent également une certaine amélioration en comparaison avec les profils modélisés initialement. L'erreur relative moyenne résultante est de 33.15% alors que l'erreur absolue moyenne est de  $1.88^\circ\text{C}$ . En ce sens, les températures modélisées en date du 02 février et du 16 mars 1998 (figures 7.16 et 7.18) pour les couches de neige comprises entre 30 et 70cm de profondeur s'apparentent grandement à celles mesurées. Par contre, les températures modélisées pour les couches de neige supérieures à 30cm pour les deux dates sont inférieures à celles mesurées. Toutefois, contrairement aux stations Hydro-Québec 02s et 11e, cette sous-estimation peut être difficilement attribuée à la provenance des données météorologiques en raison de la proximité entre la présente station et la station YAH. Par conséquent, seul les coefficients empiriques présents dans les calculs des flux turbulents et du rayonnement infrarouge (Eq. 6.8 à 6.11) peuvent être mis en cause. Également, il est pertinent de souligner l'absence de données sur la variabilité spatiale de la température du couvert de neige sur le secteur de la présente station.

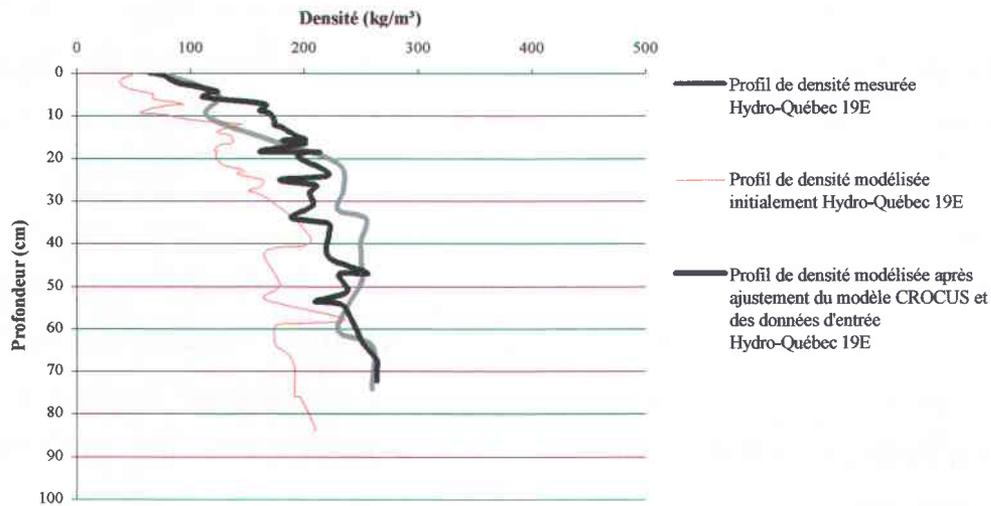


Figure 7.15 Profil de densité modélisée, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurée à la station Hydro-Québec 19e en date du 02 février 1998

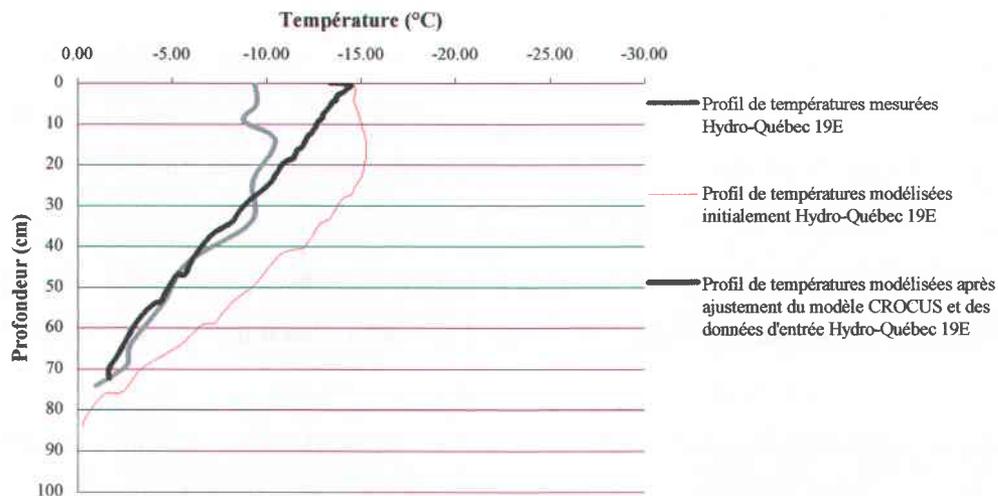


Figure 7.16 Profil de températures modélisées, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurées à la station Hydro-Québec 19e en date du 02 février 1998

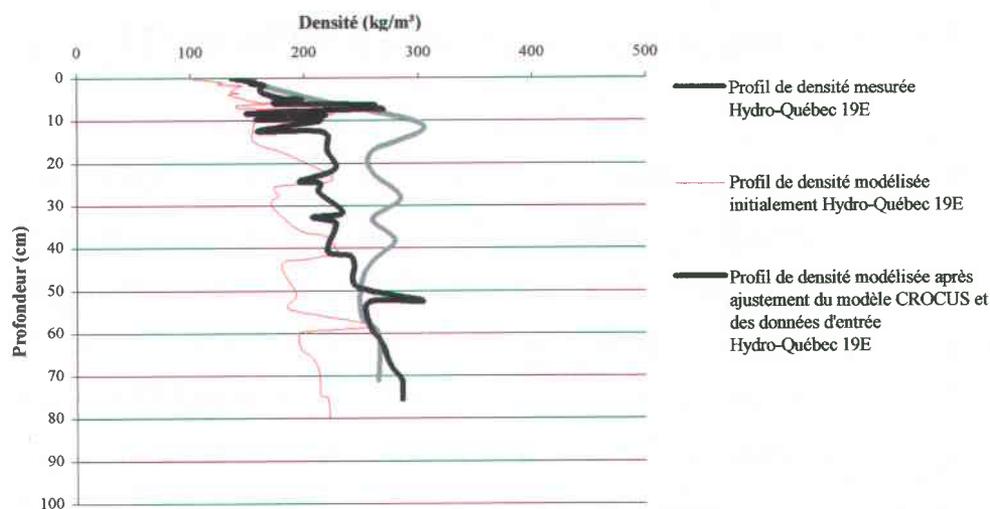


Figure 7.17 Profil de densité modélisée, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurée à la station Hydro-Québec 19e en date du 16 mars 1998

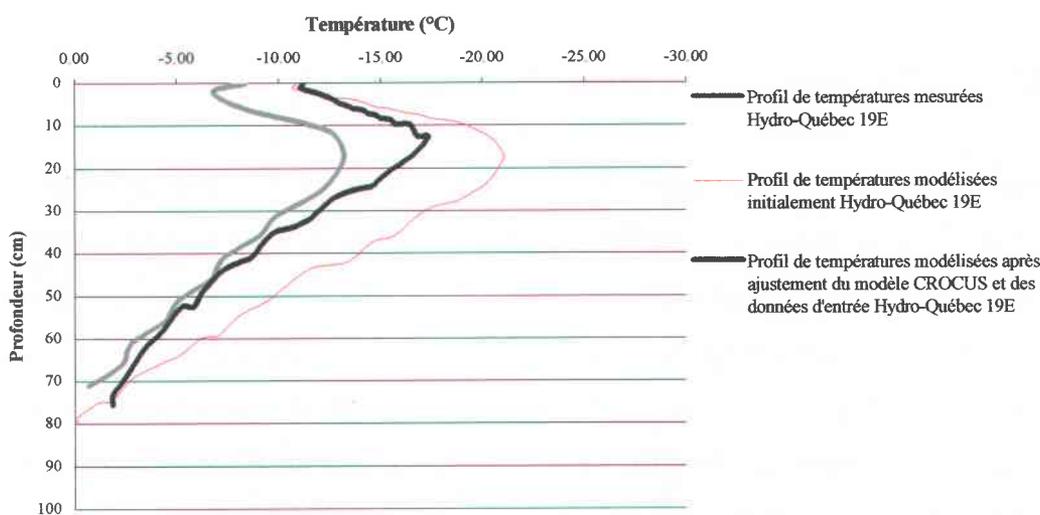


Figure 7.18 Profil de températures modélisées, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurées à la station Hydro-Québec 19e en date du 16 mars 1998

## 7.2 Période allant du 1 septembre 1998 au 31 mai 1999

Avant de présenter les résultats obtenus aux stations Hydro-Québec 02s et 11e pour cette période, il est pertinent de mentionner que la station Hydro-Québec 19e, n'offre aucune mesure pour la présente période. De plus les précipitations utilisées afin de procéder aux modélisations pour cette période proviennent entièrement de la station YAH. En raison de la provenance des mesures de précipitations et de leur grande variabilité quantitative en comparaison avec celles des autres stations pour cette période (voir section 5.2) un ajustement régional des précipitations a été réalisé dans le but d'obtenir de meilleures modélisations. Ainsi, contrairement aux autres modélisations, la valeur du coefficient d'ajustement des précipitations VRR3 (voir section 6.3.4) a été modifiée et abaissée à 0.90 contrairement à 1.00 pour l'ensemble des modélisations restantes.

### 7.2.1 Modélisation à la station Hydro-Québec 02s

Les résultats obtenus à la station Hydro-Québec 02s pour cette période (figures 7.19 à 7.24) présente aussi une amélioration par rapport aux modélisations réalisées en utilisant les valeurs initiales de certains paramètres. La qualité résultante de ces résultats est d'ailleurs grandement comparable avec celle atteinte à cette même station lors de la période précédente. L'épaisseur du couvert de neige modélisée (figure 7.19) respecte celle mesurée en continue à la station et lors de campagnes sur le terrain. Il est à noter que l'épaisseur modélisée est légèrement trop importante entre le 26 janvier et le 9 mars 1999. Ce léger décalage entre l'épaisseur modélisée et mesurée peut être attribué, par exemple, à la surestimation de la chutes de neige mesurée par la station YAH en date du 26 janvier 1999 en comparaison avec l'importance de cette même chute de neige à la station Hydro-Québec 02s. Toutefois, l'erreur absolue moyenne de 4.52cm demeure assez faible. L'équivalent en eau du couvert de neige modélisé (figure 7.20) présente des valeurs qui sont quelque peu supérieures à celles des lignes de neige qui sont jugées représentatives du secteur de la station Hydro-Québec 02s.

Malgré cette légère différence, l'évolution de l'équivalent en eau demeure acceptable puisque les valeurs modélisées passe à l'intérieur de l'intervalle de celles mesurées.

Ainsi les caractéristiques précédentes témoignent de la validité de l'utilisation et de l'ajustement pour la présente station des données de précipitations provenant des stations YAH.

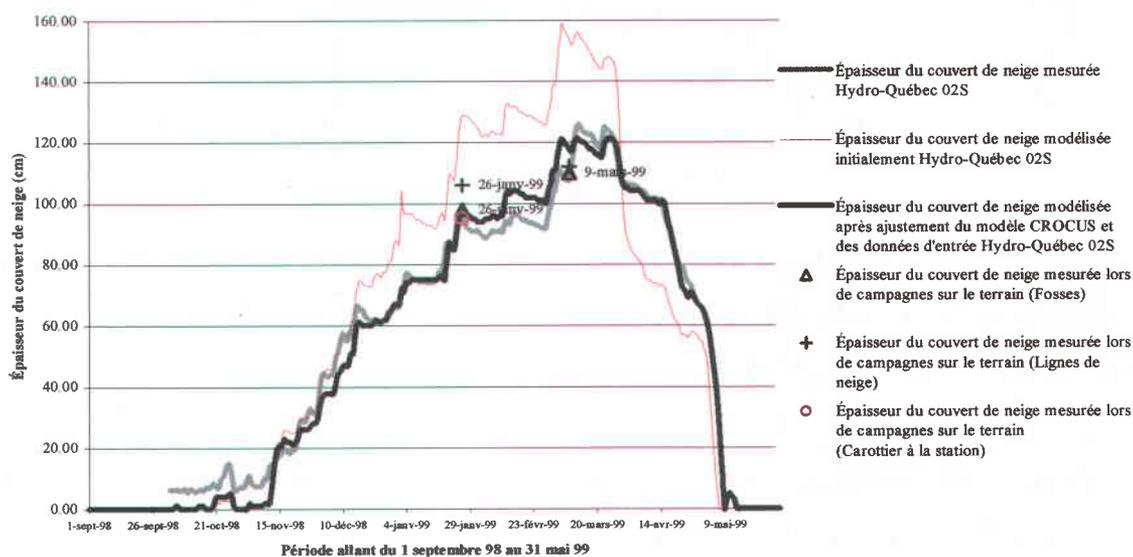


Figure 7.19 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 02s après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée pour la période allant du 1 septembre 1998 au 31 mai 1999

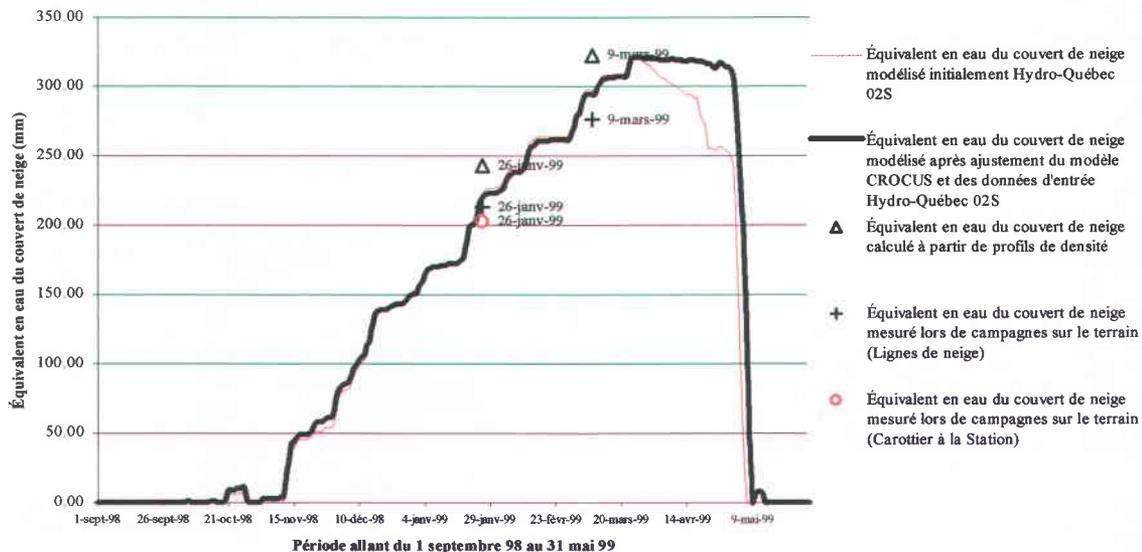


Figure 7.20 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 02s après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée pour la période allant du 1 septembre 1998 au 31 mai 1999

Les profils de densité modélisés (figures 7.21 et 7.23) s'approchent grandement de ceux mesurés sur le terrain. En ce sens, l'erreur relative moyenne est de 16.38% et l'erreur absolue moyenne est  $43.88\text{kg/m}^3$ . Toutefois, il est à noter que le modèle sous-estime très légèrement la densité de  $12\text{kg/m}^3$  en moyenne entre 0 et 20cm et de  $45\text{kg/m}^3$  en moyenne entre 40 et 90cm de profondeur en date du 26 janvier 1999 (figure 7.21) et pratiquement sur l'ensemble de l'épaisseur du couvert de neige en date du 09 mars 1999 ( $50\text{kg/m}^3$  en moyenne) (figure 7.23). De telles sous-estimations peuvent être en essentiellement justifiées par l'équivalent en eau du couvert de neige qui est quelque peu inférieur aux valeurs estimées à partir des profils de densité mesurée sur le terrain.

Toutefois, tel que mentionné précédemment, l'absence de données sur la variabilité spatiale de la densité du couvert à proximité de la station empêche l'évaluation approfondie de la qualité des profils de densité modélisés. Néanmoins, ces mêmes profils présentent des gradients qui sont pratiquement identiques à ceux des profils mesurés.

---

Finalement, les profils de températures (figures 7.22 et 7.24) présentent une nette amélioration en comparaison avec les profils modélisés initialement. L'erreur relative moyenne résultante est 33.23% alors que l'erreur absolue moyenne est de 2.23°C. Plus précisément, les températures modélisées en date du 26 janvier 1999 (figure 7.22) sont pratiquement identiques à celles mesurées sur le terrain. Par contre, les températures modélisées le 09 mars 1999 (figure 7.24) sous-estiment celles mesurées sur le terrain sur pratiquement l'ensemble du couvert. Cette sous-estimation peut être attribuée sensiblement aux mêmes facteurs énoncés précédemment à la section 7.1.1. Toutefois, dans le cas présent, les valeurs enregistrées par la sonde sont légèrement différentes de celles mesurées lors de la campagne sur le terrain de mars 1999. Ainsi, un tel écart entre les températures constitue un premier indice de la variabilité spatiale probable du profil de températures du couvert de neige.

Néanmoins, compte tenu de la provenance des données météorologiques nécessaires aux modélisations à la station Hydro-Québec 02s et de l'importance de la température du couvert sur l'évolution de son épaisseur, les profils de températures modélisées demeurent tout-à-fait acceptables, sauf peut-être pour les températures des couches de neige en surface modélisées le 09 mars 1999.

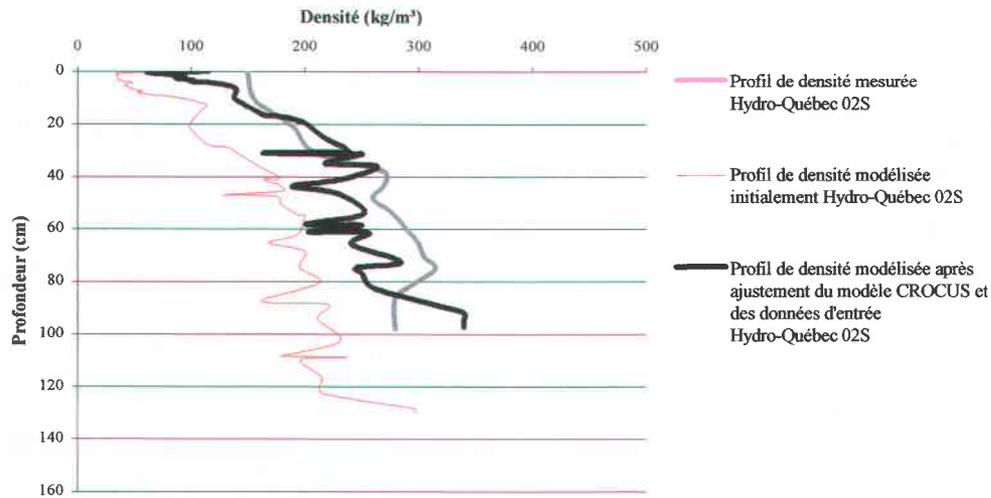


Figure 7.21 Profil de densité modélisée, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 26 janvier 1999

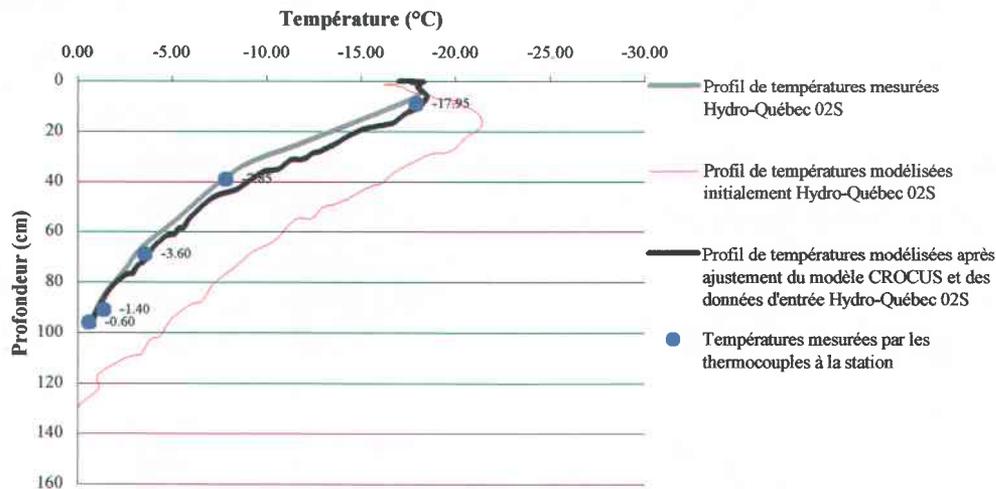


Figure 7.22 Profil de températures modélisées, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date du 26 janvier 1999

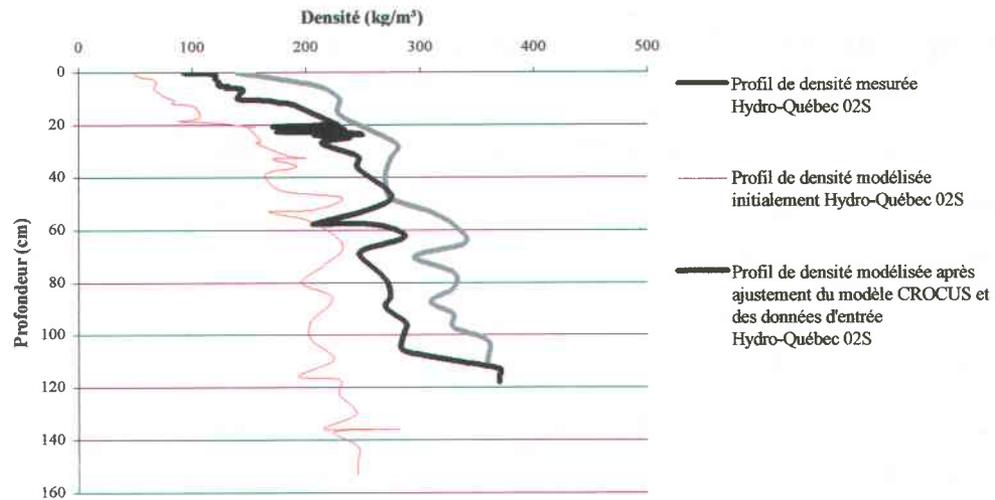


Figure 7.23 Profil de densité modélisée, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 09 mars 1999

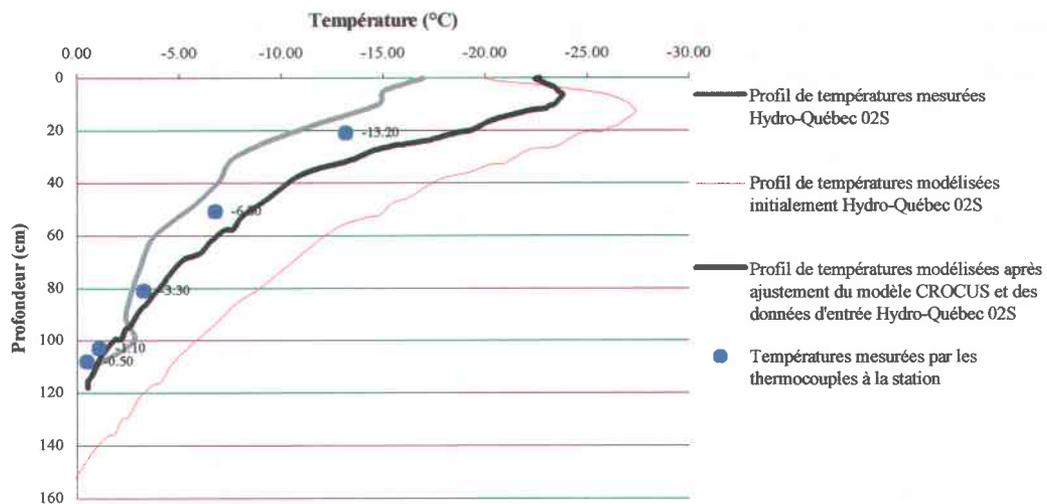


Figure 7.24 Profil de températures modélisées, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date du 09 mars 1999

### 7.2.2 Modélisation à la station Hydro-Québec 11e

Malgré l'absence de profils de densité et de températures mesurées sur le terrain pour la station Hydro-Québec 11e au cours de la présente période, l'épaisseur et l'équivalent du couvert de neige modélisés peuvent être comparés aux valeurs mesurées. Ainsi, il est possible d'observer une assez bonne correspondance entre l'épaisseur du couvert de neige modélisée (figure 7.25) et celle mesurée par la station et lors de campagnes sur le terrain. Toutefois, il existe un certain décalage entre l'épaisseur modélisée et mesurée entre le 10 et le 20 mars 1999. Ce décalage peut être attribué à la provenance des mesures de précipitations, c'est-à-dire la station YAH situé à environ 100km à l'ouest de la station Hydro-Québec 11e. Bien que l'épaisseur mesurée par la station couvre une portion restreinte de la présente période de modélisation, l'erreur absolue moyenne de 2.83cm demeure assez faible. L'équivalent en eau du couvert de neige modélisé (figure 7.26) est quant à lui satisfaisant puisqu'il atteint des valeurs pratiquement identiques à celles des lignes de neige bien que légèrement supérieure à celle du 09 mars 1999.

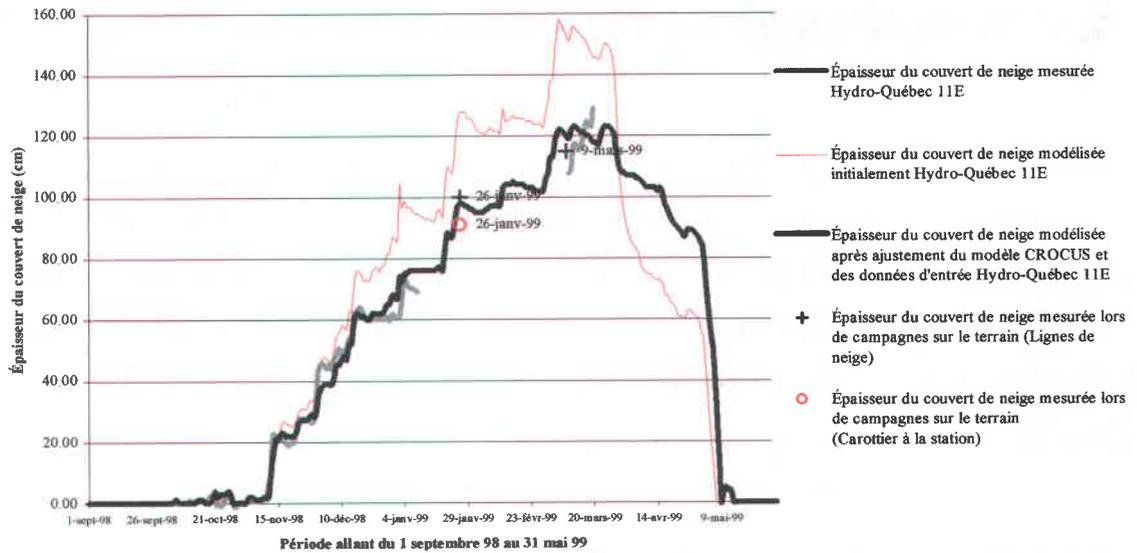


Figure 7.25 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 11e après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée pour la période allant du 1 septembre 1998 au 31 mai 1999

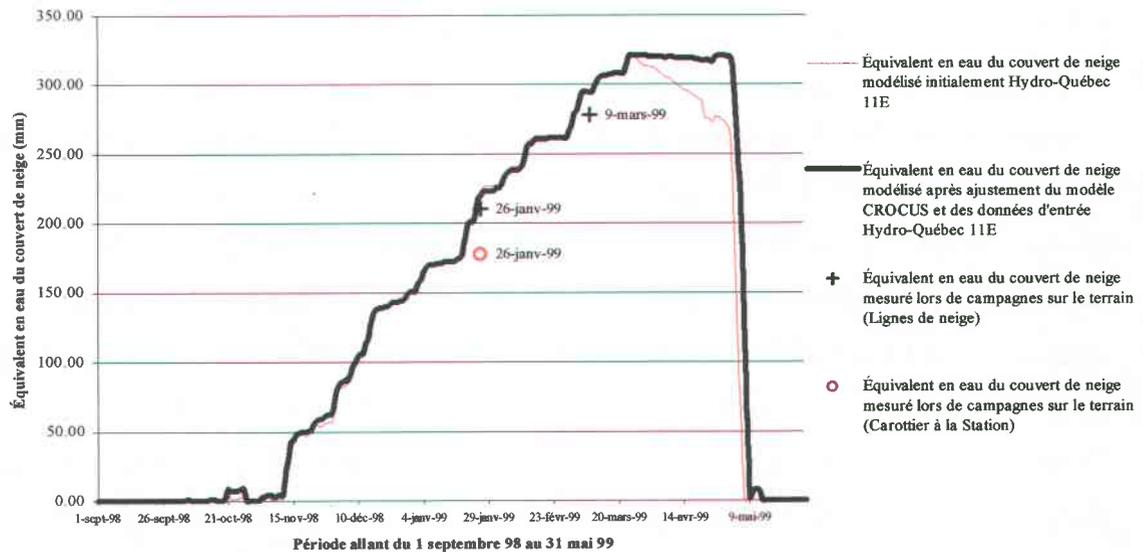


Figure 7.26 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 11e après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée pour la période allant du 1 septembre 1998 au 31 mai 1999

## 7.3 Période allant du 1 septembre 1999 au 31 mai 2000

Avant de présenter les résultats obtenus à la station Hydro-Québec 02s pour cette période, il est pertinent de mentionner que les stations Hydro-Québec 11e et 19e, n'offrent aucune mesure pour la présente période. De plus les précipitations utilisées afin de procéder aux modélisations pour cette période proviennent entièrement de la station LG4-Sud en raison de l'absence de mesures de précipitations disponibles pour la station YAH (voir section 5.2).

### 7.3.1 Modélisation à la station Hydro-Québec 02s

Les résultats obtenus à la station Hydro-Québec 02s pour cette période (figures 7.27 à 7.32) présentent aussi une amélioration par rapport aux modélisations réalisées en utilisant les valeurs initiales de certains paramètres. La qualité résultante de ces résultats est toutefois moins bonne que celle atteinte pour cette même station lors de la période précédente. L'épaisseur du couvert de neige modélisée (figure 7.27) présente des différences notables en comparaison avec celle mesurée en continue à la station notamment, entre le 22 décembre 1999 et le 26 février 2000. D'ailleurs, l'erreur absolue moyenne est de 8.07cm. Bien que la forme de l'évolution de l'épaisseur respecte celle mesurée au début de la période défailante (28 décembre 1999 au 7 février 2000), certains événements de précipitations enregistrés à la station LG4-Sud engendrent un fort décalage entre l'épaisseur modélisée et mesurée. De tels événements mettent en doute la représentativité des précipitations provenant de la station LG4-Sud et utilisées à la station Hydro-Québec 02s au cours de la présente période. Toutefois, sans ces précipitations, les présentes modélisations n'auraient pu être réalisées.

Néanmoins, les décalages mentionnés sont cependant marqués par certaines reprises présentant une bonne correspondance entre l'épaisseur modélisée et celle mesurée, entre autres, lors des campagnes sur le terrain (1 février et 21 mars 1999) et à l'approche de la période de fonte.

Ainsi, l'évolution de l'équivalent en eau du couvert de neige (figure 7.28) coïncide assez bien avec les valeurs ponctuelles mesurées sur le terrain.

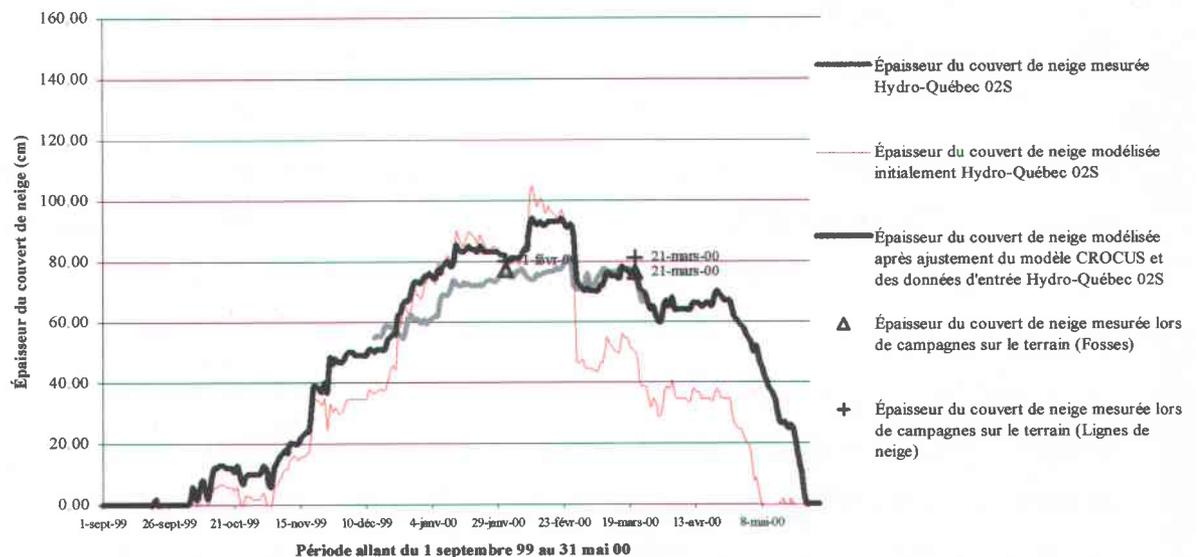


Figure 7.27 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 02s après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée pour la période allant du 1 septembre 1999 au 31 mai 2000

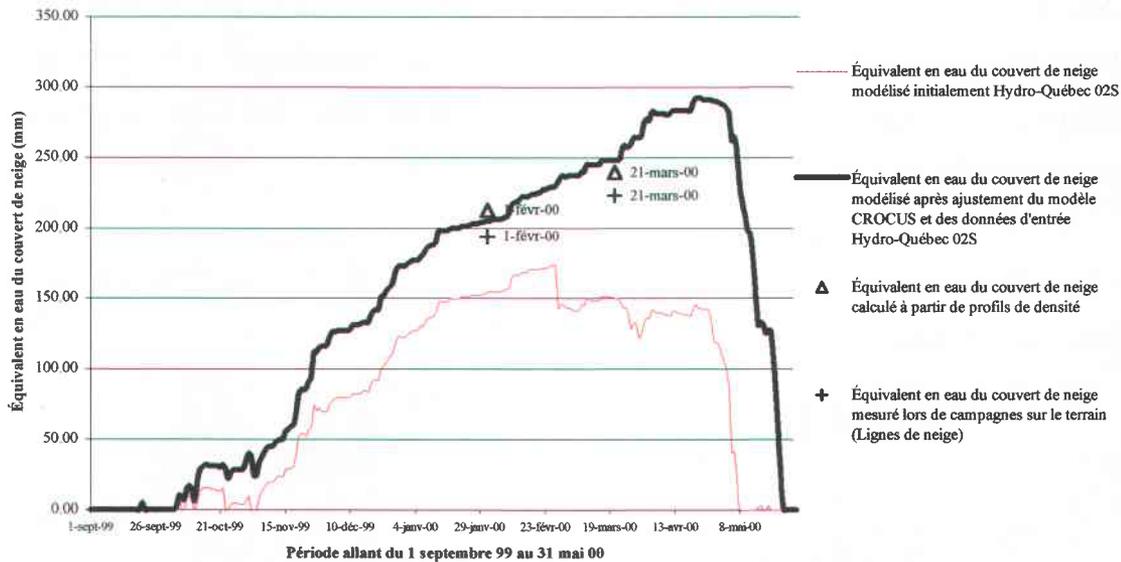


Figure 7.28 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 02s après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée pour la période allant du 1 septembre 1999 au 31 mai 2000

Les profils de densité (figures 7.29 et 7.31) modélisés s'écartent eux aussi de ceux mesurés. Plus précisément, celui du 01 février 2000 (figure 7.29) sous-estime les densités mesurées de  $43\text{kg/m}^3$  en moyenne entre 20 et 70cm de profondeur pour ensuite les surestimer de  $70\text{kg/m}^3$  entre 70 et 80cm. Dans le même sens, le profil modélisé en date du 21 mars 2000 (figure 7.31) sous-estime les densités mesurées de  $25\text{kg/m}^3$  en moyenne entre 0 et 10cm de profondeur pour ensuite les surestimer de  $43\text{kg/m}^3$  en moyenne sur la majorité des couches de neige restantes.

L'erreur relative moyenne et l'erreur absolue moyenne restent assez faibles c'est-à-dire 13.20% et  $38.58\text{kg/m}^3$ . Les sous-estimations rencontrées en date du 1 février 2000 peuvent être attribuées à l'équivalent en eau du couvert de neige qui est quelque peu inférieur à la valeur estimée à partir du profil de densité mesurée sur le terrain en cette même date. Dans le même sens, la surestimation des densités constatée le 21 mars 2000 correspond à la surestimation de l'équivalent en eau du couvert de neige pour la même date alors que l'épaisseur modélisée respecte celle mesurée.

Finalement, les profils de températures (figures 7.30 et 7.32) modélisés correspondent presque parfaitement avec ceux mesurés sur le terrain. En ce sens, l'erreur relative moyenne et l'erreur absolue moyenne, pour les deux profils, sont respectivement de 13.45% et de 0.41°C.

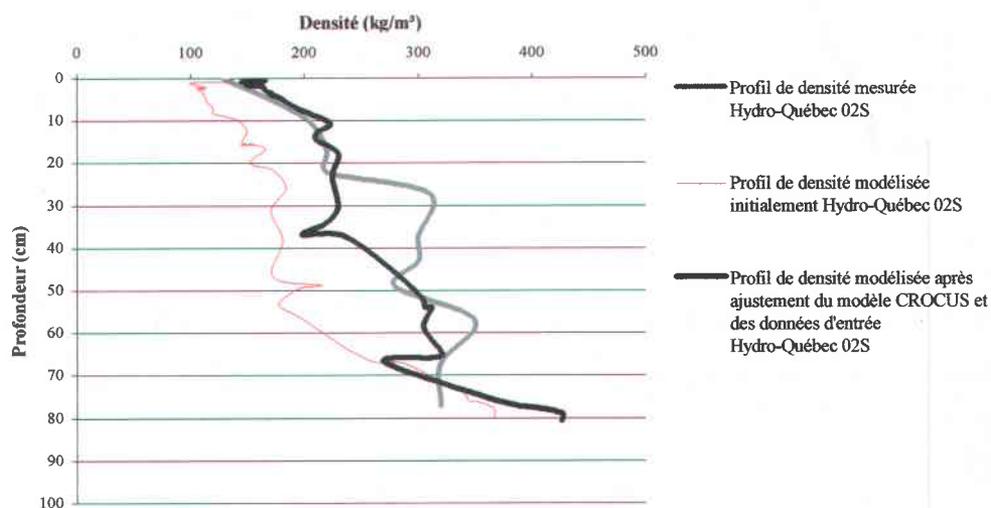


Figure 7.29 Profil de densité modélisée, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 01 février 2000

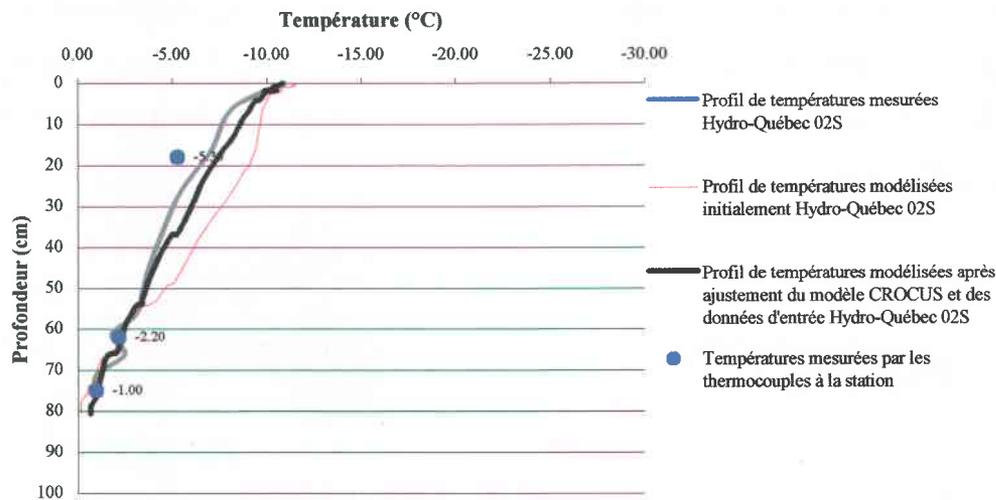


Figure 7.30 Profil de températures modélisées, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date du 01 février 2000

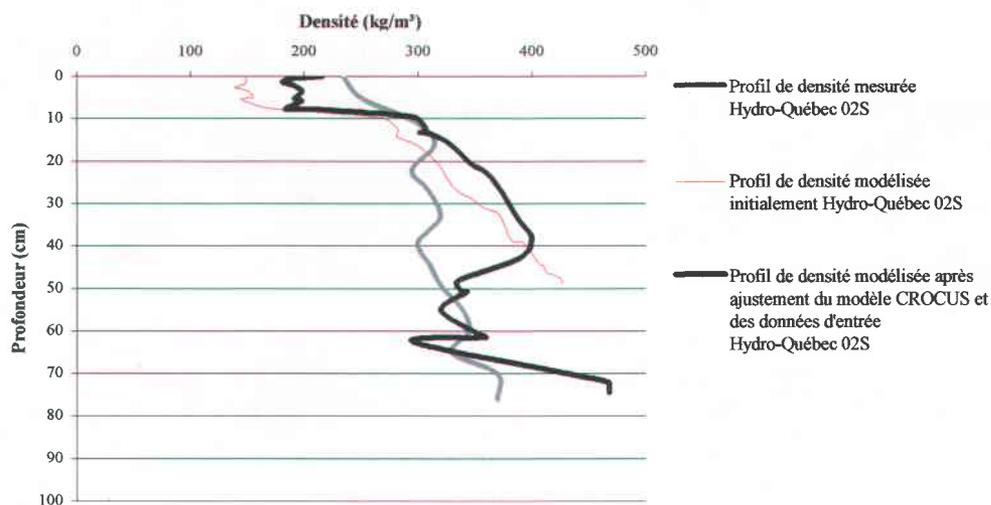


Figure 7.31 Profil de densité modélisée, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 21 mars 2000

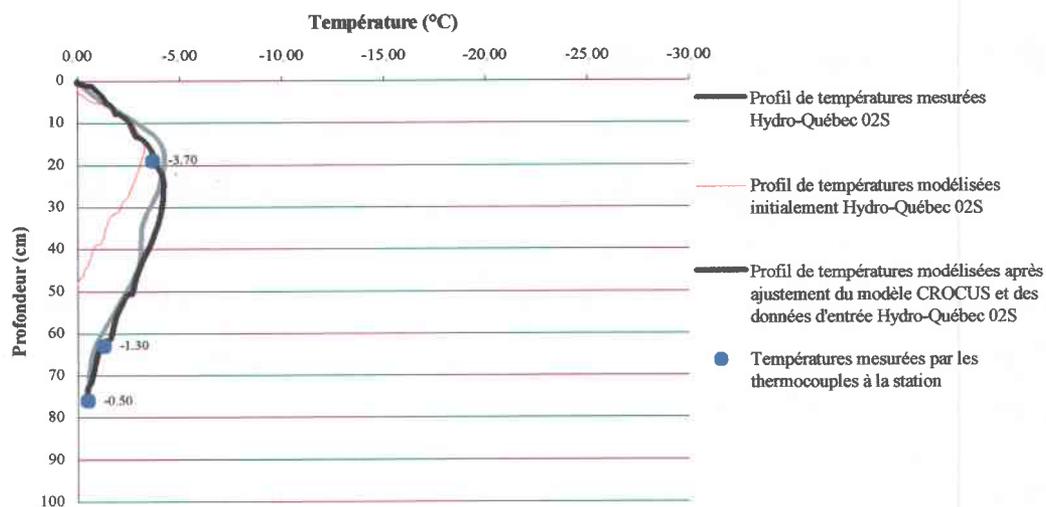


Figure 7.32 Profil de températures modélisées, après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date du 21 mars 2000

## 7.4 Synthèse des résultats

Les résultats précédents peuvent également être représentés en fonction de leur qualité résultante. Ainsi le tableau synthèse 7.1 permet d'obtenir un regard plus global sur l'ensemble des modélisations en comparant l'erreur absolue moyenne initiale et finale pour les principaux paramètres caractérisant le couvert de neige (épaisseur, équivalent en eau (EQ), densité et température).

Tableau 7.1 Synthèse des résultats en fonction de l'erreur absolue moyenne entre les paramètres modélisés et mesurés aux différentes stations

		Erreur absolue moyenne entre les paramètres modélisés et mesurés aux stations					
		Hydro-Québec 02s		Hydro-Québec 11e		Hydro-Québec 19e	
Période	Paramètres	Initiale	Finale	Initiale	Finale	Initiale	Finale
1997-1998	Épaisseur (cm)	9.06	4.18	7.48	3.37	9.17 <sup>2</sup>	3.50 <sup>2</sup>
	EQ <sup>1</sup> (mm)	28.00	10.00	36.00	18.00	16.50	5.00
	Densité <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	85.69	45.75	92.65	47.16	77.35	40.35
	Température <sup>3</sup> (°C)	4.30	1.34	3.39	1.95	4.71	1.88
1998-1999	Épaisseur (cm)	18.99	4.52	10.46	2.83		
	EQ <sup>1</sup> (mm)	16.00	12.50	16.00	13.00		
	Densité <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	103.34	43.88	-	-		
	Température <sup>3</sup> (°C)	6.42	2.23	-	-		
1999-2000	Épaisseur (cm)	16.15	8.07				
	EQ <sup>1</sup> (mm)	56.00	18.00				
	Densité <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	74.40	38.58				
	Température <sup>3</sup> (°C)	1.20	0.41				

Le tableau synthèse 7.1 permet de constater que l'étalonnage du modèle contribue à l'amélioration de l'ensemble des résultats aux stations. Ainsi, il est raisonnable d'affirmer que le modèle CROCUS présente de bonnes aptitudes à effectuer le suivi complet du couvert de neige dans des conditions météorologiques du Nord du Québec.

<sup>1</sup> L'erreur absolue calculée pour l'équivalent en eau prend uniquement en compte les valeurs de lignes de neige qui sont jugées représentatives du secteur de chacune des stations

<sup>2</sup> L'erreur absolue calculée pour l'épaisseur à la station Hydro-Québec 19e prend uniquement en compte les données mesurées sur le terrain lors de campagne sur le terrain.

<sup>3</sup> L'erreur absolue calculée pour les profils de densité et de température regroupe les deux dates pour lesquelles on dispose de tels profils mesurés aux stations lors de campagne sur le terrain.

## **8 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS**

D'abord, mentionnons que les quatre premiers objectifs de cette étude ont été atteints. En effet, dans un premier temps, le modèle CROCUS développé par Brun et al. (1989 et 1992) au Centre national français d'étude de la neige a pu être à la fois étudié et compris tant dans son mode de fonctionnement que dans les processus physiques qu'il simule. Une attention particulière a toutefois été portée sur les mécanismes déterminant l'évolution du couvert nival susceptible d'être influencés par les conditions météorologiques du Nord du Québec différentes de celles présentes sur les sites français pour lesquels le modèle fût préalablement ajusté. Par la suite, le modèle CROCUS a été adapté avec succès à l'environnement Windows sur micro-ordinateur.

Après quoi, les données nécessaires au lancement du modèle CROCUS ont été obtenues à partir de trois stations météorologiques (YAH, LG4-Sud et Est) situées sur le sous-bassin hydrographique LG4 de la rivière La Grande. Bien que ces données ne soient pas disponibles pour l'ensemble des stations, au cours des périodes de suivi du couvert nival visées par la présente étude, leur quantité demeure cependant suffisante pour permettre la création de fichier météo nécessaire au lancement du modèle CROCUS et à la réalisation de modélisations aux stations de données sur le couvert de neige (Hydro-Québec 02s, 11e et 19e).

Dans le cadre d'études futures éventuelles, il serait grandement intéressant de tenter de jumeler, pour une même station, l'acquisition de données météorologiques et de données sur le couvert nival. Un tel jumelage permettrait une meilleure évaluation de l'aptitude du modèle CROCUS à reproduire les caractéristiques du couvert de neige puisqu'il réduirait considérablement les risques d'erreurs engendrées par la provenance des données météorologiques à la fois exigées par le modèle ou encore utilisées dans le calcul de paramètres d'entrée du modèle.

Les fichiers des données météorologiques requis par le modèle, dans le but de procéder aux modélisations ont, par la suite, pu être créés, à l'aide d'un programme utilitaire développé à cet effet.

En ce qui a trait au quatrième objectif, cette étude a clairement démontré que le modèle CROCUS constitue un outil apte à la réalisation de simulations sur le sous-bassin LG4 dans le but de reproduire les profils de température et de densité du couvert nival ainsi que son évolution. Ainsi, il a été démontré que le modèle CROCUS peut être utilisé et adapté aux conditions environnementales du Québec et ce, malgré la provenance des données météorologiques utilisées aux stations de modélisations et le nombre restreint d'études menées sur les processus régissant l'évolution du couvert de neige en de telles conditions environnementales. En ce sens, les résultats obtenus aux stations Hydro-Québec 02s et 11e présentent en général une grande qualité, compte tenu de la provenance des données comme la vitesse du vent, la température du point de rosée (nécessaire au calcul de l'humidité de l'air), les précipitations et la nébulosité (également utilisée dans le calcul des rayonnements solaires direct, diffus et infrarouge). En effet, ces données proviennent essentiellement de la station YAH située à environ 90km de ces deux stations.

Plus précisément, suite à l'étalonnage du modèle, l'évolution de l'épaisseur est, en général, très bien simulée aux différentes stations pour l'ensemble des périodes de modélisations et ce, malgré la provenance des précipitations. Il est à noter que cette nuance ne s'applique pas à la station Hydro-Québec 19e en raison de sa proximité avec la station YAH. De plus, afin de tenter de mieux simuler l'évolution de l'épaisseur à la station Hydro-Québec 02s pour la période comprise entre le 1 septembre 1999 et le 31 mai 2000, il serait intéressant d'obtenir si possible les données de précipitations mesurées à la station YAH puisque les données disponibles à cette station ont été largement utilisées aux stations Hydro-Québec 02s, 11e et 19e au cours des périodes de modélisations précédentes.

La modélisation de l'équivalent en eau du couvert de neige aux différentes stations demeure acceptable et ce, malgré la grande variabilité des mesures effectuées lors des campagnes sur le terrain. En effet, la totalité des modélisations d'équivalent en eau atteignent des valeurs situées à l'intérieur des intervalles déterminés à partir des mesures prises sur le terrain. Toutefois, lors d'études subséquentes, il serait pertinent de tenter d'améliorer le calcul de correction des précipitations ou encore d'obtenir des mesures de précipitations directement aux stations de modélisations dans le but d'obtenir des équivalents en eau modélisés s'approchant des valeurs estimées à partir des profils de densité.

Les profils de densité modélisée sont, quant à eux, de bonne qualité voir même très bonne dans certains cas compte tenu de la provenance des données météorologiques. Toutefois, la présence de sous-estimation de densités modélisées par rapport aux densités mesurées peut être soulignée pour certains résultats. Cette sous-estimation de la densité correspond toutefois généralement avec celle de l'équivalent en eau du couvert qui peut être mis en cause à son tour par la provenance des précipitations touchant essentiellement les stations Hydro-Québec 02s et 11e.

Une meilleure compréhension des processus de compaction du couvert et de détermination de la densité de la neige fraîche pour des conditions similaires à celles du Nord du Québec contribuerait également à un meilleur ajustement de ces processus à l'intérieur du modèle CROCUS

Tout comme les profils de densités, ceux de températures sont, eux aussi, de bonne à excellente qualité. Généralement, les températures modélisées respectent sensiblement celles mesurées. De plus, la qualité des modélisations s'accroît grandement avec l'augmentation de la profondeur. Toutefois, certains profils présentent des températures modélisées inférieures à celles mesurées sur le terrain. Ces sous-estimations sont d'autant plus marquées pour les couches de neige situées à proximité de la surface.

Tel que démontré lors de la présente étude, le rayonnement infrarouge incident à la surface du couvert de neige calculé entre autre à l'aide de la nébulosité mesurée à la station YAH, et influencé par la présence de végétation, semble un facteur déterminant dans la détermination de la température des couches de neige en surface. Au rayonnement infrarouge, il faut également ajouter la densité du couvert et les échanges de chaleurs sensibles à l'interface neige-atmosphère.

Ainsi, dans le but d'améliorer les profils de températures modélisées, un approfondissement de l'influence de la forêt sur le bilan radiatif à la surface du couvert de neige semble requis. De plus, la détermination de meilleurs coefficients relatifs aux flux turbulents contribuerait également à l'amélioration des températures modélisées.

En conclusion, le modèle CROCUS ajusté aux conditions environnementales du Nord du Québec, permet un suivi assez réaliste et détaillé du couvert de neige sur le sous bassin LG4 de la rivière La Grande. Malgré la provenance de données météorologiques, le modèle demeure grandement efficace quant à la simulation des différents processus influençant l'évolution du couvert de neige. Par conséquent, cette étude démontre que le modèle CROCUS constitue un outil pertinent dans la détermination des caractéristiques du couvert de neige pour le Québec septentrional.

## **BIBLIOGRAPHIE**

---

1. ANDERSON, E.A. 1976. A point energy and mass balance model of a snow cover. Silver Spring, Maryland: U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA Technical Report NWS 19, 150 p.
2. BENNIS, S. et P.-E. Brunnelle. 1989. «Modèles d'évolution du manteau nival et de la fonte des neiges». Journal Canadien de Génie Civil, vol. 16, p. 219-226.
3. BERNIER, M., J.-P. Fortin, Y. Gauthier, R. Gauthier, J.-L. Bisson et P. Vincent. 1999. «Estimation de l'équivalent en eau du couvert nival au moyen d'images radar satellitaires». Revue des Sciences de l'Eau, vol. 12, no 2, p. 407-423.
4. BERNIER, M. et Y. Gauthier. 2000. Implantation d'Egeau sur l'ensemble du bassin de la rivière La Grande à l'hiver 2000. Québec : INRS-Eau, col. 2000, Rapport Scientifique # 568f1, 46 p.
5. BOHREN, C.F. et B.R. Barkstrom. 1974. «Theory of the optical properties of snow». Journal of Geophysics Research, vol 79, no. 30, p. 4527-4535.
6. BRUN, E. et E. Martin. 1997. «Couplage d'un modèle de neige avec un modèle de climat». La houille blanche, vol. 7, p. 69-75.
7. BRUN, E., Y. Durand, E. Martin et L. Braun. 1994. «Snow modelling as an efficient tool to simulate snow cover evolution at different spatial scales». Snow and Ices covers: Interactions with Atmosphere and Ecosystem, Proceedings of Yokohama Symposia J2 and J5, July 1993, IAHS Publ., no 223, p. 163-174.
8. BRUN, E., P. David, M. Sudul et G. Brunot. 1992. «A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting». Journal of Glaciology, vol. 38, no. 128, p. 13- 22.

9. BRUN, E., E. Martin, V. Simon, C. Gendre et C. Coléou. 1989. «An energy and mass model of snow cover suitable for operational avalanche forecasting». Journal of Glaciology, vol. 35, no. 121, p. 333- 342.
10. BRUTSAERT, W. 1984. Evaporation into the Atmosphere, Theory, History, and Applications. col. Environmental fluid mechanics, Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Company, 299 p.
11. Centre d'études de la neige. 1996. Le modèle d'évolution du manteau neigeux CROCUS. Météo France, Centre national de recherches météorologiques, Guide d'utilisation version 2.2., Saint Martin d'Hères, 26 p.
12. COLBECK, S.C. 1972. «A theory of water percolation in snow». Journal of Glaciology, vol. 11, no. 63, p. 369-385.
13. DEARDORFF, J.W. 1968. «Dependence of air-sea transfer coefficients on bulk stability». Journal of Geophysics Research, vol. 73, no. 8, p. 2549-2557.
14. DENOTH, A., W. Seidenbusch, M. Blumthaler, P. Kirchlechner, W. Ambach et S.C. Colbeck. 1979. Study of water drainage from columns of snow. CRREL Rep. 79-1.
15. DICKINSON, R.E., A. Henderson-Sellers et P.J. Kennedy. 1993. Biosphere Atmosphere Transfert Scheme (BATS) Version le as coupled to the NCAR Community Climate Model. NCAR Tech. Note NCAR/TN-387+STR, 69p.
16. ESSERY, R., E. Martin, H. Douville, A. Fernández et E. Brun. 1999. «A comparison of four snow models using observations from an alpine site». Climate Dynamics, vol. 15, p. 583-593.

- 
17. FERNÁNDEZ, A. 1998. «An energy balance model for seasonal snow evolution». Phys. Chem. Earth, vol. 23, p. 661-666.
18. FORTIN, J.-P., R. Moussa, C. Bouquillon. et J.-P. Villeneuve. 1995. «HYDROTEL, un modèle hydrologique distribué pouvant bénéficier des données fournies par la télédétection et les systèmes d'information géographique». Revue des Sciences de l'Eau, vol. 8, no 1, p. 97-124.
19. FORTIN, J.-P., J.-P. Villeneuve, J. Benoît, C. Blanchette, M. Montminy et H. Proulx. 1989. Hydrotel 1.1; User's guide. INRS-EAU, Université du Québec; Scientific Report INRS-EAU, no 276, 91 p.
20. GOODISON, B.E., P.Y.T. Louie et D. Yang. 1998. WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison, Final Report. WMO/CIMO Report No. 67, WMO/TD No 872, World Meteorological Organization, Geneva.
21. GOODISON, B.E. et D.J. McKay. 1978. «Canadian snowfall measurements ; Borne implications for the collection and analysis of data from remote stations». Proc. Western Snow Conferences, April 18-20, Cetter Rock, Oregon, U.S.A., 46, p. 48-57.
22. JORDAN, R. 1991. A one-dimensional temperature model for a snow cover. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Special Report 91-16, Hanover, NH, U.S.A.
23. KONDO, J. et T. Yamazaki. 1990. «A prediction model for snowmelt, snow surface temperature and freezing depth using a heat balance method». Journal of applied meteorology, vol. 29, p. 375-135.

24. LANGHAM, E.J. 1981. Physics and properties of snowcover. in Gray, D.M. and Male, D.H. (eds.). Handbook of snow. Pergamon Press, Willowdale, p. 275-337.
25. LOTH, B. et H.F. Graf. 1998. «Modelling the snowcover in climate studies. 1. Long-term integrations under different climatic conditions using a multilayered snow-cover model». Journal of Geophysics Research, vol. 103, p. 11313-11327.
26. MARTIN, E. et Y. Lejeune. 1998. «Turbulent fluxes above the snow surface». Annals of Glaciology, vol. 26, p. 179-183.
27. MARTIN, E., B. Timbal et E. Brun. 1997. «Downscaling of general circulation model outputs: simulation of snow climatology of French Alps and sensitivity to climate change». Climate Dynamics, vol. 43, p. 45-56.
28. MARTINEC, J. 1975. «Snowmelt-runoff model for steam flow forecasts». Nordic Hydrology, vol. 6, no. 3, p. 145-154.
29. MELLOH, R.A. 1999. A Synopsis and Comparison of Selected Snowmelt Algorithms. U.S. Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL Report 99-8.
30. MELLOH, R.A., S.F. Daly, R.E. Davis, R. Jordan et G.G. Koenig. 1997. «An operational distributed snow dynamics model for the Sava River, Bosnia». Eastern Snow Conference and Western Snow Conference Proceedings, Joint 54th and 65th, p. 152-162.
31. MORIN, G., J.P. Fortin, J.P. Lardeau, W. Sochanska et S. Paquette 1981. Modèle CEQUEAU : Manuel d'utilisation. Québec, INRS-Eau, col. 1981, Rapport scientifique/ INRS-Eau, no. 93, 449 p.

- 
32. NAVARRE, J.-P. 1975. «Modèle unidimensionnel d'évolution de la neige déposée. Modèle perce-neige». Météorologie, vol. 4, no. 3, p. 103-120.
33. OBLED, C. et B. Rosse. 1977. «Mathematical models of a melting snowpack at an index plot». Journal of Hydrology, vol. 32, p. 139-163.
34. POMEROY, J.W. et K. Dion. 1996. «Winter radiation extinction and reflection in a boreal pine canopy , Measurements and modelling». Eastern Snow Conference Issue, Williamsburg, Virginia, U.S.A., p. 105-118.
35. SERGENT, C., P. Chevrand, J. Lafeuille et D. Marboury. 1987. «Caractérisation optique de différents types de neige. Extinction de la lumière dans la neige». Journal of Physics. (Paris). vol. 48, Colloq. C1, p. 361-367.
36. TARBOTON, D.G., T.G. Chowdhury et T.H. Jackson. 1994. A spatially distributed energy balance snowmelt model. Utah Water Research Laboratory Working paper. WP-94-HWR-DGT/003, Utah State University, Utah.
37. YANG, Z.L., R.E. Dickinson, A. Robock et K. Ya. Vinnikov. 1997. «Validation of the submodel of the Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme with Russian snow cover and meteorological observational data». Journal of Climate, vol. 10, p. 353-373.

## **ANNEXE 1**

# **DÉTAIL DES DONNÉES D'ENTRÉE ET DE SORTIE DU MODÈLE CROCUS**

---

## **Données d'entrée et de sortie du modèle CROCUS**

CROCUS est un modèle unidimensionnel : le manteau neigeux est considéré comme un empilement de couches parallèles à la pente, les échanges de masse et d'énergie sont projetés orthogonalement à la pente. L'évolution du manteau neigeux est calculée à partir d'un profil initial et des conditions météorologiques horaires.

Le modèle a besoin, en entrée, d'un profil initial du manteau neigeux (fichier PROi) et de l'évolution des conditions météorologiques au pas de temps horaire (fichier MET). En sortie, on obtient au choix :

1. Un fichier de valeurs quotidiennes (fichier QUOT) contenant la hauteur de neige et l'équivalent en eau à une heure de la journée fixée à l'avance et l'écoulement à la base du manteau neigeux durant les 24 heures précédentes ;
2. Des profils complets du manteau neigeux (écrits dans le fichier PROo) ;
3. La température de surface au pas horaire (fichier TSURF) ;
4. Les flux de surface horaires ou quotidiens (fichier FLUX).

Les variables météorologiques d'entrée (fichier MET) sont présentées au tableau A1.1.

Tableau A1.1 Variables météorologiques d'entrée du modèles CROCUS

Paramètre	Unité	Validité	Commentaires
Température de l'air	°K	Heure H (instantané)	
Vent au-dessus de la surface	m/s	Heure H (instantané)	
Humidité de l'air	%	Heure H (instantané)	
Précipitation	mm	Entre H-1 et H	Équivalent en eau
Phase	0 : pluie 1 : neige	Entre H-1 et H	Valeurs intermédiaires possibles
Rayonnement infrarouge Descendant	W/m <sup>2</sup>	Entre H-1 et H	Mesuré ou calculé
Rayonnement solaire direct Incident	W/m <sup>2</sup>	Entre H-1 et H	Mesuré ou calculé
Rayonnement solaire diffus Incident	W/m <sup>2</sup>	Entre H-1 et H	Mesuré ou calculé
Nébulosité	0 : ciel clair 1 : ciel couvert	Entre H-1 et H	Valeurs intermédiaires Possibles

Lorsque les rayonnements solaire et infrarouge ne sont pas mesurés, on dispose de deux algorithmes permettant leur calcul. Le premier permet le calcul du rayonnement infrarouge incident BERL par la formule BERLIANDA (Eq. 2.24, 2.25 et 2.26), il utilise en entrée :

1. la température de l'air en °C
2. la nébulosité (en dixième (1/10) de la voûte céleste)
3. la tension de vapeur d'eau (HPA)

Le second permet le calcul, pour un site donné, des rayonnements solaires théoriques globaux, directs et diffus sur une surface élémentaire horizontale, il utilise en entrée :

Les paramètres temporels suivants :

1. Date (AAAA,MM,JJ)
2. Heure et 1/10<sup>ème</sup> UTC

Les caractéristiques du site suivantes :

1. Masque solaire en degrés donnés en rose de 72 (soit par pas de 5 degrés) par rapport au nord géographique ;
2. Altitude du site en mètres
3. Latitude du site en degrés (>0 dans l'hémisphère Nord)
4. Longitude du site en degrés (>0 à l'est du méridien de Greenwich)

Les paramètres météorologiques suivants :

1. Température de l'air en °C
2. % Humidité de l'air (0,100)
3. Nébulosité (en 1/10<sup>ième</sup> de la voûte céleste)

Les variables décrivant le profil initial (fichier PROi) sont présentées au tableau A1.2.

Tableau A1.2 Variables décrivant le profil initial utilisées par le modèle CROCUS

Paramètre	Unité	Commentaires
Date du profil initial	AAAA MM DD HH	La date à laquelle le profil initial est observé doit être identique à celle correspondant au début des variables météorologiques
Nombre de couches	Entre 0-50	Le profil initial peut ou non présenter de la neige
Épaisseur de chaque couche	cm	
Température de chaque couche	°C	
Densité sèche	g/cm <sup>3</sup>	
Teneur en eau liquide	g/cm <sup>3</sup>	
Type de grains (dendricité, sphéricité, taille)	-	La granulométrie des cristaux est déterminée à partir de graphiques et de tableaux présentés dans le guide d'utilisation de CROCUS en fonction des caractéristiques des grains observés
Variable historique indiquant la présence de grains anguleux et/ou d'eau liquide	-	
Age des grains	AAAA MM DD	

Les fichiers de sortie du modèle CROCUS (PROo, QUOT, TSURF) sont présentés respectivement aux tableaux A1.3 à A1.6.

Le fichier PROo contenant les différents paramètres décrivant le profil du couvert de neige est présenté au tableau A1.3.

Tableau A1.3 Profil du manteau calculé par le modèle CROCUS

Paramètre	Unité
Épaisseur des strates du profil	cm
Température des strates du profil	°C
Masse volumique des strates du profil (densité sèche)	g/cm <sup>3</sup> ou kg/m <sup>3</sup>
Masse volumique d'eau liquide présente dans chacune des strates	g/cm <sup>3</sup>
Deux variables descriptives des grains	-
Épaisseur totale du couvert de neige	cm
Écoulement du jour	mm
Date de formation des strates	AAAA MM DD
Date du profil	AAAA MM DD HH
Altitude	m
Inclinaison selon la pente du site (entre 0° et 90°)	degré
Nombre de strates du profil	-
Historique des strates du profil	-

Le fichier QUOT est un fichier de sortie au pas de temps quotidien. Chaque jour de simulation, à une heure donnée, CROCUS écrit une ligne de données de sortie supplémentaire incluant les paramètres présentés au tableau A1.4.

Tableau A1.4 Données de sortie quotidiennes fournies par le modèles CROCUS

Paramètre	Unité
Date	AAMMJJ
Hauteur de neige	cm
Equivalent en eau	mm
Écoulement cumulé sur les 24 heures précédentes	mm

Le fichier TSURF est un fichier de sortie au pas horaire. Chaque heure, CROCUS écrit une ligne de données de sorties supplémentaires contenant les paramètres présentés au tableau A1.5.

Tableau A1.5 Fichier de sortie TSURF fourni par le modèle CROCUS

Paramètre	Unité
Date	AAMMJJHH
Température de surface de la neige	1/100 <sup>ième</sup> de °K
Équivalent en eau	mm
Écoulement cumulé sur les 24 heures précédentes	mm

Finalement, le fichier FLUX est un fichier de sortie au pas horaire ou au pas quotidien. Il contient, pour une date donnée, les principaux flux pour l'heure ou les 24 heures précédentes au sommet ou à la base du manteau neigeux. Chaque ligne de données contient dans l'ordre les paramètres présentés au tableau A1.6.

Tableau A1.6 Fichier de sortie FLUX fourni par le modèle CROCUS

Paramètre	Unité
Date	AAAAMMJJHH
Rayonnement solaire net	W/m <sup>2</sup>
Rayonnement infrarouge net	W/m <sup>2</sup>
Chaleur sensible	W/m <sup>2</sup>
Chaleur latente	W/m <sup>2</sup>
Chaleur apportée par la pluie	W/m <sup>2</sup>
Chaleur apportée par les chutes de neige	W/m <sup>2</sup>
Terme de correction du à la sublimation et à la congélation	W/m <sup>2</sup>
Flux thermique du sol	W/m <sup>2</sup>
Albédo de la neige	
Masse congelée à la surface	kg/m <sup>2</sup>
Masse condensée à la surface	kg/m <sup>2</sup>
Masse sublimée à la surface	kg/m <sup>2</sup>
Masse évaporée à la surface	kg/m <sup>2</sup>
Pluie	mm
Chute de neige (équivalent en eau)	mm
Écoulement à la base	mm

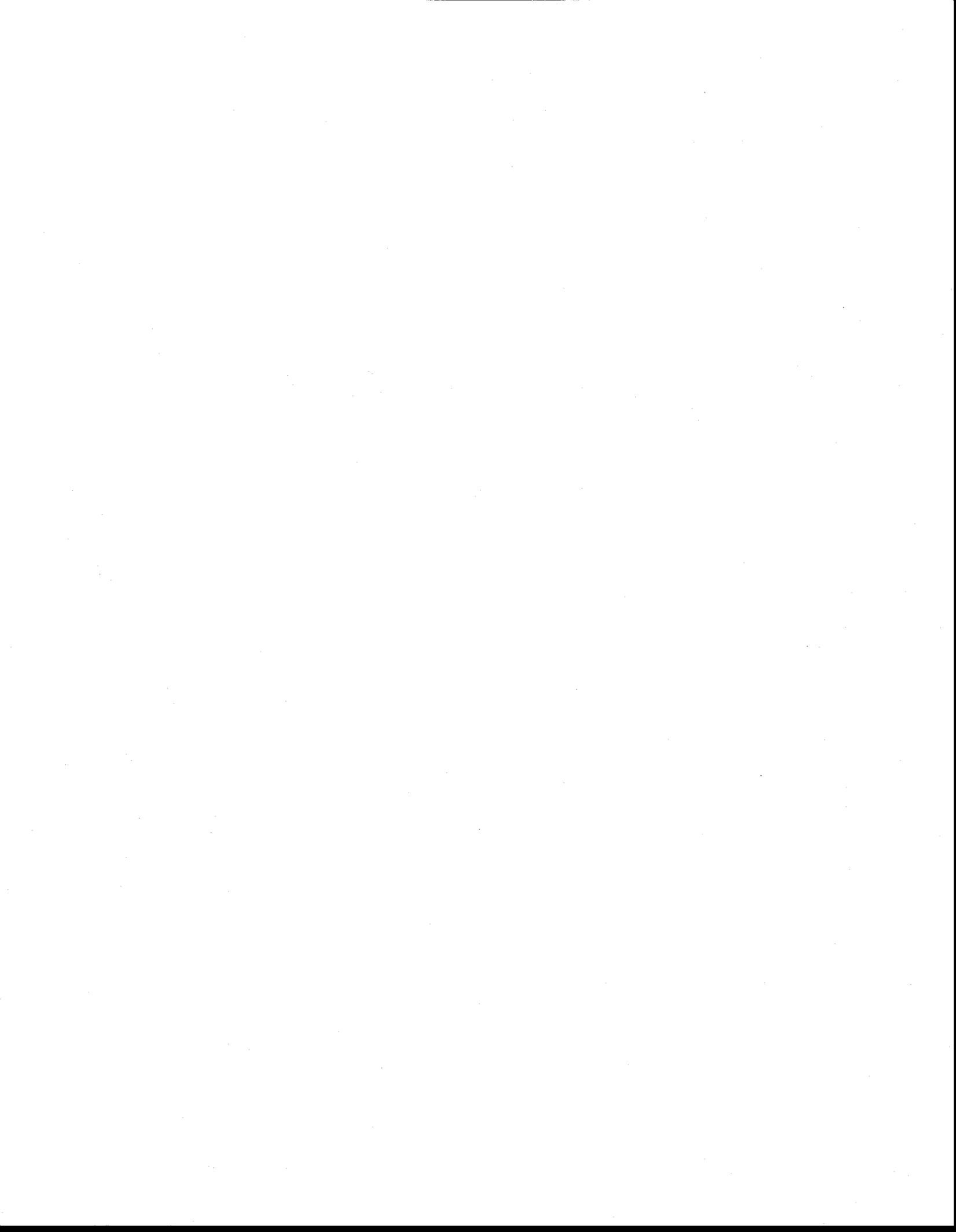
Donc, pour permettre le fonctionnement du modèle CROCUS, il est impératif de constituer le fichier de données météorologiques (MET) ainsi que le fichier contenant le profil initial (PROi). De plus, il est nécessaire de fournir au modèle certaines caractéristiques temporelles et géographiques de la simulation :

1. Le nombre d'heures de simulation
2. La date du début de la simulation
3. La latitude du site en degrés et dixièmes (entre -90 et 90)
4. La longitude du site en degrés et dixièmes (-180 et 180)
5. Exposition du site en degrés et dixièmes (entre 0 et 359.99). Une pente faisant face au sud aura une valeur d'exposition de 180 alors qu'une pente faisant face au nord aura une valeur de 0.
6. L'altitude du site en mètres
7. Pente ou inclinaison du site en degrés entiers. La valeur de 0 sera attribuée à un sol plat. Ainsi, une pente de 30° par rapport à l'horizontale aura une valeur de 30.
8. Tableau des angles d'élévation en degrés entiers des masques solaires. Ces derniers représentent des obstacles physiques entourant le site qui peuvent atténuer ou bloquer le rayonnement solaire. Ces masques sont donnés par pas de 10° (rose de 36), la première valeur du tableau se référant au nord. Les masques sont utilisés lorsque les données d'entrée correspondent à une surface plate (sans masque) et qu'on souhaite ajouter des masques.

Après avoir fourni au modèle les fichiers et caractéristiques sus mentionnés, ce dernier peut être dûment lancé.

## **ANNEXE 2**

# **GRAPHIQUES DES TEMPÉRATURES MOYENNES JOURNALIÈRES**



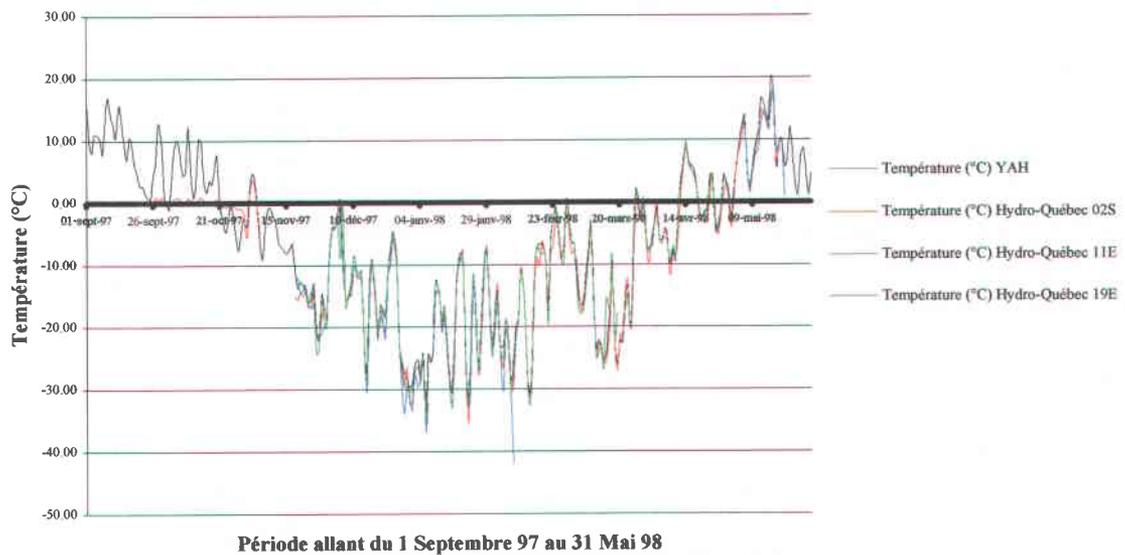


Figure A2.1 Températures extérieures moyennes journalières originales aux stations Hydro-Québec 02S, 11E, 19E et YAH, pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998.

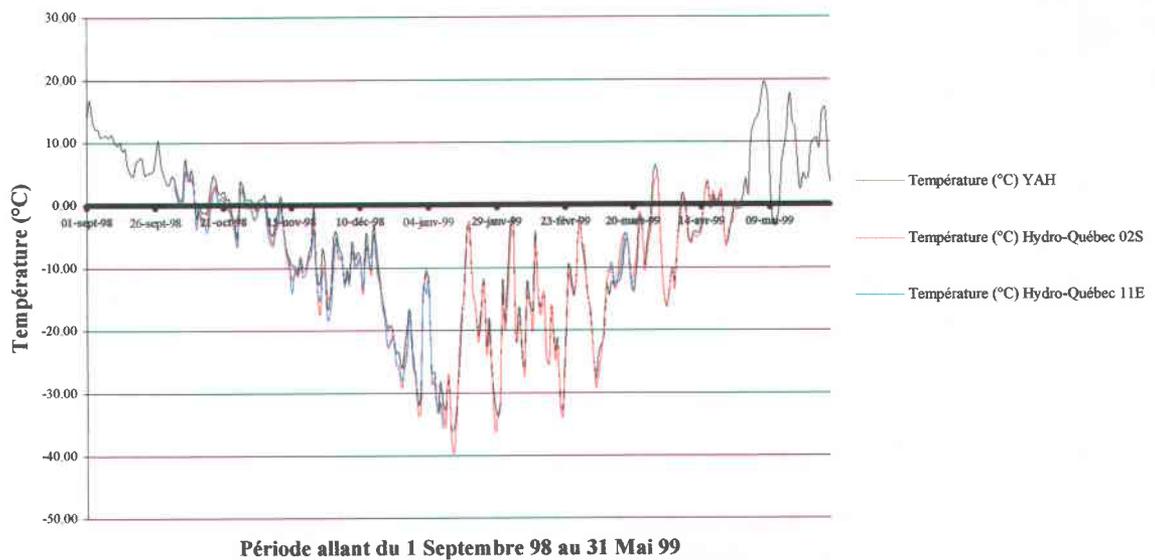


Figure A2.2 Températures extérieures moyennes journalières originales aux stations Hydro-Québec 02S, 11E, et YAH, pour la période allant du 1 septembre 1998 au 31 mai 1999.

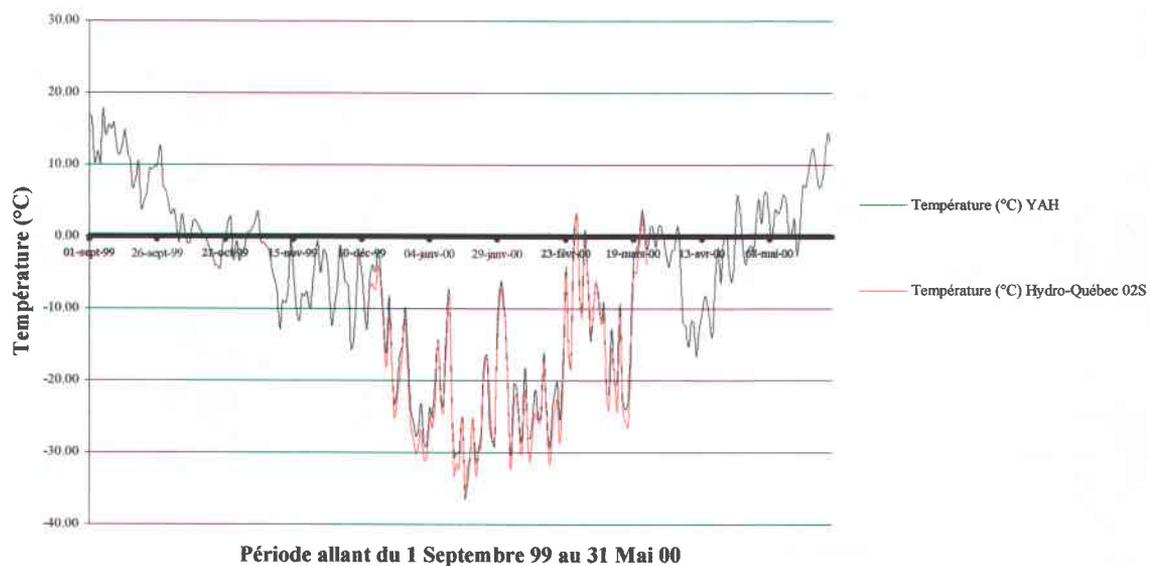


Figure A2.3 Températures extérieures moyennes journalières originales aux stations Hydro-Québec 02S et YAH, pour la période allant du 1 septembre 1999 au 31 mai 2000.

## **ANNEXE 3**

# **GRAPHIQUES DES TEMPÉRATURES MOYENNES JOURNALIÈRES CORRIGÉES**



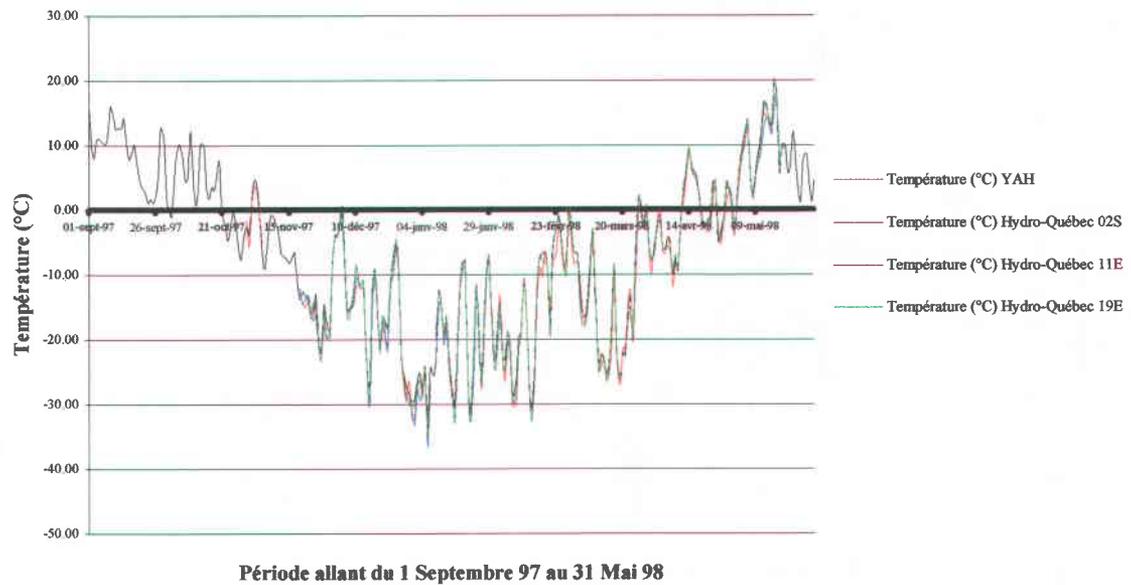


Figure A3.1 Températures extérieures moyennes journalières corrigées aux stations Hydro-Québec 02S, 11E, 19E et YAH, pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998.

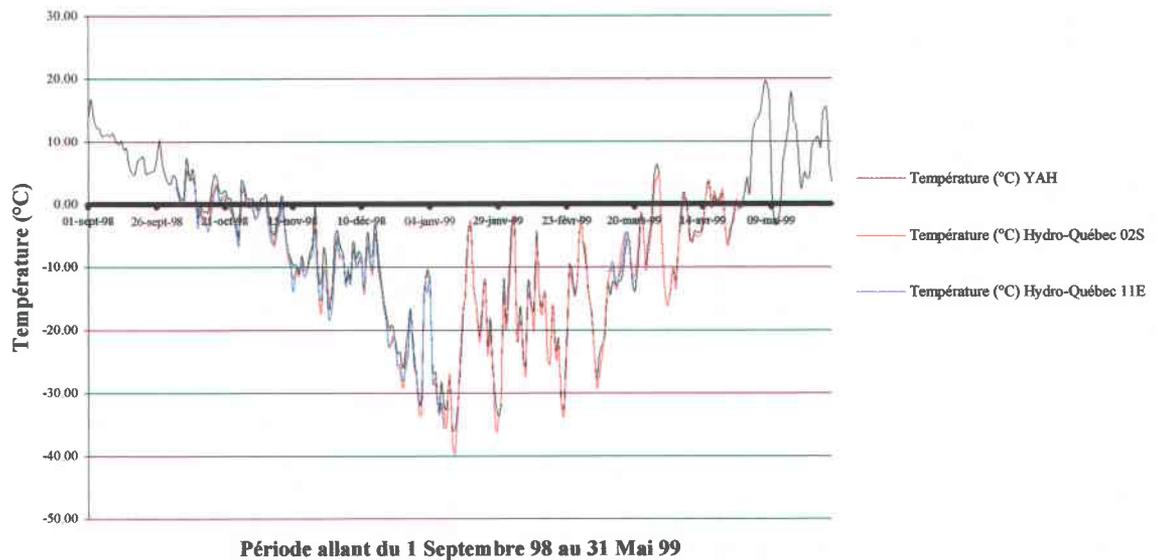


Figure A3.2 Températures extérieures moyennes journalières corrigées aux stations Hydro-Québec 02S, 11E et YAH, pour la période allant du 1 septembre 1998 au 31 mai 1999.

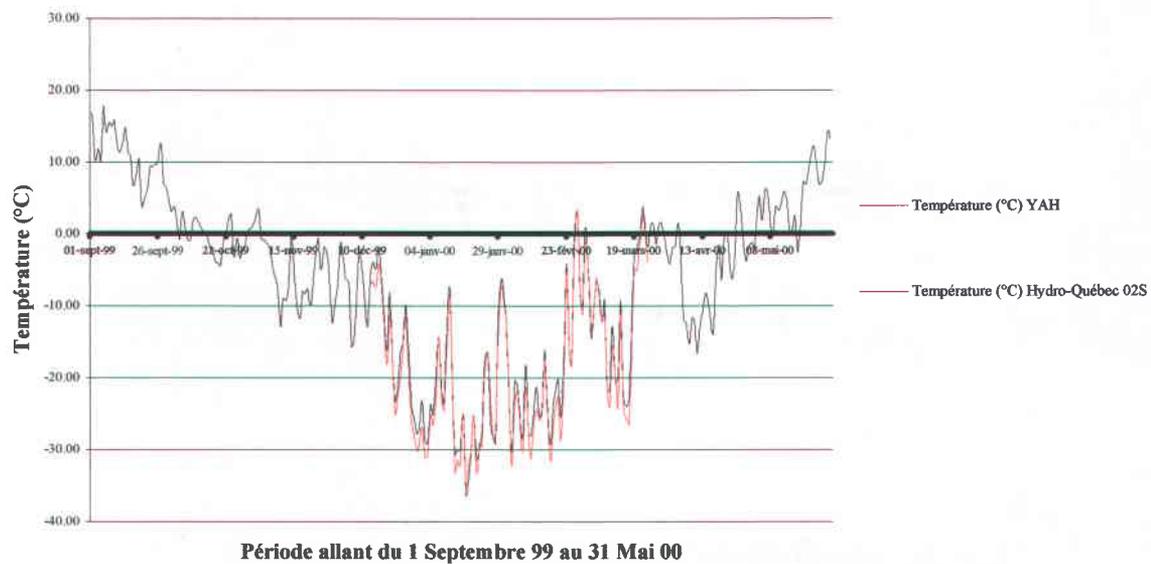


Figure A3.3 Températures extérieures moyennes journalières corrigées aux stations Hydro-Québec 02S et YAH, pour la période allant du 1 septembre 1999 au 31 mai 2000.

## **ANNEXE 4**

# **GRAPHIQUES RELATIFS AUX PRÉCIPITATIONS TOTALES JOURNALIÈRES**



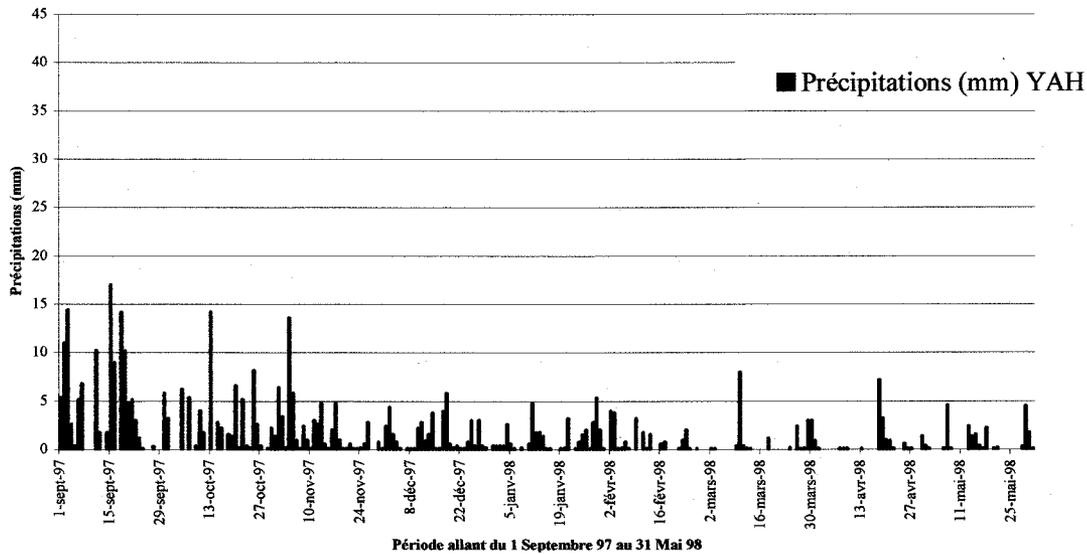


Figure A4.3 Précipitations totales journalières à la station YAH pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998

#### A4.1.2 Période allant du 1 septembre 1998 au 31 mai 1999

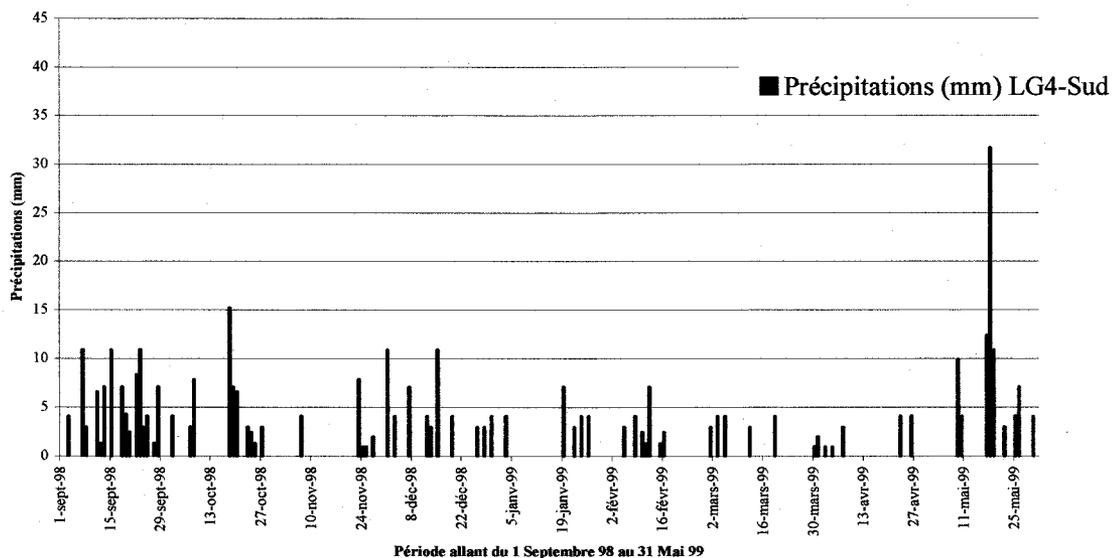


Figure A4.4 Précipitations totales journalières à la station LG4-Sud pour la période allant du 1 septembre 1998 au 31 mai 1999

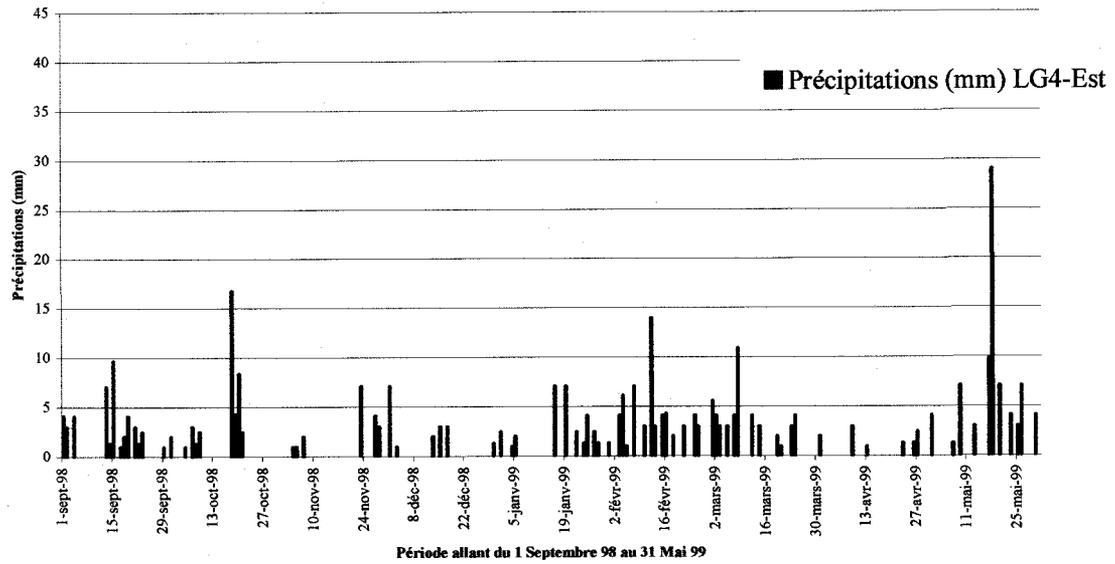


Figure A4.5 Précipitations totales journalières à la station LG4-Est pour la période allant du 1 septembre 1998 au 31 mai 1999

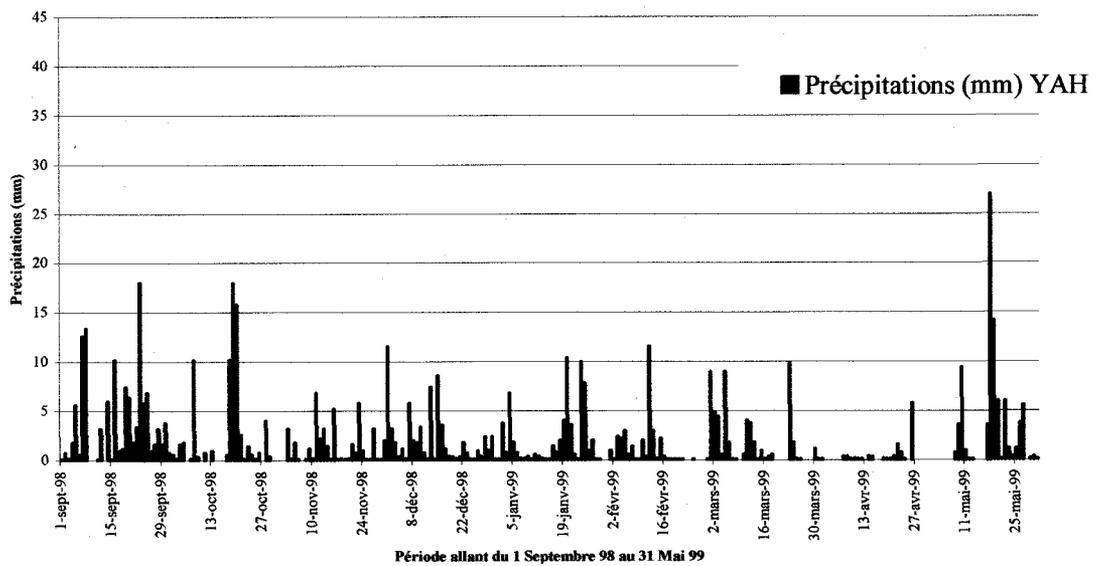


Figure A4.6 Précipitations totales journalières à la station YAH pour la période allant du 1 septembre 1998 au 31 mai 1999

## A4.1.3 Période allant du 1 septembre 1999 au 31 mai 2000

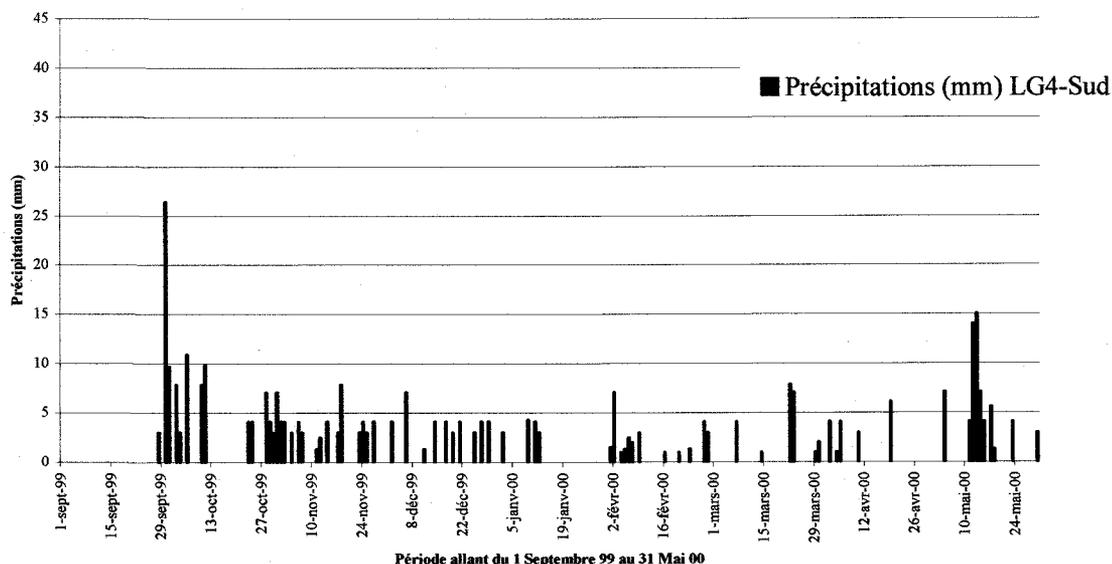


Figure A4.7 Précipitations totales journalières à la station LG4-Sud pour la période allant du 1 septembre 1999 au 31 mai 2000

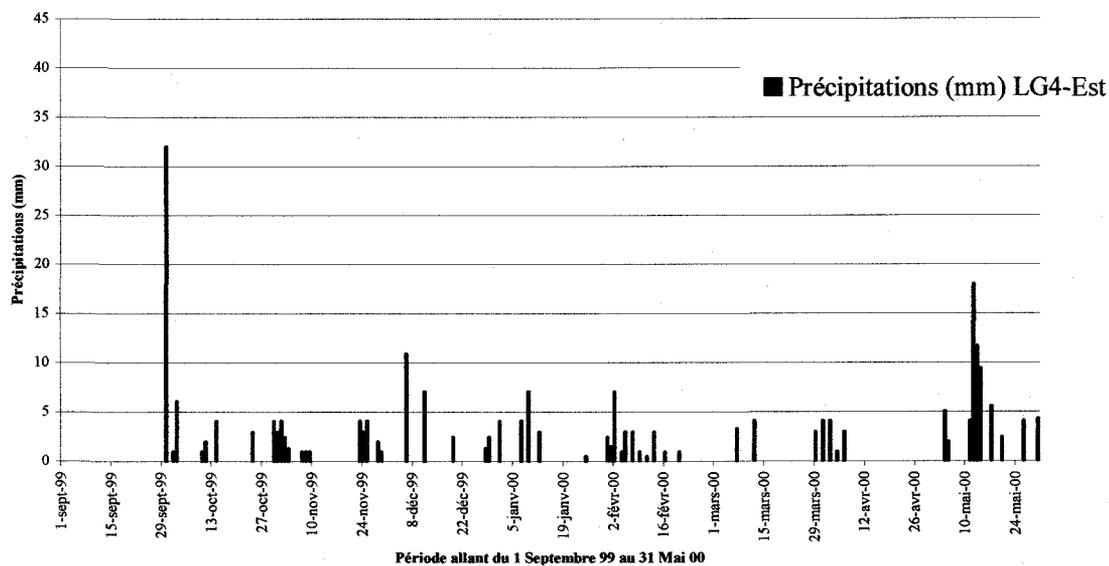


Figure A4.8 Précipitations totales journalières à la station LG4-Est pour la période allant du 1 septembre 1999 au 31 mai 2000

## A4.2 Graphiques d'intercomparaison des précipitations totales journalières aux stations

### A4.2.1 Période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998

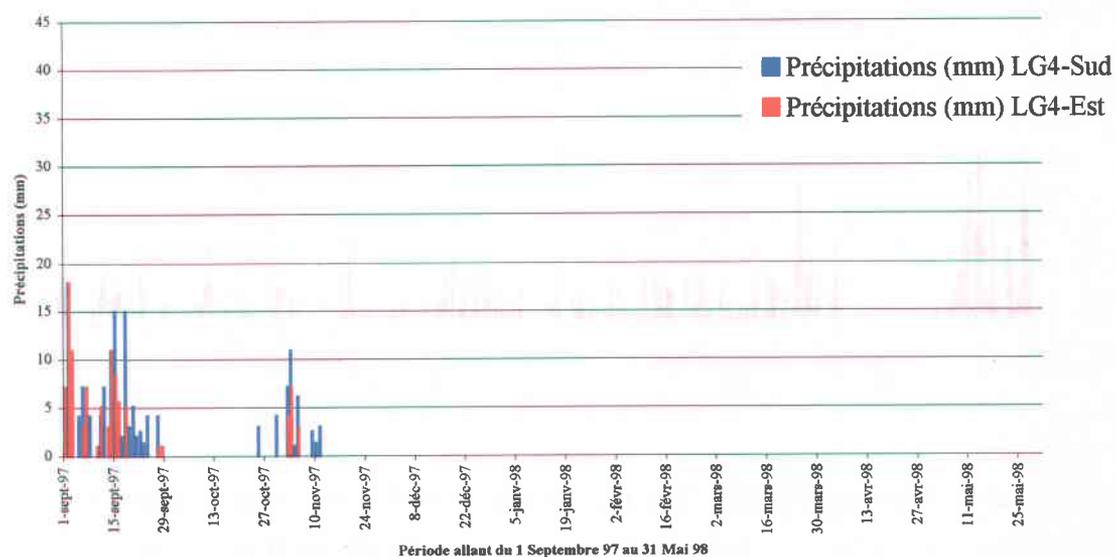


Figure A4.9 Intercomparaison des précipitations totales journalières entre les stations LG4-Sud et Est pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998

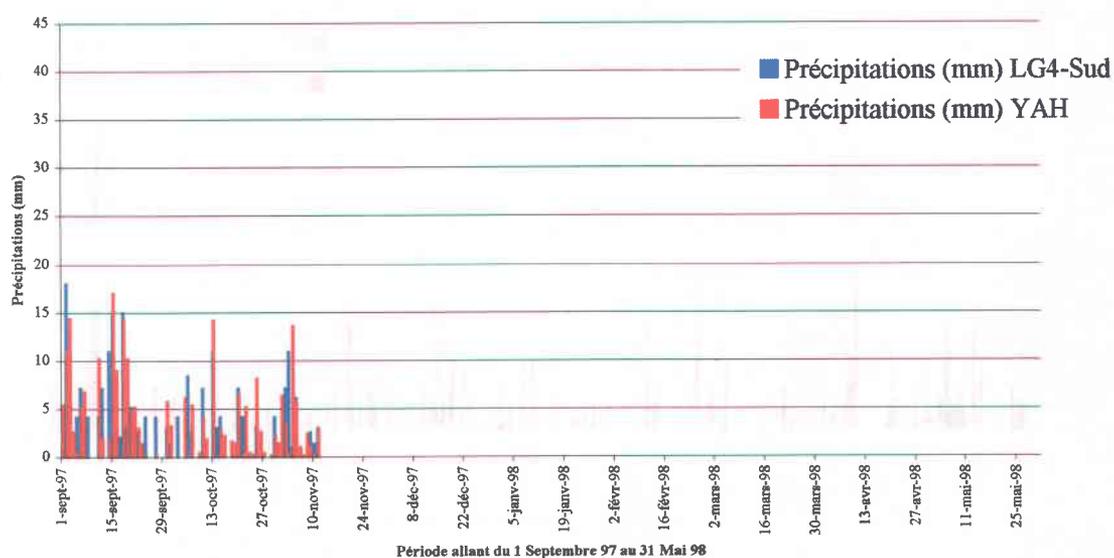


Figure A4.10 Intercomparaison des précipitations totales journalières entre les stations LG4-Sud et YAH pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998

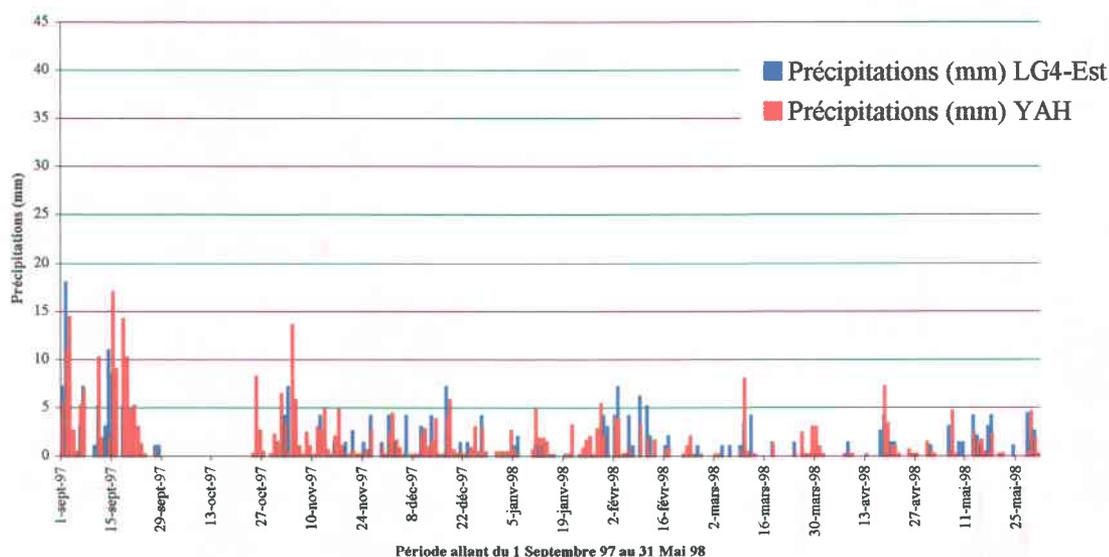


Figure A4.11 Intercomparaison des précipitations totales journalières entre les stations LG4-Est et YAH pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998

#### A4.2.2 Période allant du 1 septembre 1998 au 31 mai 1999

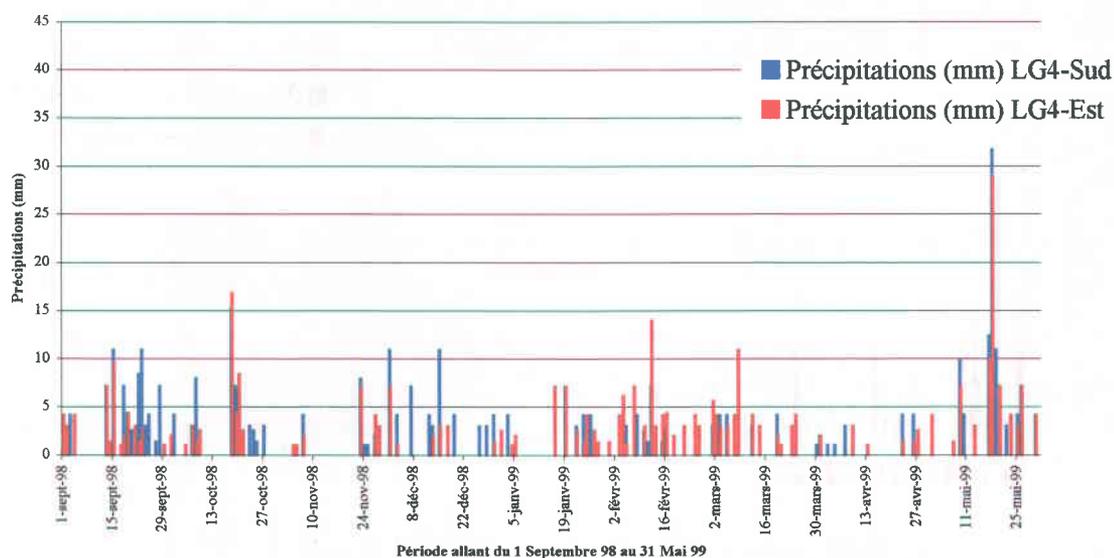


Figure A4.12 Intercomparaison des précipitations totales journalières entre les stations LG4-Sud et Est pour la période allant du 1 septembre 1998 au 31 mai 1999

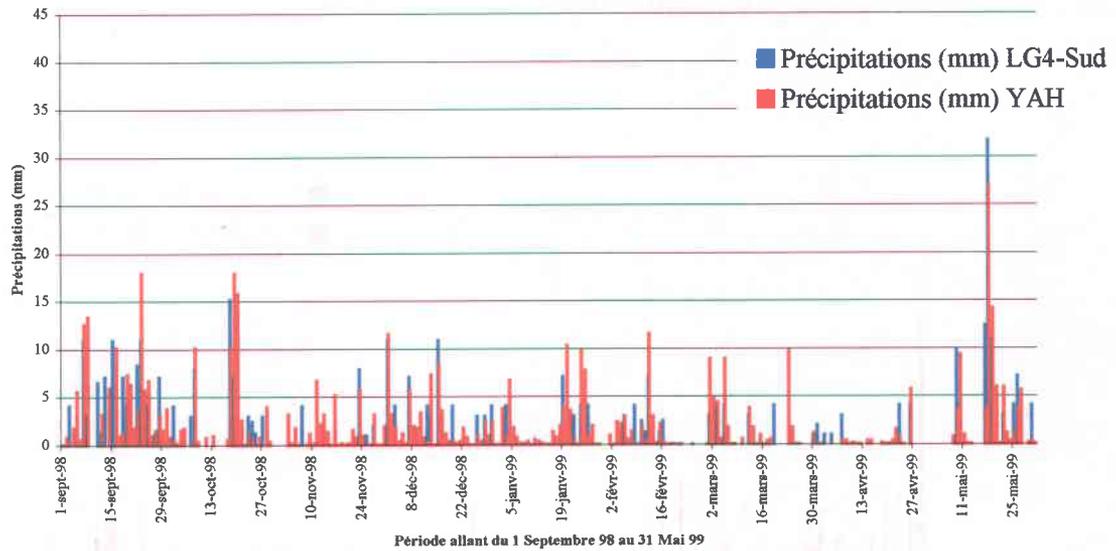


Figure A4.13 Intercomparaison des précipitations totales journalières entre les stations LG4-Sud et YAH pour la période allant du 1 septembre 1998 au 31 mai 1999

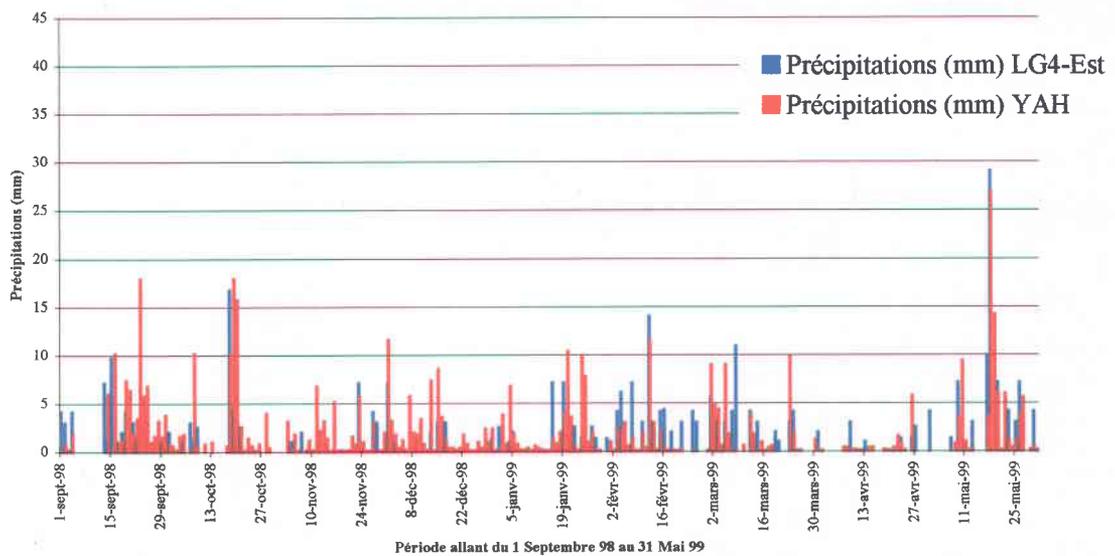


Figure A4.14 Intercomparaison des précipitations totales journalières entre les stations LG4-Est et YAH pour la période allant du 1 septembre 1998 au 31 mai 1999

## A4.2.3 Période allant du 1 septembre 1999 au 31 mai 2000

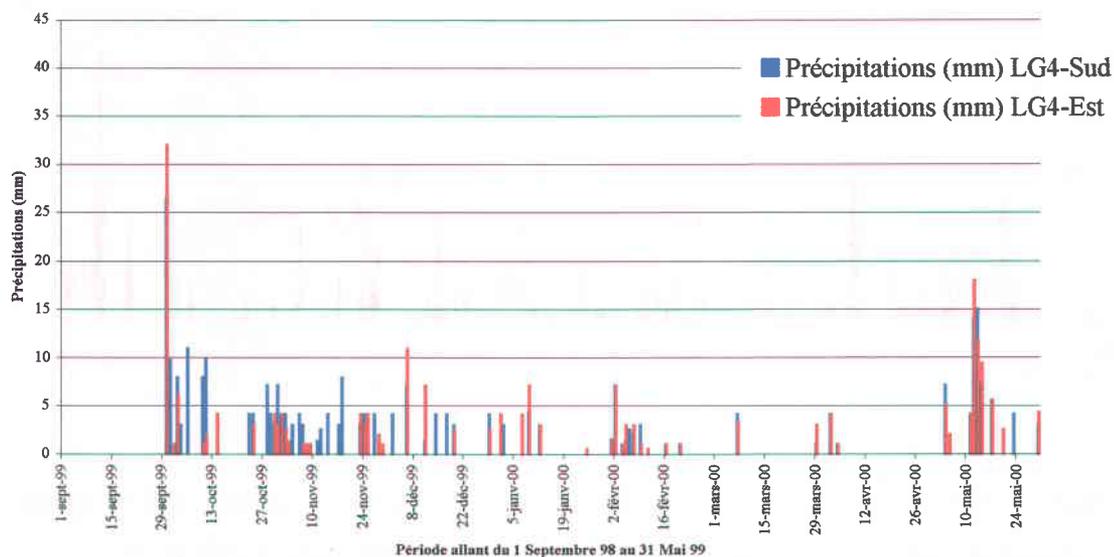


Figure A4.15 Intercomparaison des précipitations totales journalières entre les stations LG4-Sud et Est pour la période allant du 1 septembre 1999 au 31 mai 2000

### A4.3 Graphiques d'intercomparaison des précipitations totales journalières cumulées aux stations

#### A4.3.1 Période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998

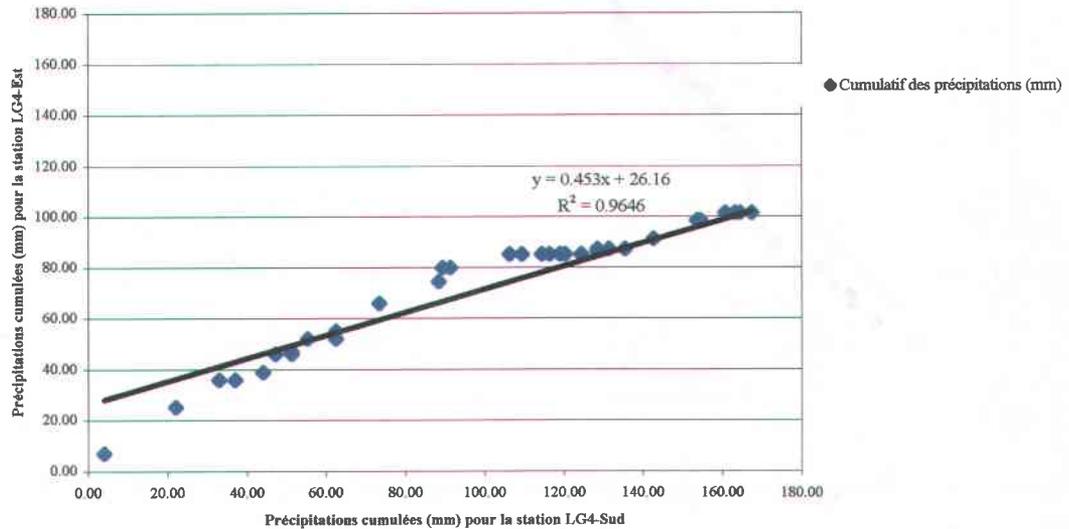


Figure A4.16 Précipitations cumulées pour les stations LG4-Sud et Est pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998

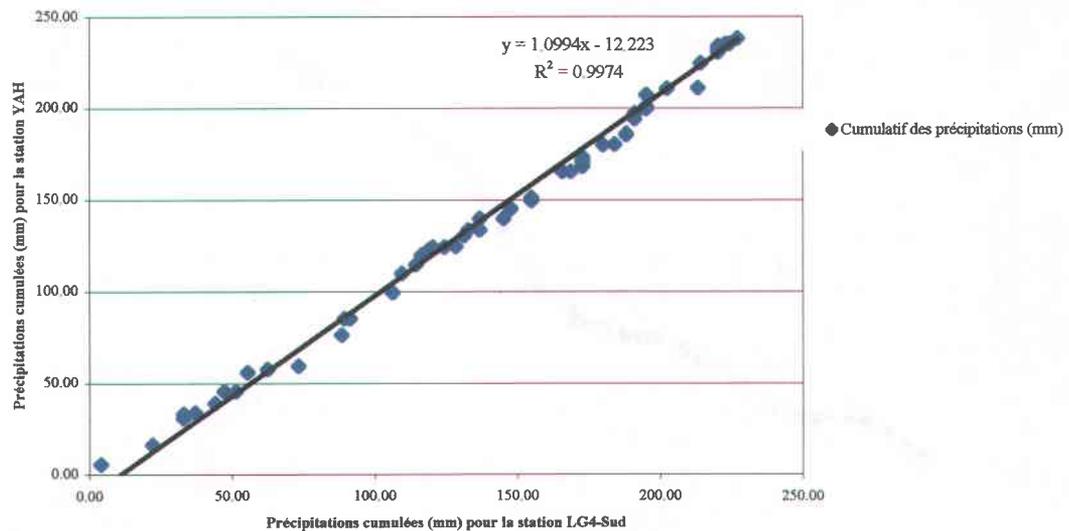


Figure A4.17 Précipitations cumulées pour les stations LG4-Sud et YAH pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998

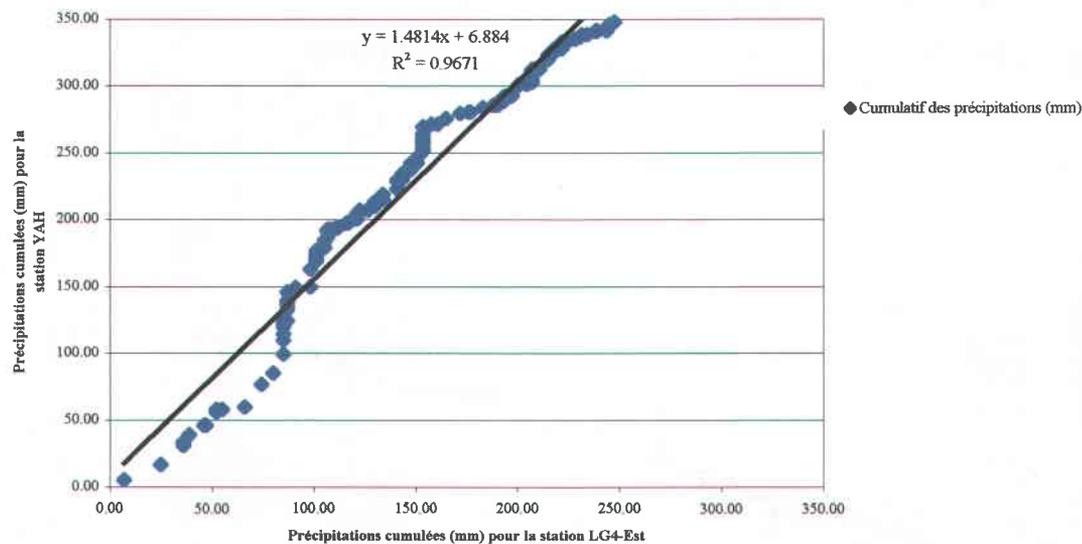


Figure A4.18 Précipitations cumulées pour les stations LG4-Est et YAH pour la période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998

#### A4.3.2 Période allant du 1 septembre 1998 au 31 mai 1999

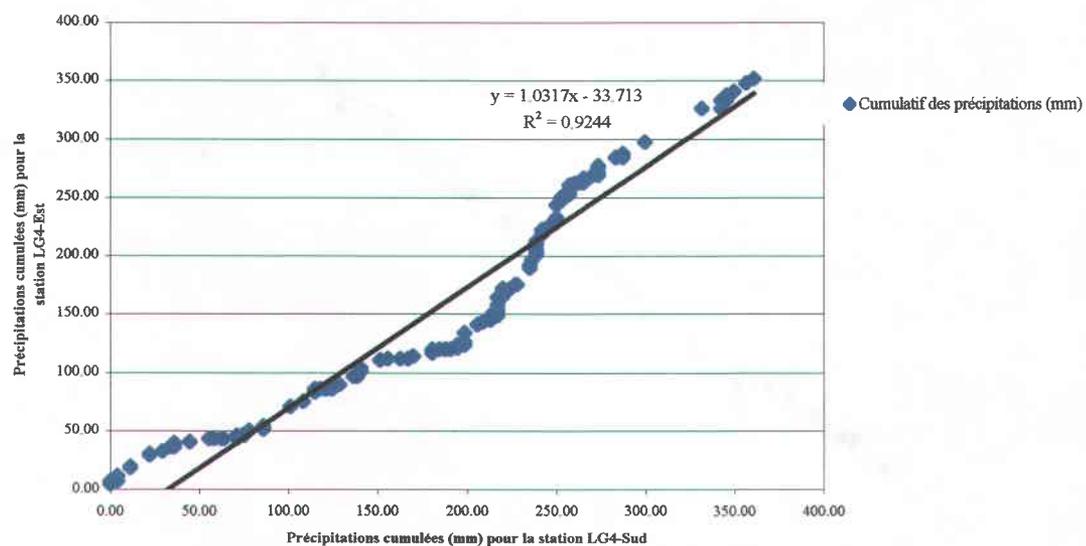


Figure A4.19 Précipitations cumulées pour les stations LG4-Sud et Est pour la période allant du 1 septembre 1998 au 31 mai 1999

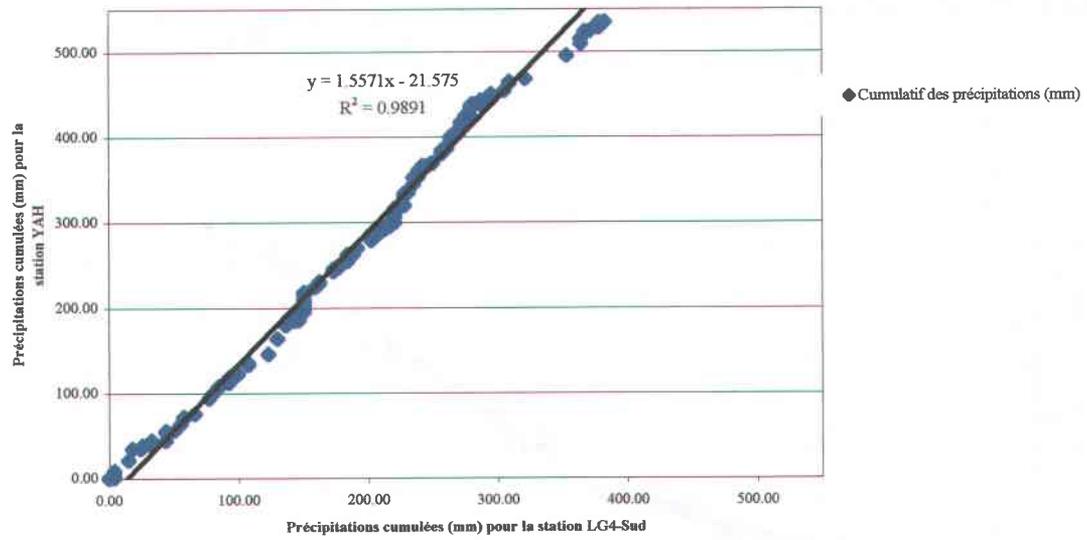


Figure A4.20 Précipitations cumulées pour les stations LG4-Sud et YAH pour la période allant du 1 septembre 1998 au 31 mai 1999

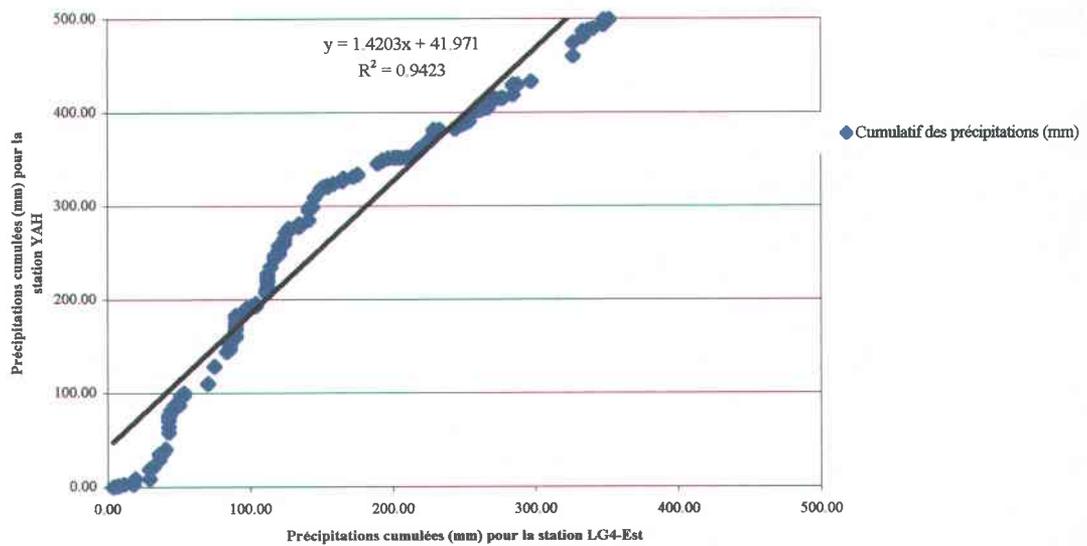


Figure A4.21 Précipitations cumulées pour les stations LG4-Est et YAH pour la période allant du 1 septembre 1998 au 31 mai 1999

## A4.3.3 Période allant du 1 septembre 1999 au 31 mai 2000

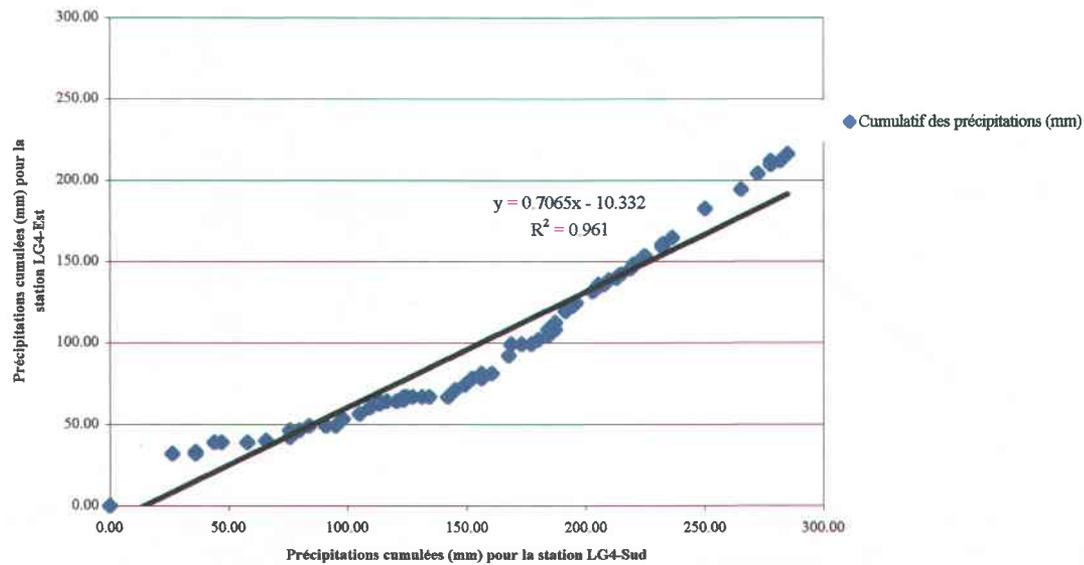


Figure A4.22 Précipitations cumulées pour les stations LG4-Sud et Est pour la période allant du 1 septembre 1999 au 31 mai 2000

## **ANNEXE 5**

### **LISTE DES CODES DE PRÉCIPITATIONS AINSI QUE LEURS PHASES ET POIDS RESPECTIFS**

Le tableau A5.1 présente les codes de précipitations utilisés dans la présente recherche. Ceux-ci sont accompagnés d'une brève description ainsi que de leurs phases et poids respectifs.

N.B. Les signes ((-),( ),(+)) accompagnant les codes sont associés aux intensités faible, modérée et forte.

Tableau A5.1 Codes, phases, et poids des précipitations

Code de précipitations	Description	Phase	Poids arbitraire
T, T+	Orage	0.00	4.00, 5.00
R-, R, R+	Pluie	0.00	1.00, 2.00, 3.00
RW-, RW, RW+	Averse de pluie	0.00	1.50, 2.50, 3.50
L-, L, L+	Bruine	0.00	0.20, 0.40, 0.60
ZR-, ZR, ZR+	Pluie verglaçante	0.30	1.00, 2.00, 3.00
ZL-, ZL, ZL+	Bruine verglaçante	0.30	0.20, 0.40, 0.60
S-, S, S+	Neige	1.00	1.00, 2.00, 3.00
SG-, SG, SG+	Neige en grains	1.00	1.00, 2.00, 3.00
SW-, SW, SW+	Averse de neige	1.00	1.50, 2.50, 3.50
BS	Poudrière (Chasse-neige élevée)	1.00	0.10
IC	Cristaux de glace	1.00	1.00
IP-, IP, IP+	Grésil ou granules de glace	1.00	0.40, 0.80, 1.20
F	Brouillard	0.00	0.05
H	Brume sèche	0.00	0.03
K	Fumée	0.00	0.01

## **ANNEXE 6**

### **TEXTE ET CODE DU PROGRAMME UTILITAIRE À LA CRÉATION DU FICHIER MET**

## PROGRAM Preparation

- C Préparation du fichier MET nécessaire au lancement de CROCUS
- C À partir des fichier de données météorologiques

- C Déclaration de l'ensemble des variables

```

INTEGER(4) IVAR1,IVAR2,IVAR3,IVAR4,IVAR5,IVAR6,IVAR7,IVAR8,
S      IVAR9,IVAR10,IVAR11,IVAR12,NART,J,K,ART,NJOUR

REAL RVAR1,RVAR2,RVAR3,RVAR4,RVAR5,RVAR6,RVAR7,RVAR8,RVAR9,
S      ZRK,ZSIGMA,ZEPSI1,ZEPSI2,PE,ZBERL1,ZBERL2,ZCOEF,RP1,
S      P1R,ZBERL,TNUA,ZBERL3,BISEX2

CHARACTER*50 FILEA1,FILEA2,FILEA3,FILEB,CLREP,CAR1,CAR3,CAR4

CHARACTER*50 FILEA4,FILEA5,FILEA6,FILEA7,FILEA8

INTEGER KPCDATE(3),JPCDAT,NUMOIB,NUANB,JPNMOI,NUMOIJ(12),X

REAL PAHOR,POIDSI(26280),RVAR5I(26280),PRECIP(595),SOMMEP(595)

REAL RP2,P2R,PRECIPH(26280),TEMP(26280),SUM1,SUM2,SUM3,SUM4

CHARACTER*4 CAR2,CODE(26280),CODE1(51)

CHARACTER*1 LOGIQUE

DIMENSION KPMASQ(72,3)

INTEGER KPALTI,NUAN2J,NCODE,CP1,P1,EP1,EEP1,ERP1,BISEX1,
S      BISEX3,BISEX4

INTEGER CP2,P2,EP2,EEP2,ERP2,COMPTEUR1,COMPTEUR2

REAL PLAT,VEW1,VEW2,VEW3,VEW4,VEW5,VEW6,VEW7

REAL PLON,ES,PHASE1(51),POIDS(51),SOMMEPT,TMax(365),TMin(365)

REAL PTAIR,CRNIPHER(26280),WIND(26280)

REAL PUAIR,DENSITEF,EPSILONF,ZIRFORET

REAL PNEB

REAL PDIR

REAL PDIF

REAL PGLOB,ZPI,ZDG2RD,ZRD2DG,ZEPSIL

C Initialisation des variable
VEW1=10.79574
VEW2=1.50475E-4
VEW3=-8.2969

```

VEW4=.42873E-3  
VEW5=4.76955  
VEW6=.78614  
VEW7=5.028

JPCDAT=100  
UTTRIP=273.16

NUMOIJ(1)=31  
NUMOIJ(2)=28  
NUMOIJ(3)=31  
NUMOIJ(4)=30  
NUMOIJ(5)=31  
NUMOIJ(6)=30  
NUMOIJ(7)=31  
NUMOIJ(8)=31  
NUMOIJ(9)=30  
NUMOIJ(10)=31  
NUMOIJ(11)=30  
NUMOIJ(12)=31

NUMOIB=2  
NUANB=4  
JPNMOI=12  
NUAN2J=365

C Caractéristiques de la forêt

DENSITEF=0.25  
EPSILONF=0.94

C Paramètre de Bolz pour les nuages

TNUA=0.20

C Attribution de valeurs aux masques

DO 210 K=1,72  
DO 205 L=1,3  
KPMASQ(K,L)=0

205 CONTINUE

210 CONTINUE

C Détail des fichiers d'entrée et de sortie

C -----

100 CONTINUE

1010 FORMAT(80('-'))

WRITE (\*,1010)

WRITE (\*,\*)'

ASCII\_TO\_BIN'

WRITE (\*,\*)'

-----'

WRITE (\*,\*)'

WRITE (\*,\*)'

S 'Ecriture des fichiers ASCII dans le fichier binaire MET'

WRITE (\*,\*)'

WRITE (\*,1010)

```
WRITE (*,*)'
WRITE (*,*)'?Nom des fichiers ASCII/Name of the ASCII file :'
```

C Fichier de données météorologiques

```
FILEA1='c:\CROCUS\INRS02\Mod4\02MET99-00.txt'
```

C Fichier des coordonnées

```
FILEA2='c:\CROCUS\INRS02\02COOR.txt'
```

C Fichier des codes de précipitation

```
FILEA3='c:\CROCUS\LG4CODE.txt'
```

C Fichier des codes avec la phases et le poids associés

```
FILEA4='c:\CROCUS\PHASEPOIDS.txt'
```

C Fichier de soutenance identique au premier

```
FILEA5='c:\CROCUS\INRS02\Mod4\02MET99-00c.txt'
```

C Fichier des précipitations

```
FILEA6='c:\CROCUS\INRS02\Mod4\02P99-00LAG.txt'
```

C Fichier des températures

```
FILEA7='c:\CROCUS\INRS02\Mod4\02T99-00.txt'
```

C Ouverture des fichiers

```
OPEN (UNIT=10, FILE=FILEA1 , FORM='FORMATTED',
+      STATUS='OLD', ERR= 901)
```

```
OPEN (UNIT=13, FILE=FILEA2 , FORM='FORMATTED',
+      STATUS='OLD', ERR= 901)
```

```
READ (UNIT=13,FMT=500,ERR=905)KPALTI,PLAT,PLON
```

500 FORMAT(I3,1X,F5.2,1X,F6.2)

```
OPEN (UNIT=14, FILE=FILEA3 , FORM='FORMATTED',
+      STATUS='OLD', ERR= 901)
```

```
OPEN (UNIT=15, FILE=FILEA4 , FORM='FORMATTED',
+      STATUS='OLD', ERR= 901)
```

```
OPEN (UNIT=16, FILE=FILEA5 , FORM='FORMATTED',
+      STATUS='OLD', ERR= 901)
```

```
OPEN (UNIT=17, FILE=FILEA6 , FORM='FORMATTED',
+      STATUS='OLD', ERR= 901)
```

```
OPEN (UNIT=18, FILE=FILEA7 , FORM='FORMATTED',  
+ STATUS='OLD', ERR= 901)
```

```
WRITE(*,*)'Entrer le nombre de code de precipitation a lire:(51)'  
READ (*,*) NCODE
```

```
WRITE(*,*)'Entrer le nombre de jour de precipitation  
S a lire:(272,273,274)'  
READ (*,*) NJOUR
```

```
WRITE (*,*)'Entrer le nombre de ligne de données(6528,6552,6576)'  
READ (*,*) NART
```

```
SUM1=0  
SUM2=0  
SUM3=0  
SUM4=0
```

### C Lecture des données de précipitations

```
DO 255 J1=1,NJOUR  
READ (17,*,ERR=905)PRECIP(J1)  
SUM1=SUM1+PRECIP(J1)
```

```
255 CONTINUE
```

### C Lecture des données de températures

```
C1=1  
DO 260 J2=1,NJOUR  
TMAX(J2)=-100  
TMIN(J2)=100  
DO 261 C2=1,24  
READ (18,*,ERR=905)TEMP(C1)  
IF(TEMP(C1) .GT. TMAX(J2))THEN  
TMAX(J2)=TEMP(C1)  
ENDIF  
IF(TEMP(C1) < TMIN(J2))THEN  
TMIN(J2)=TEMP(C1)  
ENDIF  
C1=C1+1
```

```
261 CONTINUE
```

```
260 CONTINUE
```

### C Lecture des codes de précipitations

```
DO 200 A1=1,NCODE  
READ (UNIT=15,FMT=250,ERR=905)CODE1(A1),PHASE1(A1),POIDS(A1)
```

```
200 CONTINUE
```

```
250 FORMAT(A4,1X,F4.2,1X,F4.2)
```

```
WRITE (*,*) '  
WRITE (*,*) ' ? Nom du fichier Binaire / Name of the BINARY file :'
```

```
FILEB='c:\CROCUS\INRS02\Mod4\02MET99-00.bin'
```

1000 FORMAT(A50)

C

```
OPEN (UNIT=11, FILE=FILEB, FORM='UNFORMATTED',ACCESS='DIRECT',  
+ RECL=36, STATUS='NEW', ERR= 105)
```

```
GOTO 110
```

105 CONTINUE

```
WRITE(*,*) 'The file exists, do you want to overwrite it ? (y/n)'
```

```
READ(*,'(A1)') CLREP
```

```
IF( CLREP.EQ.'Y'.OR.CLREP.EQ.'y') THEN
```

```
OPEN (UNIT=11, FILE=FILEB, FORM='UNFORMATTED',ACCESS='DIRECT',  
+ RECL=36, STATUS='OLD', ERR= 105)
```

```
ELSE
```

```
STOP
```

```
ENDIF
```

110 CONTINUE

C Initialisation de variables à zéro

```
DO 203 A4=1,NART
```

```
  RVAR5I(A4)=1.00
```

```
  POIDSI(A4)=0.00
```

```
  CRNIPHER(A4)=1.00
```

203 CONTINUE

```
DO 275 A2=1,NART
```

C Lecture du fichier MET de soutenance

```
READ (UNIT=16,FMT=3002,ERR=905) CAR1,IVAR1,IVAR2,IVAR3,IVAR4,  
S IVAR5,IVAR6,IVAR7,IVAR8,IVAR9,IVAR10,CAR2,IVAR11,CAR3,IVAR12,CAR4
```

```
WIND(A2)=IVAR8/3.6
```

```
DO 202 A3=1,NCODE
```

```
  IF(CAR2.EQ.CODE1(A3))THEN
```

```
    RVAR5I(A2)=PHASE1(A3)
```

```
    POIDSI(A2)=POIDS(A3)
```

```
  ENDIF
```

202 CONTINUE

275 CONTINUE

C Calcul des paramètres de correction des précipitations

```
C5=1.00
```

```
DO 263 C3=1,NJOUR
```

```
DO 264 C4=1,24
```

```
  IF(RVAR5I(C5) > 0.00 .and. RVAR5I(C5) < 1.00)THEN
```

```
    CRNIPHER(C5)=(97.29-3.18*WIND(C5)+0.58*TMAX(C3)-0.67*TMIN(C3))/100
```

ENDIF

IF(RVAR5I(C5) .EQ. 1.00 .and. POIDSI(C5) > 0.00)THEN  
CRNIPHER(C5)=(100-0.44\*WIND(C5)\*\*2-1.98\*WIND(C5))/100  
ENDIF

C5=C5+1.00

264 CONTINUE

263 CONTINUE

### C Répartition des précipitations horaires

CP1=1

SOMMEPT=0.00

DO 256 P1=1,NART  
SOMMEPT=SOMMEPT+POIDSI(P1)  
SUM2=SUM2+POIDSI(P1)  
P1R=P1  
EP1=P1R/24  
RP1=P1R/24  
EEP1=EP1\*24  
ERP1=RP1\*24  
IF(EEP1.EQ.ERP1)THEN  
SOMMEP(CP1)=SOMMEPT  
SOMMEPT=0.00  
CP1=CP1+1

ENDIF

256 CONTINUE

CP2=1

DO 257 P2=1,NART  
IF(SOMMEP(CP2)>0.00)THEN  
PRECIPH(P2)=POIDSI(P2)/SOMMEP(CP2)\*PRECIP(CP2)  
ENDIF  
SUM3=PRECIPH(P2)+SUM3  
P2R=P2  
EP2=P2R/24  
RP2=P2R/24  
EEP2=EP2\*24  
ERP2=RP2\*24  
IF(EEP2.EQ.ERP2)THEN  
CP2=CP2+1

ENDIF

257 CONTINUE

IF(SUM1>SUM3)THEN

DO 258 P3=1,NART

PRECIPH(P3)=PRECIPH(P3)+POIDSI(P3)/SUM2\*(SUM1-SUM3)

258 CONTINUE

ENDIF

### C LECTURE ET ECRITURE DU FICHIER MET

```

COMPTEUR1=1
COMPTEUR2=0
DO 310 J=1,NART
  READ (UNIT=10,FMT=3002,ERR=905) CAR1,IVAR1,IVAR2,IVAR3,IVAR4,
S  IVAR5,IVAR6,IVAR7,IVAR8,IVAR9,IVAR10,CAR2,IVAR11,CAR3,IVAR12,CAR4

  IF(IVAR4.EQ.0)THEN
    IVAR4=24
  ENDIF

C  Numéro d'article
  ART=J

C  Température de l'air (degré Kelvin)
  TEMPFORET=TEMP(J)+273.15
  RVAR1=TEMP(J)
  RVAR1=RVAR1+273.15

C  Vitesse du vent (m/s)
  RVAR2=IVAR8
  RVAR2=RVAR2*1000/3600

C  Précipitations (mm)
  RVAR4=PRECIPH(J)/CRNIPHER(J)
  SUM4=SUM4+RVAR4

C  Particularité qui permet d'extraire les codes
  CODE(J)=CAR2

DO 305 X=1,J-1
  IF(J-1 >= 1)THEN
    IF(CODE(J).EQ.CODE(X))THEN
      LOGIQUE='F'
      GOTO 315
    ELSE
      LOGIQUE='T'
    ENDIF
  ENDIF
305 CONTINUE

315 CONTINUE

  IF(LOGIQUE.EQ.'T')THEN
    WRITE(14,*)CODE(J)
  ENDIF

C  Phase (entre 0 et 1)
  RVAR5=RVAR5I(J)

C  Humidité
C  Appel de la sous routine ZEW identique à celle présent dans le code source du modèle CROCUS
  ES=ZEW(RVAR1)
  RVAR3=100*10**(((7.5*237.3)*(IVAR7-TEMP(J)))/((237.3+IVAR7)*
S (237.3+TEMP(J))))
  IF(RVAR3.GT.100)THEN

```

```
RVAR3=100
ENDIF
PE=RVAR3/100*ES

C Nébulosité
RVAR9=IVAR10
RVAR9=RVAR9/10

C ZBERL - Calcul du rayonnement infrarouge incident par les formules
C de Berlianda et Satterlund
C
C OBJET
C -----
C CALCULER UN RAYONNEMENT INFRAROUGE ATMOSPHERIQUE THEORIQUE
C ZBERL EN W/M2
C
C PARAMETRES D ENTrees
C -----
C PTAIR : TEMPERATURE DE L AIR EN DEGRES CELCIUS
C PNEB : NEBULOSITE (EN 1/10 EME DE LA VOUTE CELESTE) [0.,1.]
C PE : TENSION DE VAPEUR D EAU (HPA)
C
C INTERFACE
C -----
C ZBERL(PNEB,PTAIR,PE)
C
C METHODE
C -----
C PARAMETRISATION DE BERLIANDA OU SATTERLUND DU RAYONNEMENT
C INFRAROUGE ATMOSPHERIQUE
C DU TYPE LOI DE STEFAN : EPSILON*SIGMA*(TAIRKELVIN**4)
C
C EXTERNES
C -----
C
C REFERENCES
C -----
C GERBIER (NOTE DE TRAVAIL DE L ENM)
C
C AUTEURS
C -----
C ERIC BRUN
C
C MODIFICATIONS
C -----
C 05/98 - YVES LEJEUNE
C - CODAGE NORME DOCTOR)
C - AUGMENTATION DU RAYONNEMENT CALCULE : ZBERL*ZCOEF (ZCOEF=1.05)

C COEFFICIENT DEPENDANT DE LA NEBULOSITE
C -----
ZRK=0.09+0.2*RVAR9
```

```

C  CONSTANTE DE STEFAN
C  -----
C  ZSIGMA=5.67E-8

C  COEFFICIENT DE BERLIANDA ET SATTERLUND (EMISSIVITE ATMOSPHERIQUE)
C  -----
C  BERLIANDA
C  ZEPSI1=.58+.9*ZRK*(RVAR9**2.)+.06*SQRT(PE)*(1-ZRK*(RVAR9**2.))

C  SATTERLUND
C  ZEPSI2=1.08*(1-EXP(-1*PE**(RVAR1/2016)))

C  RAYONNEMENT INFRAROUGE ATMOSPHERIQUE
C  -----
C  SATTERLUND
C  ZBERL2=(ZEPSI2*ZSIGMA*((RVAR1)**4.))*(1+TNUA*(RVAR9**2))

C  BERLIANDA
C  ZBERL1=(ZEPSI1*ZSIGMA*((RVAR1)**4.))

C  INTÉGRATION DES DEUX CALCULS
C  ZBERL3=ZBERL2*(1-RVAR9)+ZBERL1*(RVAR9)

C  INTÉGRATION DE L'INFLUENCE DE LA FORÊT
C  ZBERL=ZBERL3*(1-DENSITEF)
C  ZIRFORET=EPSILONF*ZSIGMA*((TEMPFORET)**4.)*DENSITEF
C  ZCOEF=1.02945
C  ZBERL=ZCOEF*(ZBERL+ZIRFORET)
C  ZBERL=ZCOEF*ZBERL1
C  RVAR6=ZBERL

C*****
C  SUBROUTINE RAYTHE(KPDATE,PAHOR,KPMASQ,KPalti,PLAT,PLON,
C  SPTAIR,PUAIR,PNEB,PDIR,PDIF,PGLOB)
C*****
C
C  RAYTHE - CALCUL POUR UN SITE DONNE DES RAYONNEMENTS THEORIQUES
C  GLOBAL,DIRECT ET DIFFUS SUR UNE SURFACE ELEMENTAIRE
C  HORIZONTALE
C
C  OBJET
C  -----
C  CALCULER DES RAYONNEMENTS SOLAIRES THEORIQUES ET ESSENTIELLEMENT
C  PERMETTRE LA DECOMPOSITION D UN RAYONNEMENT SOLAIRE GLOBAL MESURE
C  PAR UN PYRANOMETRE "SUR UNE SURFACE HORIZONTALE"
C  (PENTE D INCLINAISON NULLE OU TRES FAIBLE < 5 DEGRES )
C  EN RAYONNEMENT DIRECT ET RAYONNEMENT DIFFUS.
C
C  CETTE DECOMPOSITION EST POSSIBLE SI LES VARIABLES METEOROLOGIQUES
C  TEMPERATURE, HUMIDITE DE L AIR ET NEBULOSITE DU CIEL SONT
C  CONNUES.
C
C  1)PARAMETRES D ENTREE
C  -----
C

```

## C PARAMETRES TEMPORELS

C

C KPPATE : DATE (AAAA,MM,JJ)

C

```
KPPATE(1)=IVAR1
KPPATE(2)=IVAR2
KPPATE(3)=IVAR3
```

```
BISEX1=IVAR1/4
BISEX2=IVAR1/4
BISEX3=BISEX1*4
BISEX4=BISEX2*4
```

## C PAHOR : HEURE ET 1/10EME UTC

```
IF (IVAR4 <19)THEN
```

```
PAHOR=IVAR4+5
```

```
ELSE
```

```
PAHOR=IVAR4-19
```

```
KPPATE(3)=IVAR3+1
```

```
ENDIF
```

```
IF(IVAR2 .EQ. 09 .and. IVAR3 .EQ. 30 .and. IVAR4 >18)THEN
```

```
KPPATE(3)=01
```

```
KPPATE(2)=10
```

```
ENDIF
```

```
IF(IVAR2 .EQ. 10 .and. IVAR3 .EQ. 31 .and. IVAR4 >18)THEN
```

```
KPPATE(3)=01
```

```
KPPATE(2)=11
```

```
ENDIF
```

```
IF(IVAR2 .EQ. 11 .and. IVAR3 .EQ. 30 .and. IVAR4 >18)THEN
```

```
KPPATE(3)=01
```

```
KPPATE(2)=12
```

```
ENDIF
```

```
IF(IVAR2 .EQ. 12 .and. IVAR3 .EQ. 31 .and. IVAR4 >18)THEN
```

```
KPPATE(3)=01
```

```
KPPATE(2)=01
```

```
KPPATE(1)=IVAR1+1
```

```
ENDIF
```

```
IF(IVAR2 .EQ. 01 .and. IVAR3 .EQ. 31 .and. IVAR4 >18)THEN
```

```
KPPATE(3)=01
```

```
KPPATE(2)=02
```

```
ENDIF
```

```
IF(BISEX3<BISEX4.OR.BISEX3>BISEX4)THEN
```

```
IF(IVAR2 .EQ. 02 .and. IVAR3 .EQ. 28 .and. IVAR4 >18)THEN
```

```
KPPATE(3)=01
```

```
KPPATE(2)=03
```

```
ENDIF
```

```
ENDIF
```

```

IF(BISEX3.EQ.BISEX4)THEN
IF(IVAR2 .EQ. 02 .and. IVAR3 .EQ. 29 .and. IVAR4 >18)THEN
KPPATE(3)=01
KPPATE(2)=03
ENDIF
ENDIF

```

```

IF(IVAR2 .EQ. 03 .and. IVAR3 .EQ. 31 .and. IVAR4 >18)THEN
KPPATE(3)=01
KPPATE(2)=04
ENDIF

```

```

IF(IVAR2 .EQ. 04 .and. IVAR3 .EQ. 30 .and. IVAR4 >18)THEN
KPPATE(3)=01
KPPATE(2)=05
ENDIF

```

```

IF(IVAR2 .EQ. 05 .and. IVAR3 .EQ. 31 .and. IVAR4 >18)THEN
KPPATE(3)=01
KPPATE(2)=06
ENDIF

```

C CARACTERISTIQUES DU SITE

```

C -----
C KPMASQ : MASQUES SOLAIRES EN DEGRES DONNES EN ROSE DE 72 (SOIT PAR
C PAS DE 5 DEG) PAR RAPPORT AU NORD GEOGRAPHIQUE:
C KPMASQ(IAZI,1)CORRESPOND AU MASQUE HAUT RELEVÉ POUR
C L AZIMUTH IAZI
C KPMASQ(IAZI,2)CORRESPOND AU MASQUE BAS RELEVÉ POUR
C L AZIMUTH IAZI
C KPMASQ(IAZI,3)CORRESPOND AU % DE MATIERE ENTRE LES MASQUES
C HAUT ET BAS RELEVÉS POUR L AZIMUTH IAZI
C (SI KPMASQ(IAZI,1)=KPMASQ(IAZI,2) ALORS KPMASQ(IAZI,3)=50)
C KPMASQ(72,1) CORRESPOND AU MASQUE RELEVÉ DANS LA DIRECTION
C DU NORD GEOGRAPHIQUE
C KPMASQ(36,1) CORRESPOND AU MASQUE RELEVÉ DANS LA DIRECTION
C DU SUD GEOGRAPHIQUE
C KPMASQ(1,1) CORRESPOND AU MASQUE RELEVÉ DANS LA DIRECTION
C 5 DG EST

```

```

C KPALTI : ALTITUDE DU SITE EN METRES
C PLAT : LATITUDE DU SITE EN DEGRES
C (>0 DANS L HEMISPHERE NORD)
C PLON : LONGITUDE DU SITE EN DEGRES
C (>0 A L EST DU MERIDIEN DE GREENWICH)

```

C PARAMETRES METEOROLOGIQUES

```

C -----
C PTAIR : TEMPERATURE DE L AIR EN DEGRES CELCIUS
C PTAIR=RVAR1-273.15
C PUAIR : % D HUMIDITE DE L AIR [0,100]
C PUAIR=RVAR3
C PNEB : NEBULOSITE (EN 1/10 EME DE LA VOUTE CELESTE) [0.,1.]
C PNEB=RVAR9

```

C 2)PARAMETRES DE SORTIE

C -----  
C PUISSANCE RAYONNEES PAR UNITE DE SURFACE (W/M2)  
C PDIR : RAYONNEMENT SOLAIRE DIRECT THEORIQUE  
C PDIF : RAYONNEMENT SOLAIRE DIFFUS THEORIQUE  
C PGLob : RAYONNEMENT SOLAIRE GLOBAL (= PDIR+PDIF)

C METHODE

C -----  
C CALCUL DES PARAMETRES DE POSITION DU SOLEIL ET DES  
C RAYONNEMENTS DIRECT ET DIFFUS A PARTIR DE FORMULES  
C COSMOGRAPHIQUES ET ENERGETIQUES

C EXTERNES

C -----

C REFERENCES

C -----  
C LE GISEMENT SOLAIRE DE PERRIN DE BRICHAMBAUT  
C NOTE DE TRAVAIL DE L ENM (MAI 1985) D ERIC GERBIER

C AUTEURS

C -----  
C ERIC BRUN

C MODIFICATIONS

C -----  
C 05/98 - YVES LEJEUNE - REECRITURE A LA NORME DOCTOR

\*\*\*\*\*

C DECLARATIONS

C \*\*\*\*\*

C 1)CALCUL DES PARAMETRES DE POSITION DU SOLEIL

C \*\*\*\*\*

C CONSTANTES ELEMENTAIRES

C -----

ZPI=3.1416  
ZDG2RD=ZPI/180.  
ZRD2DG=180./ZPI  
ZEPSIL=1E-8

C RECHERCHE DU JOUR JULLIEN

C -----

C\*\*\*\* \*IDDATE\* - DIFFERENCE ENTRE 2 DATES.

C OBJET.

C -----

C RETOURNER LA DIFF. ENTRE 2 DATES, CODEES SUR DES ENTIERS 32 BITS  
C AU FORMAT ((AN\*JPCDAT)+MM)\*JPCDAT+JJ,EXPRIMEE EN NOMBRE DE JOURS

```

C** INTERFACE.
C -----

C *IDDATE(KDAT1,KDAT2)*

C *KDAT1* - DATE FORMATEE EN UN ENTIER 32 BITS.
C *KDAT2* - DATE FORMATEE EN UN ENTIER 32 BITS.

C METHODE.
C -----

C EXTERNES.
C -----

C REFERENCES.
C -----

C AUTEURS.
C -----

C YANNICK DANIELOU.

C MODIFICATIONS.
C -----

C DECLARATIONS.
C -----

C INCLUDE 'CROCUS.H'

KDAT1= (((KPPDATE(1)*100)+KPPDATE(2))*100+KPPDATE(3))
KDAT2= (((KPPDATE(1)*100)+1)*100+1)

IF(KDAT1.GE.KDAT2)THEN
  IDAT1=KDAT1
  IDAT2=KDAT2
ELSE
  IDAT2=KDAT1
  IDAT1=KDAT2
ENDIF

IJ1=MOD(IDAT1,JPCDAT)
IJ2=MOD(IDAT2,JPCDAT)
IM1=MOD(IDAT1/JPCDAT,JPCDAT)
IM2=MOD(IDAT2/JPCDAT,JPCDAT)
IA1=IDAT1/(JPCDAT*JPCDAT)
IA2=IDAT2/(JPCDAT*JPCDAT)

IDDATE=IJ1-IJ2
DO WHILE(IM1.NE.IM2)
  IDDATE=IDDATE+NUMOIJ(IM2)
  IF(IM2.EQ.NUMOIB.AND.MOD(IA2,NUANB).EQ.0) IDDATE=IDDATE+1
  IM2=IM2+1
  IF(IM2.GT.JPNMOI)THEN
    IM2=1
  
```

```

IA2=IA2+1
ENDIF
END DO
DO WHILE(IA1.NE.IA2)
  IDDATE=IDDATE+NUAN2J
  IF(MOD(IA2,NUANB).EQ.0) IDDATE=IDDATE+1
  IA2=IA2+1
END DO
IJUL=IDDATE+1

C EQUATION DU TEMPS (MINUTES)
C -----
ZDT=9.9*SIN((2*(0.986*IJUL+100.))*ZDG2RD)
S -7.7*SIN((0.986*IJUL-2.)*ZDG2RD)

C DECLINAISON DU SOLEIL (SINUS ET VALEUR EN RADIANS)
C -----
ZSINDE=0.4*SIN(((0.986*IJUL)-80.)*ZDG2RD)
ZDELTA=ATAN(ZSINDE/SQRT(1.-(ZSINDE*ZSINDE)))

C ANGLE HORAIRE DU SOLEIL (EN RADIANS)
C -----
ZOMEGA=15.*(PAHOR-12.+(ZDT/60.)+(PLON/15.))*ZDG2RD

C HAUTEUR ANGULAIRE DU SOLEIL (SINUS ET VALEUR EN RADIANS)
C -----
ZPLAT=PLAT*ZDG2RD
ZSINGA=SIN(ZPLAT)*ZSINDE+COS(ZPLAT)*COS(ZDELTA)*COS(ZOMEGA)
ZGAMMA=ATAN(ZSINGA/SQRT(1-(ZSINGA*ZSINGA)))

C AZIMUTH DU SOLEIL (SINUS ET VALEUR EN RADIANS)
C ATTENTION AZIMUTH COSMOGRAPHIQUE DU SUD=0
C -----
IF(ZPI/2.-ABS(ZGAMMA).LE.ZEPSIL)THEN
C CULMINATION PROCHE DE LA VERTICALE DU LIEU
ZPSI=0.
ELSE
ZSINPS=COS(ZDELTA)*SIN(ZOMEGA)/COS(ZGAMMA)
ZCOSPS=(SIN(ZPLAT)*COS(ZOMEGA)*COS(ZDELTA)-COS(ZPLAT)*ZSINDE)
S /COS(ZGAMMA)
IF(1-ABS(ZSINPS).LT.ZEPSIL)THEN
ZPSI=SIGN(ZPI/2.,ZSINPS)
ELSE
ZPSI=ASIN(ZSINPS)
ENDIF
IF(ZCOSPS.LE.0.)ZPSI=SIGN(ZPI,ZPSI)-ZPSI
ENDIF

C 2)CALCUL DES RAYONNEMENTS
C *****
C CALCUL DE LA PRESSION STANDARD ET DE LA TENSION DE VAPEUR (HPA)
C -----
ZPRESS=1013.25*(1-(0.0065*FLOAT(KPALTI)/288.15))**5.31
ZTAIRK=PTAIR+273.15

```

```

ZE=ZEW(ZTAIRK)*PUAIR/100

C SI SOLEIL SOUS L HORIZON
C -----
  IF(ZSINGA.LE.0.)THEN

    ZDIR=0.
    ZDCIEL=0.

C SINON
C -----
  ELSE

C ABSORPTION GAZEUSE
C -----
  ZABGAZ=73.*(0.17*ZE/ZSINGA)**0.33

C DIFFUSION DUE AUX AEROSOLS
C -----
C COEFFICIENT DE DIFFUSION DU AUX AEROSOLS ZB
C (EN MONTAGNE POUR UN CIEL ASSEZ PUR ZB=0.05)
  ZB=0.05
  ZDAERO=0.75*(ZB/ZSINGA)**0.55
  IF(ZDAERO.GT.1.)ZDAERO=1.

C DIFFUSION MOLECULAIRE
C -----
  ZDMOL=145.*(ZPRESS/1013.*ZSINGA)**0.6

C RAYONNEMENT SOLAIRE INCIDENT A LA SURFACE DE L'ATMOSPHERE
C CORRIGE DE LA DISTANCE TERRE-SOLEIL SUR UNE SURFACE NORMALE
C AU RAYONNEMENT
C -----
  ZIO=1370.*(1.-(ZSINDE/11.7))

C RAYONNEMENT DIRECT APRES ATTENUATION DUE A L ATMOSPHERE
C -----
  ZDIR=(1-ZDAERO)*(ZIO-ZABGAZ-ZDMOL)
  IF(ZDIR.LT.0.)ZDIR=0.

C ISOTROPIE DU RAYONNEMENT DIFFUS DU CIEL
C -----
  ZDCIEL=0.5*(ZIO-ZDIR-ZABGAZ)*ZSINGA

C INFLUENCE DE LA NEBULOSITE
C -----
  ZDIR=ZDIR*(1.-PNEB)
  ZDCIEL=ZDCIEL*(1.+1.1*SIN(0.85*PNEB*ZPI))
  IF(ZDCIEL.LT.0.)ZDCIEL=0.

C EVALUATION DES MASQUES EVENTUELS
C -----
  ZPSI1=(ZPSI*ZRD2DG+180.)*0.2
  IPSI1=INT(ZPSI1)
  IPSI2=IPSI1+1

```

```

ZMASQH=
S (IPSI2-ZPSI1)*KPMASQ(IPSI1,1)+(ZPSI1-IPSI1)*KPMASQ(IPSI2,1)
ZMASQB=
S (IPSI2-ZPSI1)*KPMASQ(IPSI1,2)+(ZPSI1-IPSI1)*KPMASQ(IPSI2,2)
ZOCULT=
S (IPSI2-ZPSI1)*KPMASQ(IPSI1,3)+(ZPSI1-IPSI1)*KPMASQ(IPSI2,3)

C TESTS AUX LIMITES
IF(IPSI1.EQ.0)THEN
ZMASQH=(IPSI2-ZPSI1)*KPMASQ(72,1)+ZPSI1*KPMASQ(IPSI2,1)
ZMASQB=(IPSI2-ZPSI1)*KPMASQ(72,2)+ZPSI1*KPMASQ(IPSI2,2)
ZOCULT=(IPSI2-ZPSI1)*KPMASQ(72,3)+ZPSI1*KPMASQ(72,3)
ENDIF
IF(IPSI1.EQ.72)THEN
ZMASQH=KPMASQ(72,1)
ZMASQB=KPMASQ(72,2)
ZOCULT=KPMASQ(72,3)
ENDIF

C INFLUENCE DES MASQUES SUR LES RAYONNEMENTS
C -----
IF(ZMASQB.GT.ZGAMMA*ZRD2DG)THEN
C EXTINCTION DU RAYONNEMENT DIRECT
ZDIR=0.
C ATTENUATION DU RAYONNEMENT DIFFUS
ZDCIEL=ZDCIEL/2.
ELSE IF(ZMASQB.LE.ZGAMMA*ZRD2DG.AND.ZMASQH.GT.ZGAMMA*ZRD2DG)THEN
ZDIR=(100-ZOCULT)/100*ZDIR
ENDIF

C PROJECTION DU RAYONNEMENT SOLAIRE DIRECT SUR L HORIZONTALE
C -----
ZDIR=ZDIR*ZSINGA

ENDIF

C RAYONNEMENTS DIRECT, DIFFUS ET GLOBAL
C -----
PDIR=ZDIR
PDIF=ZDCIEL
PGLOB=PDIR+PDIF

RVAR7=PDIR
RVAR8=PDIF

IF(COMPTEUR1.EQ.1.OR.COMPTEUR1.GT.1)THEN
COMPTEUR2=COMPTEUR2+1
WRITE(UNIT=11,REC=COMPTEUR2,ERR=902)RVAR1,RVAR2,RVAR3,RVAR4,RVAR5
S ,RVAR6,RVAR7,RVAR8,RVAR9
ENDIF
COMPTEUR1=COMPTEUR1+1
310 CONTINUE

```

```
3002 FORMAT(A3,1X,I4,1X,I2,1X,I2,1X,1X,I2,
S      1X,I2,1X,I3,1X,I3,1X,I3,1X,I3,2X,I2,1X,A4,1X,
S      I3,A1,I2,A1,1X)

3006 FORMAT(I4,I2,I2,I2,1X,I6,1X,F5.1,1X,F4.1,1X,I3,F5.2,1X,F4.2,
S      4X,F5.1,1X,F5.1,1X,F5.1,1X,F4.2)

DO 320 K=1,COMPTEUR2
READ (UNIT=11,REC=K,ERR=905) RVAR1,RVAR2,RVAR3,RVAR4,
S      RVAR5,RVAR6,RVAR7,RVAR8,RVAR9

RVAR1=RVAR1-273.15
WRITE(*,3005) RVAR1,RVAR2,NINT(RVAR3),RVAR4,RVAR5,RVAR6,
S      RVAR7,RVAR8,RVAR9
320 CONTINUE

3005 FORMAT(F5.1,1X,F4.1,1X,I3,F5.2,1X,F4.2,
S      4X,F5.1,1X,F5.1,1X,F5.1,1X,F4.2)

STOP

901 CONTINUE
WRITE (*,*)'!!!! THIS FILE DOES NOT EXIST'
STOP
902 CONTINUE
WRITE (*,*)'!!!! ERROR WHILE WRITING THE MET FILE'
STOP
905 CONTINUE
WRITE (*,*)'!!!! ERROR WHILE READING THE MET FILE'
STOP
END
```

FUNCTION ZEW(PTAIR)

VEW1=10.79574  
VEW2=1.50475E-4  
VEW3=-8.2969  
VEW4=.42873E-3  
VEW5=4.76955  
VEW6=.78614  
VEW7=5.028  
UTTRIP=276.15

C ZEW CALCUL DE LA TENSION DE VAPEUR D EAU SATURANTE.  
C CALCULATION OF THE SATURATION WATER VAPOUR PRESSURE

C OBJET.  
C -----  
C CETTE FONCTION REND LA TENSION DE VAPEUR D EAU SATURANTE (MB).

C INTERFACE.  
C -----

C ZEW(PTAIR)

C PTAIR - TEMPERATURE AIR (DEGRE KELVIN)  
C - AIR TEMPERATURE

C METHODE.  
C -----  
C FORMULE DE GOFF ET GRATCH.  
C GOFF AND GRATCH FORMULA

C EXTERNES.  
C -----

C REFERENCES.  
C -----

C AUTEURS.  
C -----  
C ERIC BRUN ET AL. - JOURNAL OF GLACIOLOGY 1989/1992.

C MODIFICATIONS.  
C -----  
C 08/95: YANNICK DANIELOU - CODAGE A LA NORME DOCTOR.

C DECLARATIONS.  
C -----

C INCLUDE 'CROCUS.H'

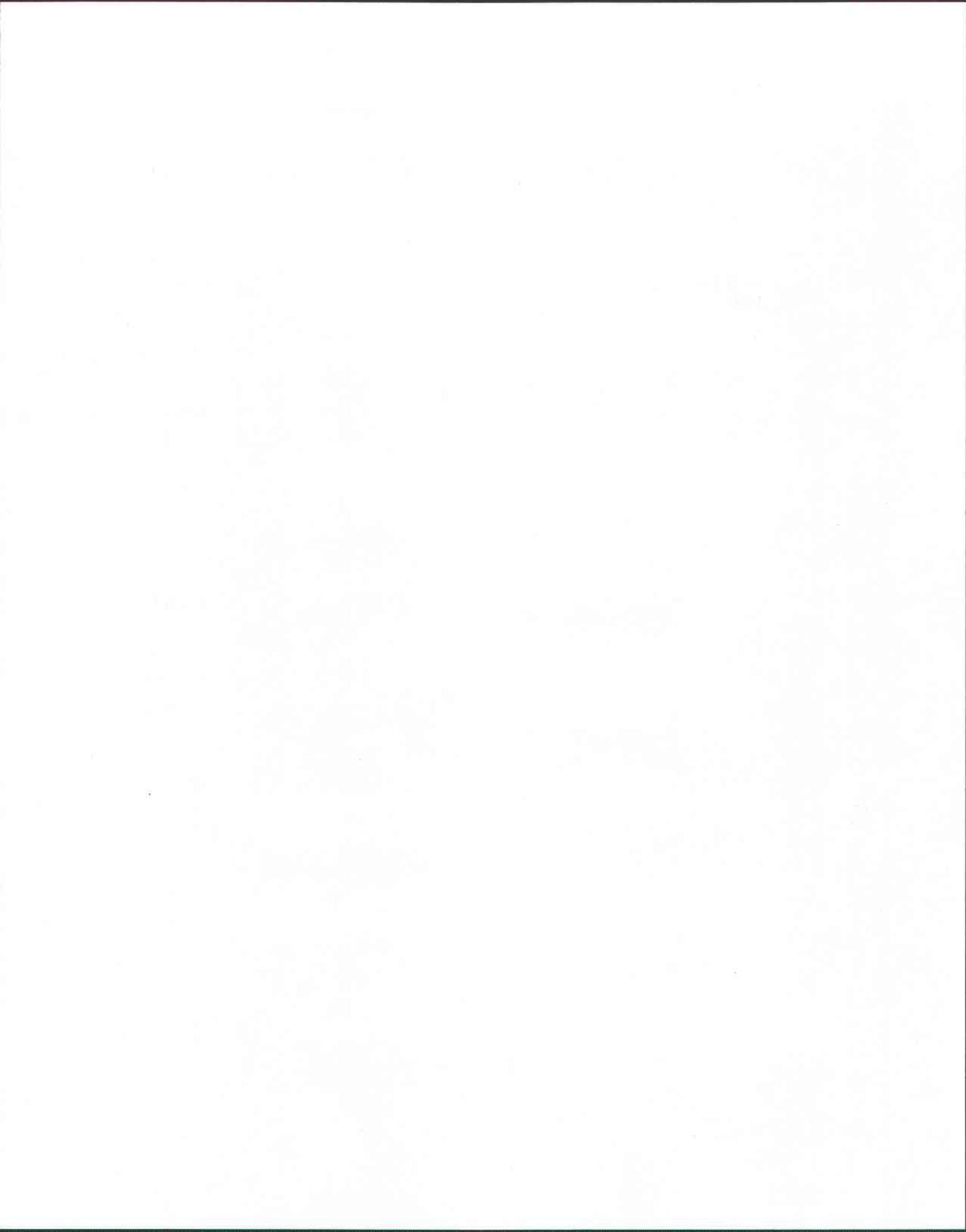
ZTAT0=PTAIR/UTTRIP  
ZT0TA=UTTRIP/PTAIR  
ZLOG10=LOG(10.)

---

```
ZLOGEW=ZLOG10*(VEW1*(1.-ZT0TA)
S      +VEW2*(1.-EXP(ZLOG10*VEW3*(ZTAT0-1.)))
S      +VEW4*(EXP(ZLOG10*VEW5*(1.-ZT0TA))-1.)
S      +VEW6)
S      +VEW7*LOG(ZT0TA)
```

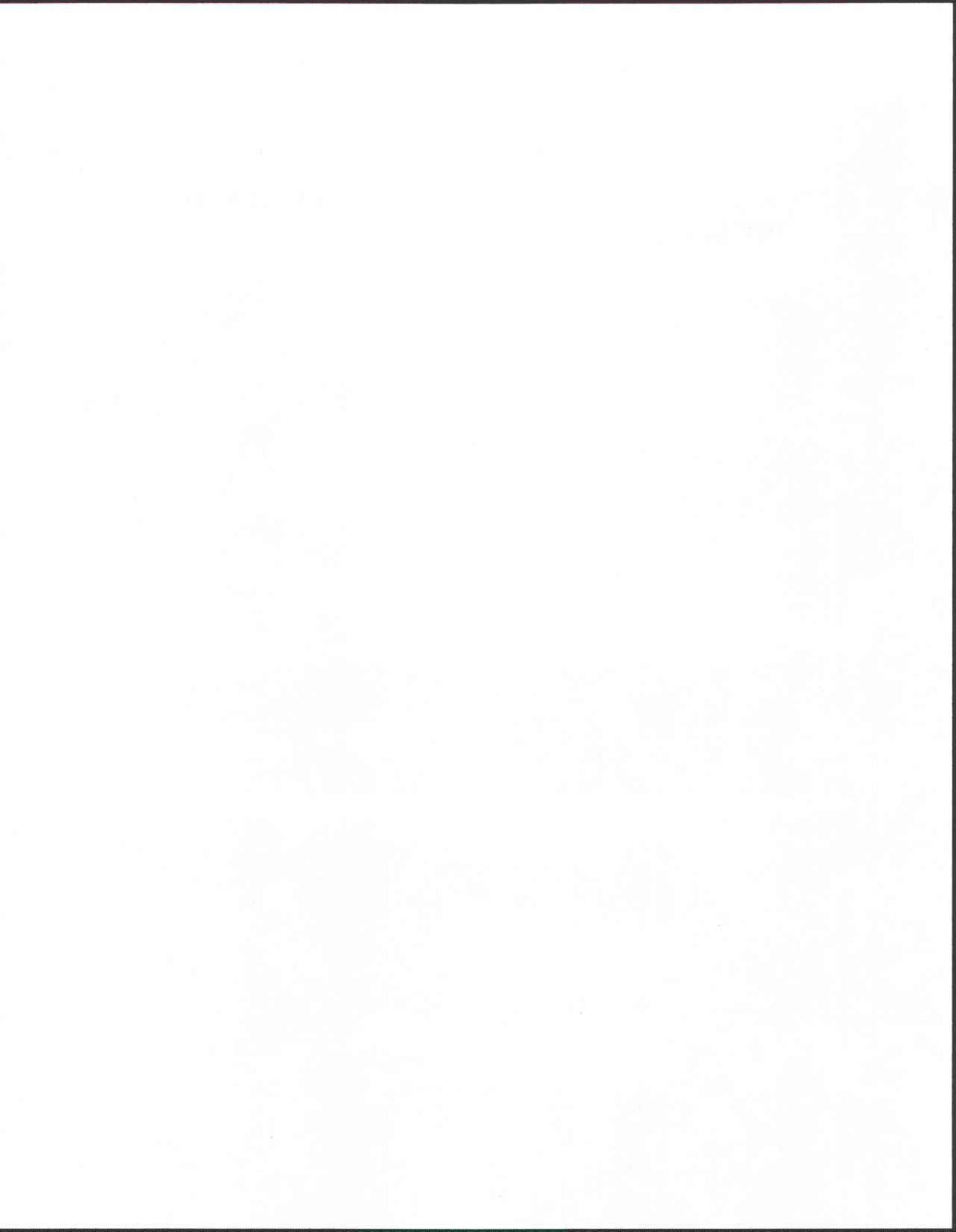
```
ZEW=EXP(ZLOGEW)
```

```
RETURN
END
```



## **ANNEXE 7**

### **RÉSULTATS INITIAUX OBTENUS À L'AIDE DU MODÈLE CROCUS.**



## 7.1 Période allant du 1 septembre 1997 au 31 mai 1998

### 7.1.1 Modélisations initiales à la station Hydro-Québec 02s

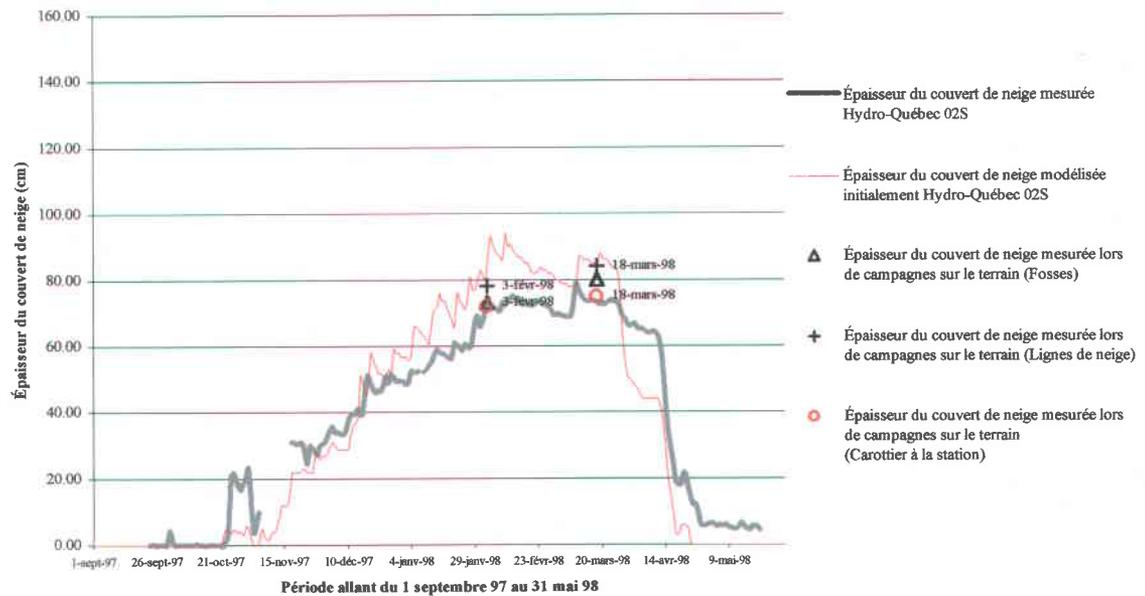


Figure A7.1 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 02s modélisée initialement à l'aide du modèle CROCUS

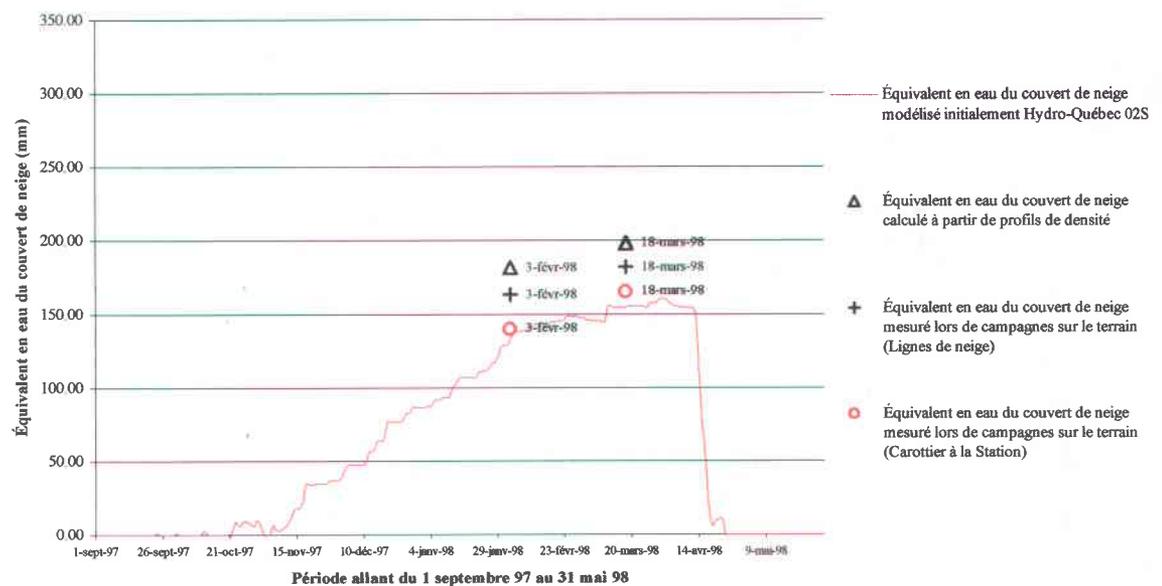


Figure A7.2 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 02s modélisé initialement à l'aide du modèle CROCUS

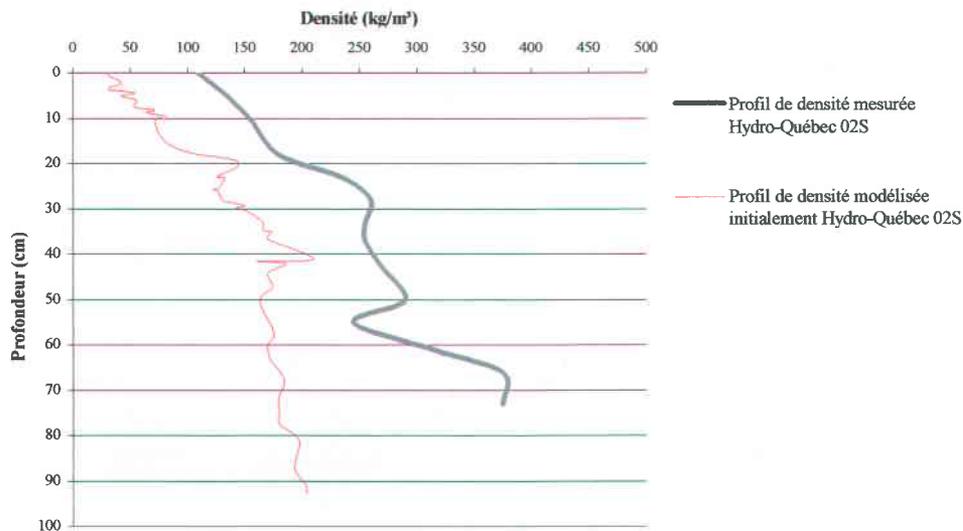


Figure A7.3 Profil de densité modélisée initialement, à l'aide du modèle CROCUS, et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 03 février 1998

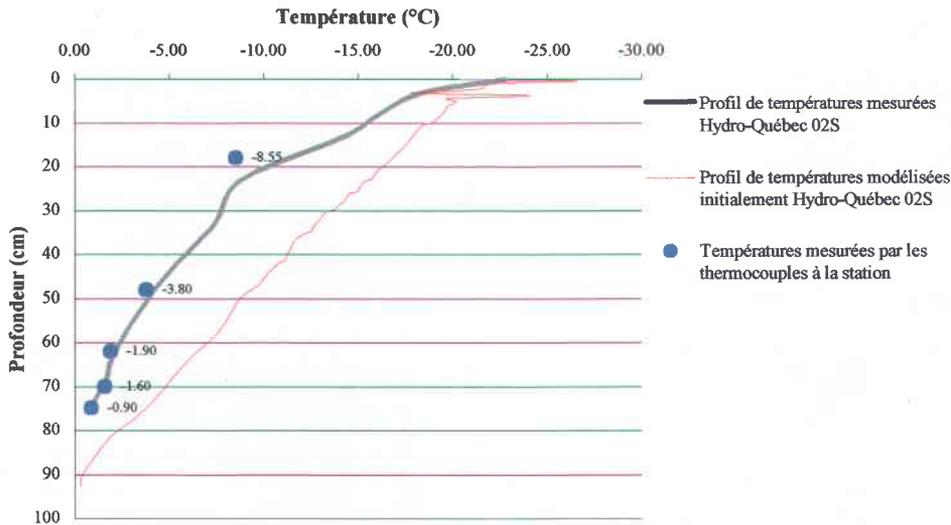


Figure A7.4 Profil de températures modélisées initialement, à l'aide du modèle CROCUS, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date du 03 février 1998

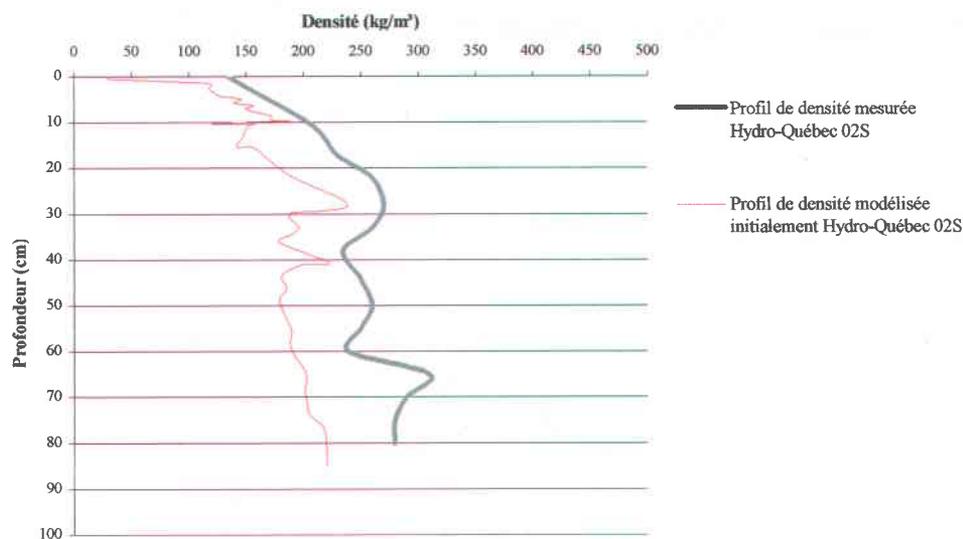


Figure A7.5 Profil de densité modélisée initialement, à l'aide du modèle CROCUS, et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 18 mars 1998

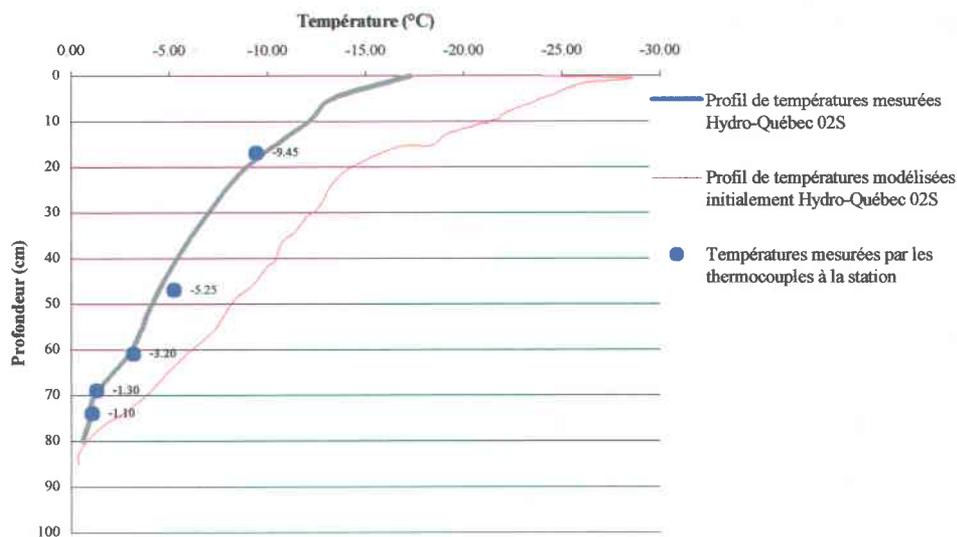


Figure A7.6 Profil de températures modélisées initialement, à l'aide du modèle CROCUS, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date du 18 mars 1998

## 7.1.2 Modélisations initiales à la station Hydro-Québec 11e



Figure A7.7 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 11e modélisée initialement à l'aide du modèle CROCUS

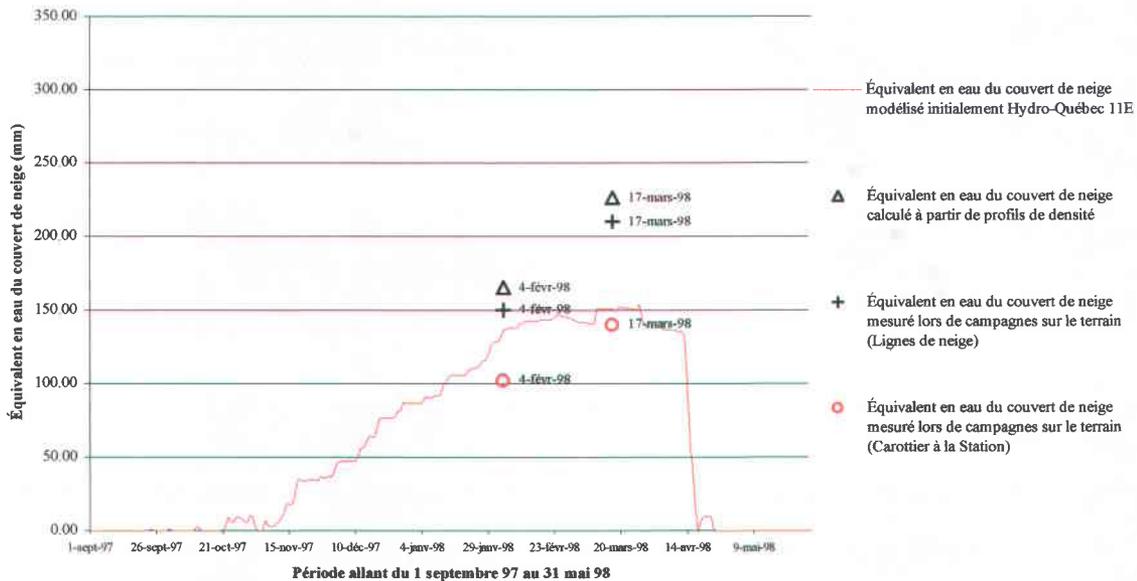


Figure A7.8 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 11e modélisée initialement à l'aide du modèle CROCUS

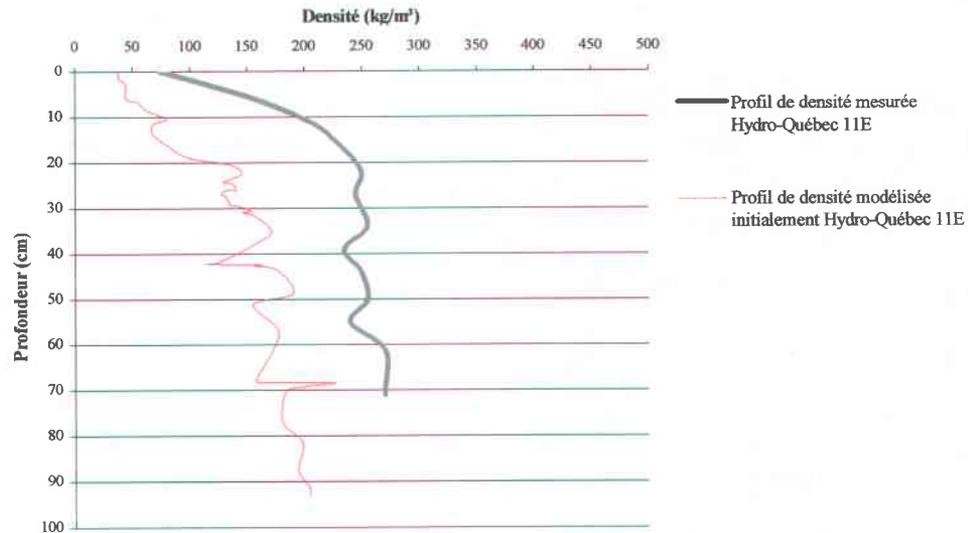


Figure A7.9 Profil de densité modélisée initialement, à l'aide du modèle CROCUS, et mesurée à la station Hydro-Québec 11e en date du 04 février 1998

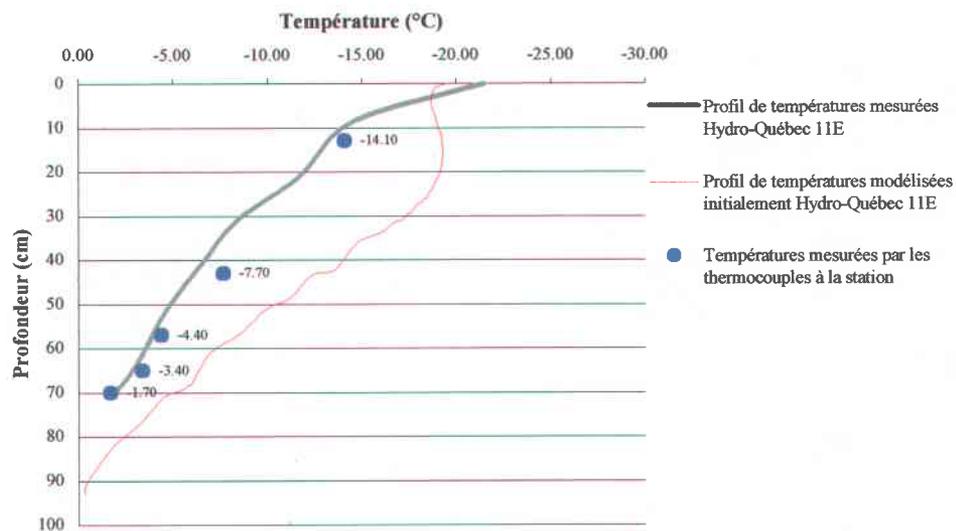


Figure A7.10 Profil de températures modélisées initialement, à l'aide du modèle CROCUS, et mesurées à la station Hydro-Québec 11e en date du 04 février 1998

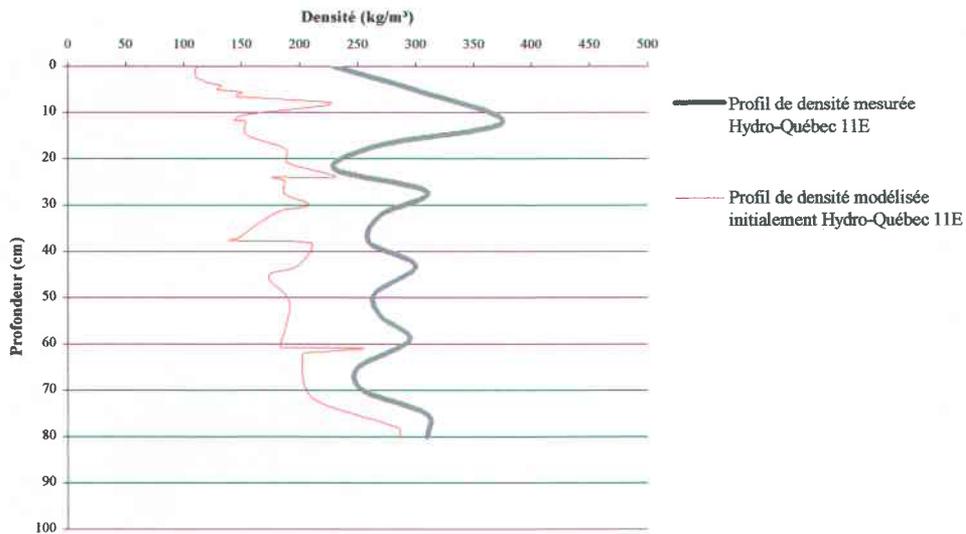


Figure A7.11 Profil de densité modélisée initialement, à l'aide du modèle CROCUS, et mesurée à la station Hydro-Québec 11e en date du 17 mars 1998

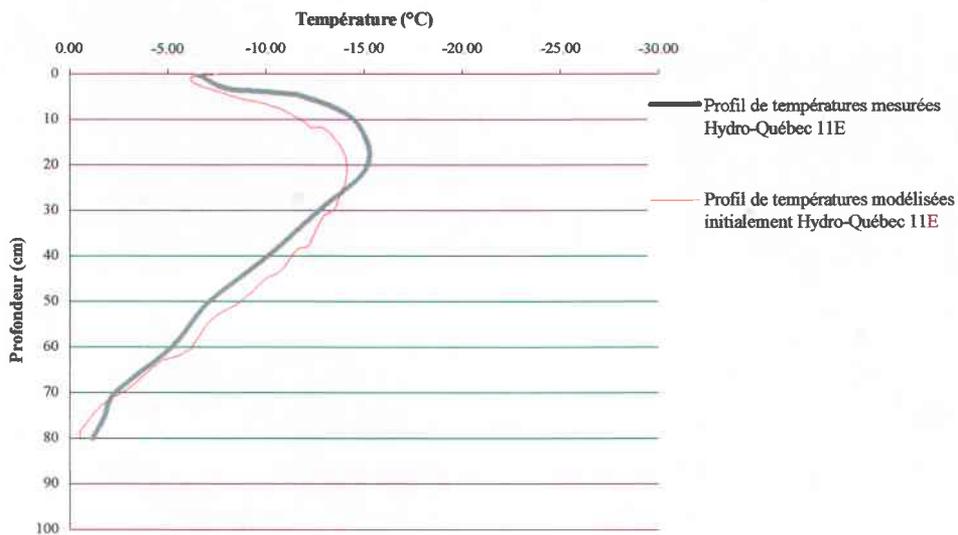


Figure A7.12 Profil de températures modélisées initialement, à l'aide du modèle CROCUS, et mesurées à la station Hydro-Québec 11e en date du 17 mars 1998

### 7.1.3 Modélisations initiales à la station Hydro-Québec 19e

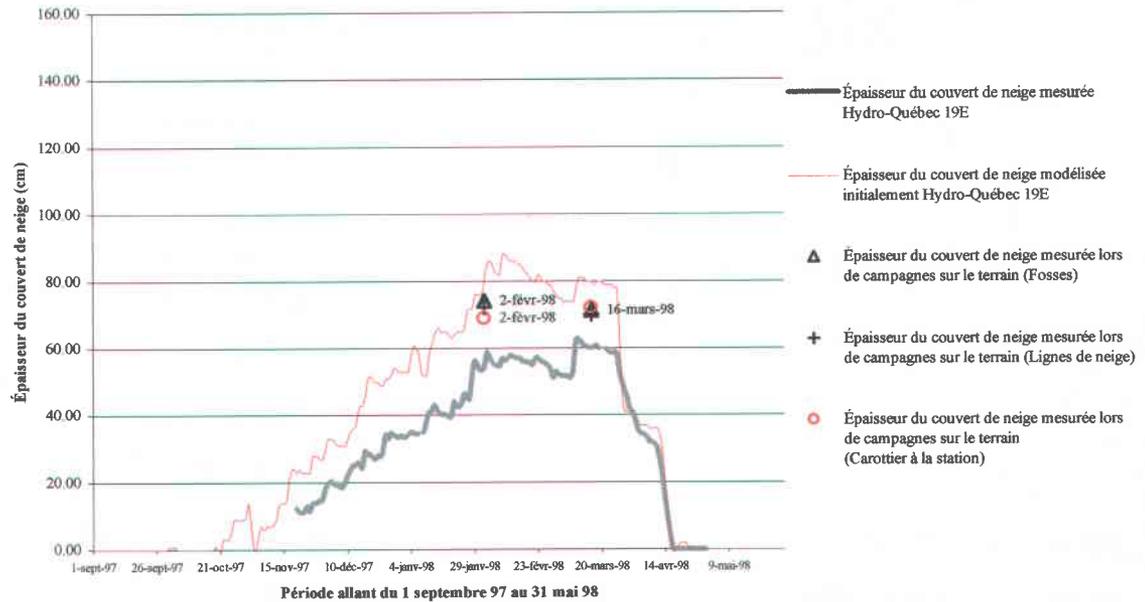


Figure A7.13 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 19e modélisée initialement à l'aide du modèle CROCUS

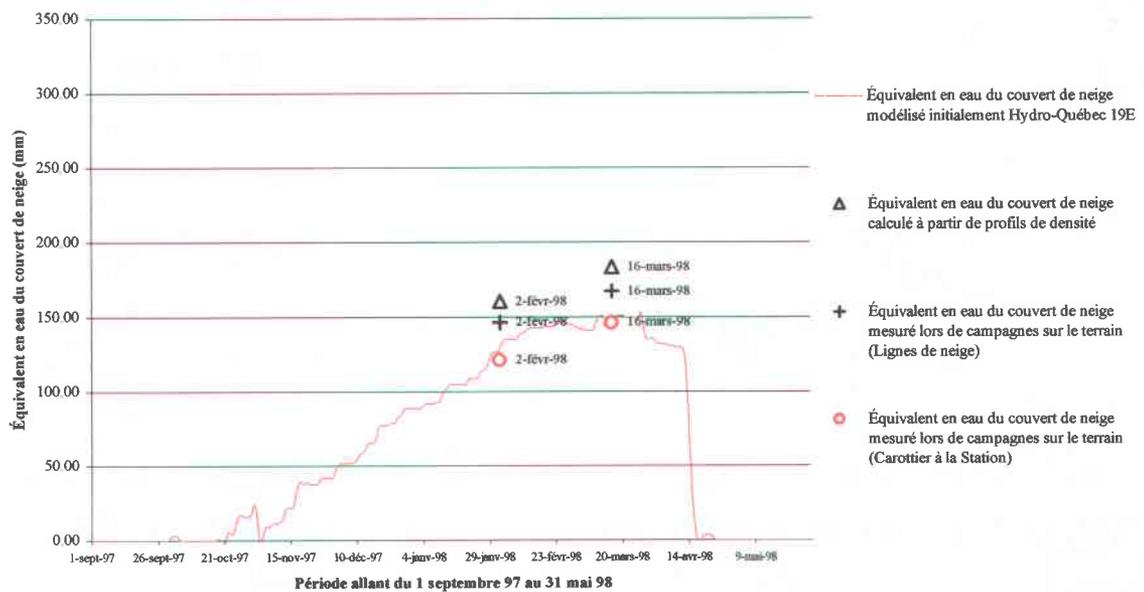


Figure A7.14 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 19e modélisé initialement à l'aide du modèle CROCUS

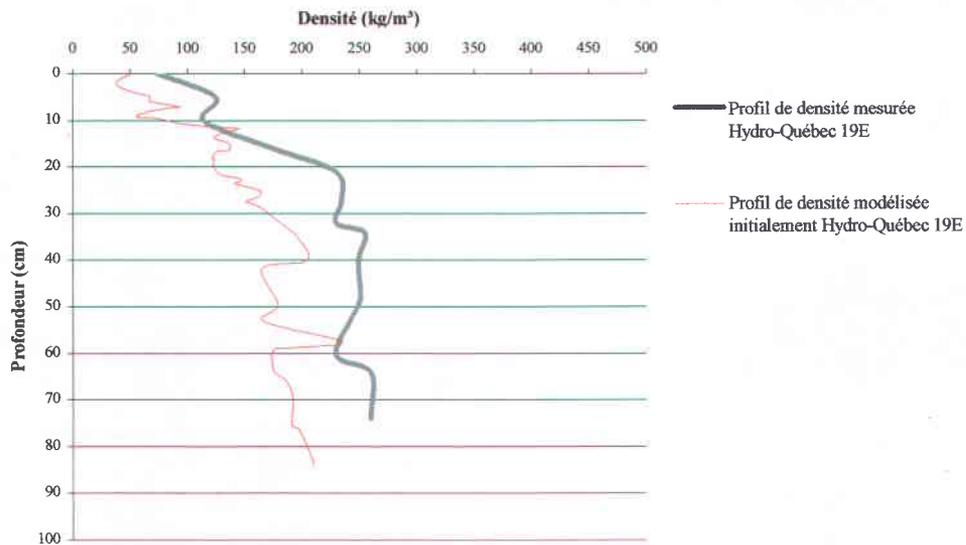


Figure A7.15 Profil de densité modélisée initialement, à l'aide du modèle CROCUS, et mesurée à la station Hydro-Québec 19e en date du 02 février 1998

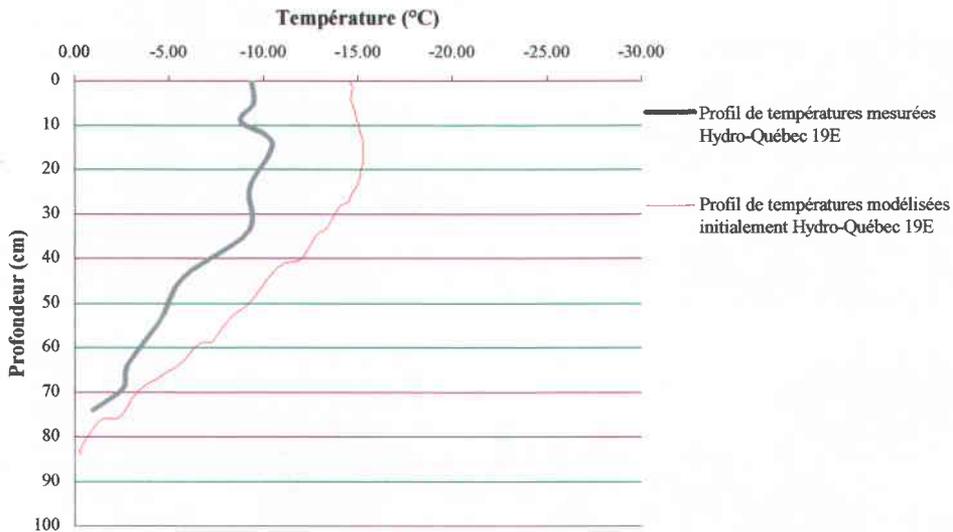


Figure A7.16 Profil de températures modélisées initialement, à l'aide du modèle CROCUS, et mesurées à la station Hydro-Québec 19e en date du 02 février 1998

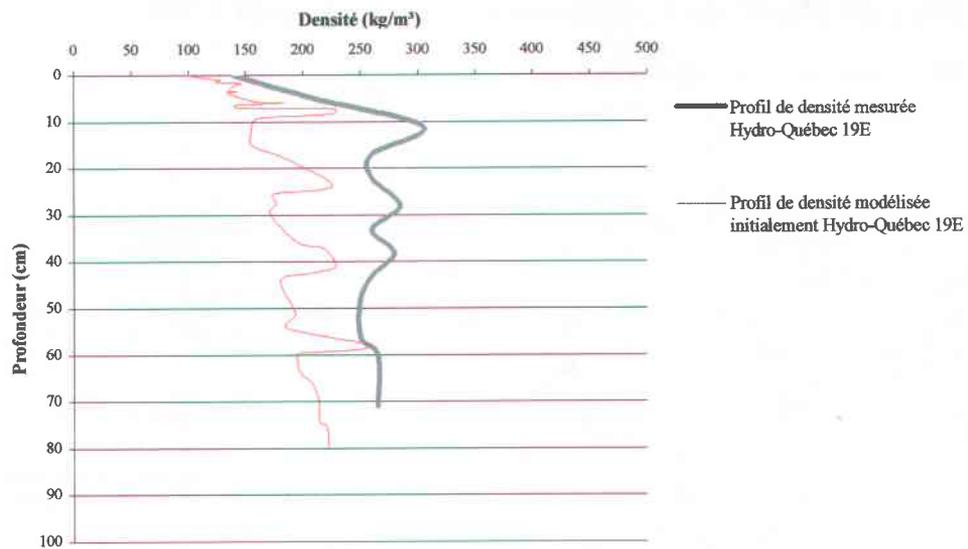


Figure A7.17 Profil de densité modélisée initialement, à l'aide du modèle CROCUS, et mesurée à la station Hydro-Québec 19e en date du 16 mars 1998

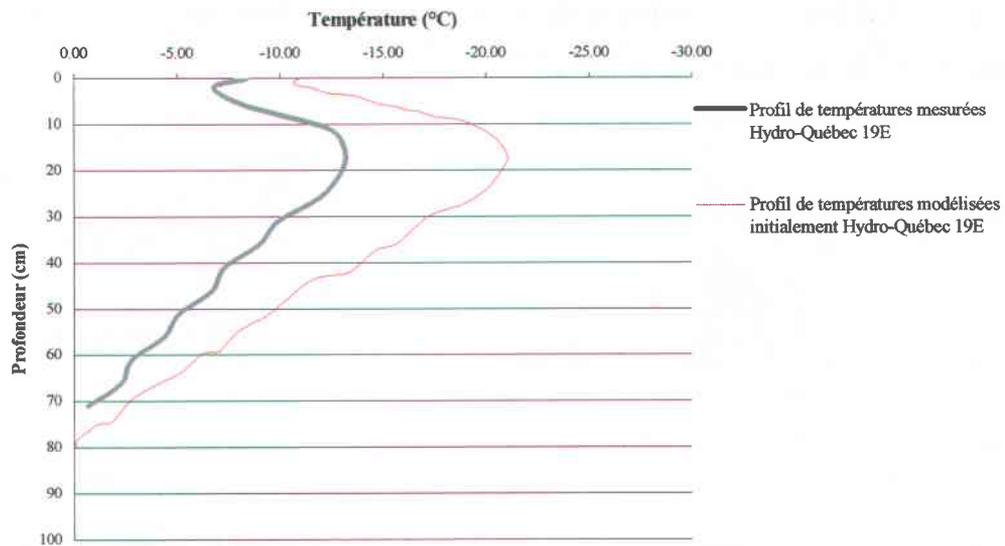


Figure A7.18 Profil de températures modélisées initialement, à l'aide du modèle CROCUS, et mesurées à la station Hydro-Québec 19e en date du 16 mars 1998

## 7.2 Période allant du 1 septembre 1998 au 31 mai 1999

### 7.2.1 Modélisations initiales à la station Hydro-Québec 02s

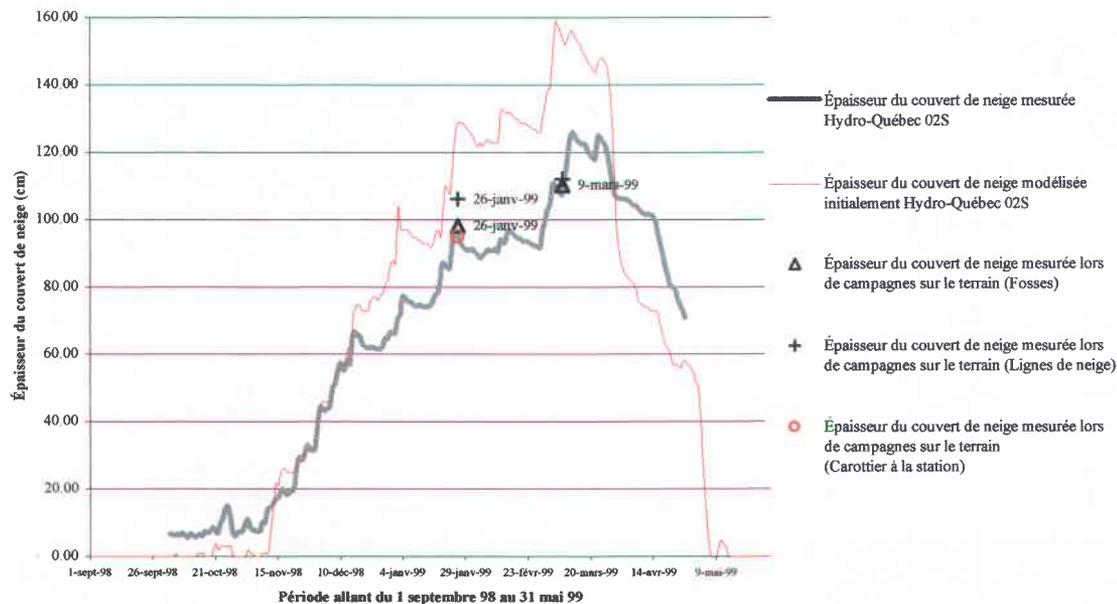


Figure A7.19 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 02s modélisée initialement à l'aide du modèle CROCUS

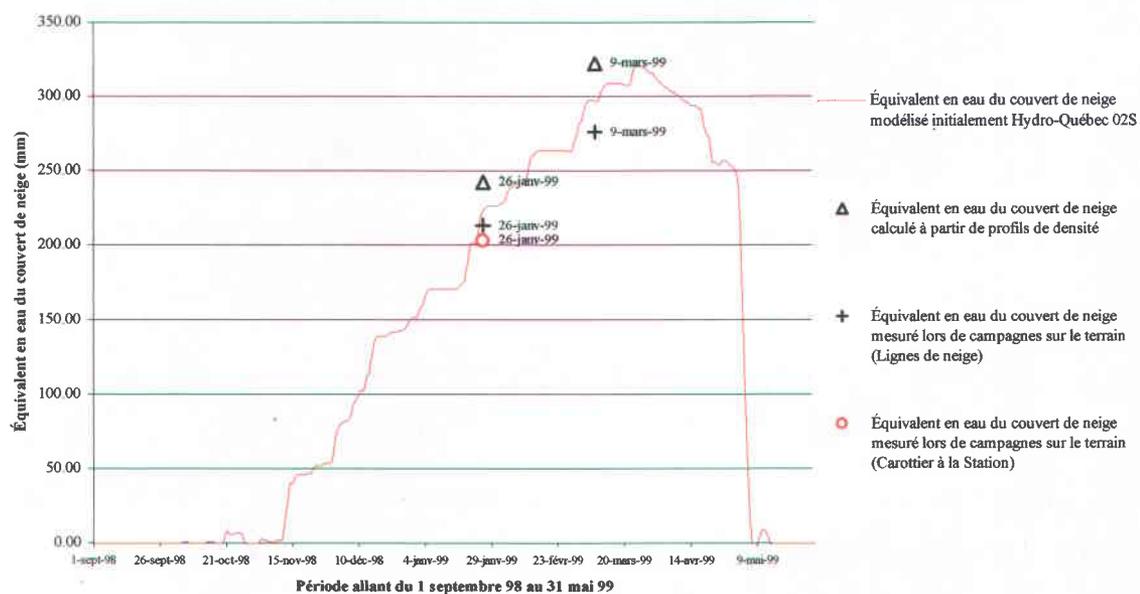


Figure A7.20 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 02s modélisée initialement à l'aide du modèle CROCUS

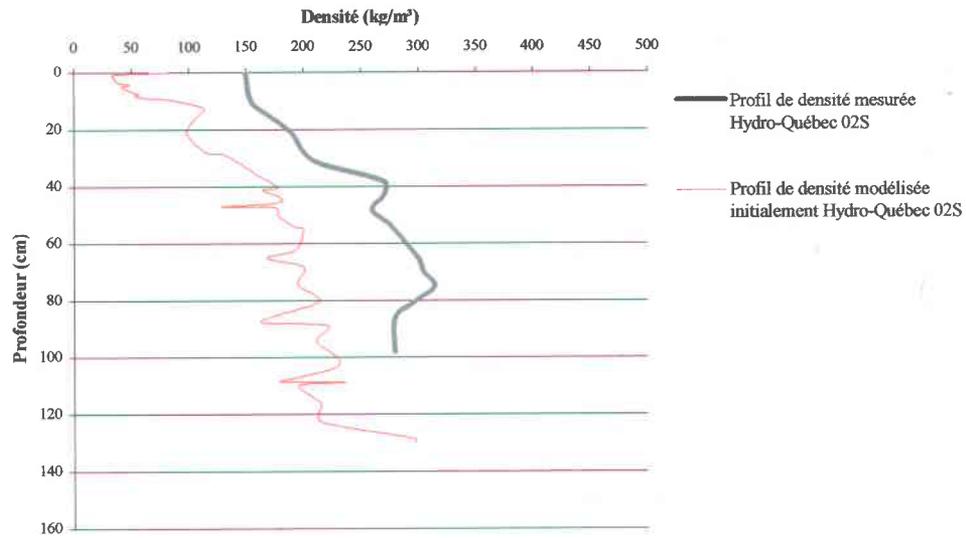


Figure A7.21 Profil de densité modélisée initialement, à l'aide du modèle CROCUS, et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 26 janvier 1999

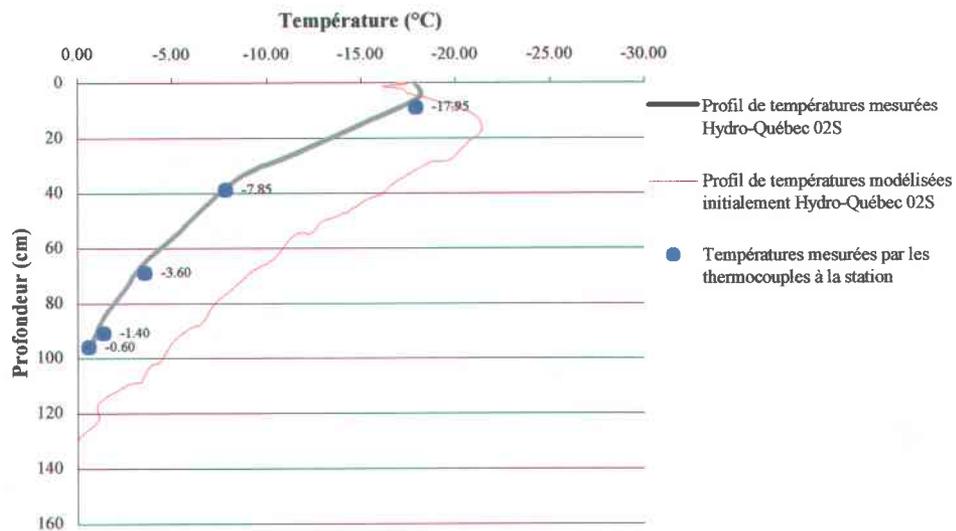


Figure A7.22 Profil de températures modélisées initialement, à l'aide du modèle CROCUS, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date du 26 janvier 1999

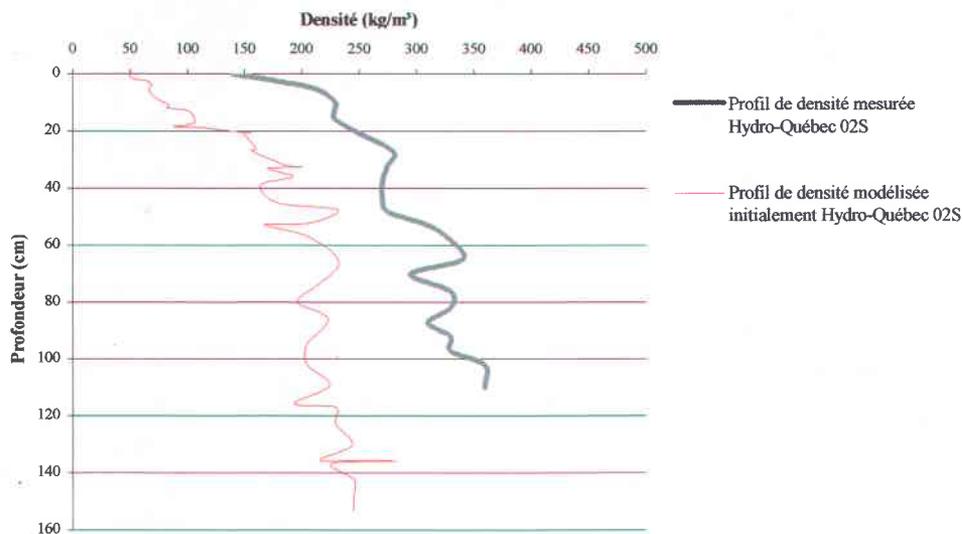


Figure A7.23 Profil de densité modélisée initialement, à l'aide du modèle CROCUS, et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 09 mars 1999

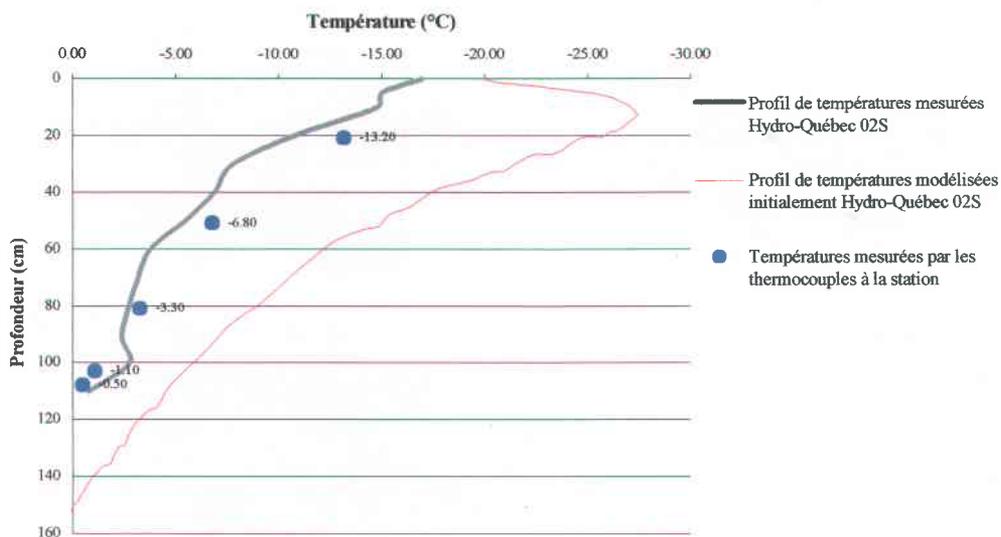


Figure A7.24 Profil de températures modélisées initialement, à l'aide du modèle CROCUS, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date du 09 mars 1999

### 7.2.2 Modélisations initiales à la station Hydro-Québec 11e

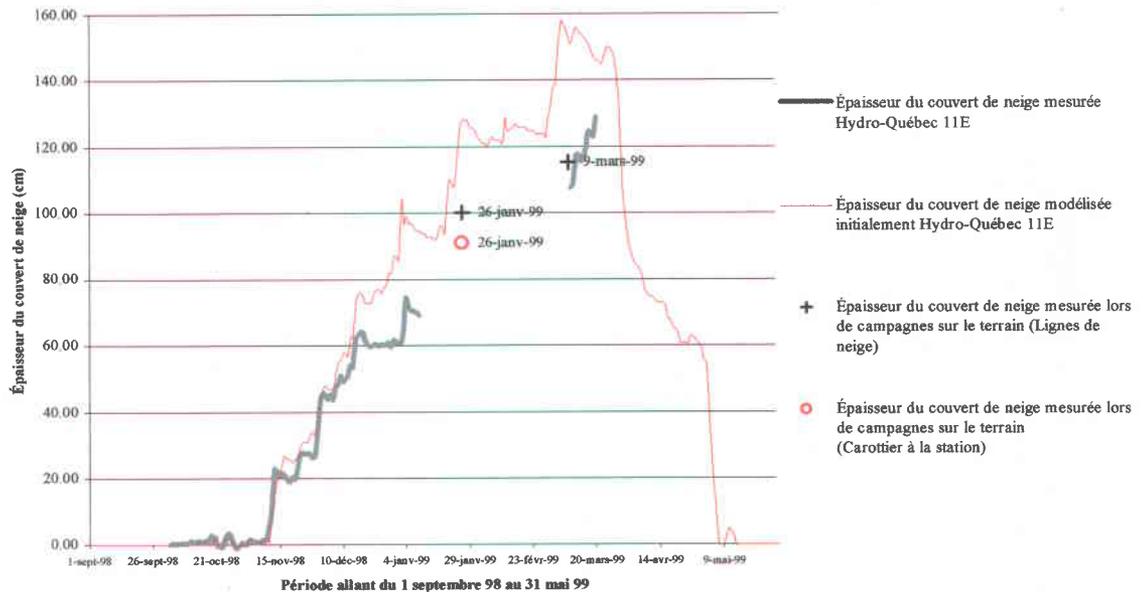


Figure A7.25 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 11e modélisée initialement à l'aide du modèle CROCUS

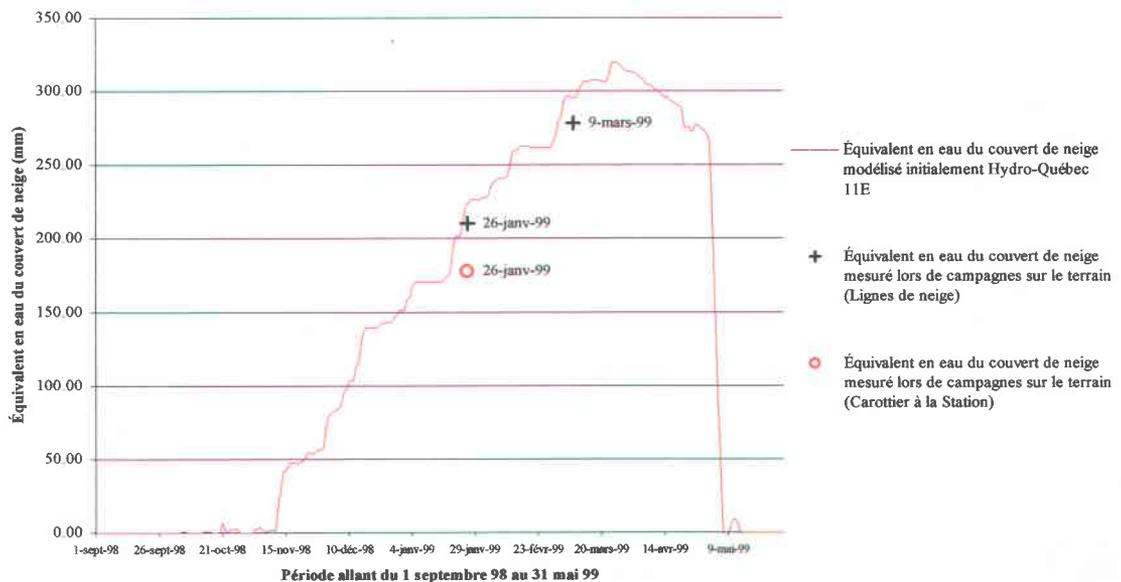


Figure A7.26 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 11e modélisé initialement à l'aide du modèle CROCUS

### 7.3 Période allant du 1 septembre 1999 au 31 mai 2000

#### 7.3.1 Modélisations initiales à la station Hydro-Québec 02s



Figure A7.27 Évolution de l'épaisseur de neige à la station Hydro-Québec 02s modélisée initialement à l'aide du modèle CROCUS

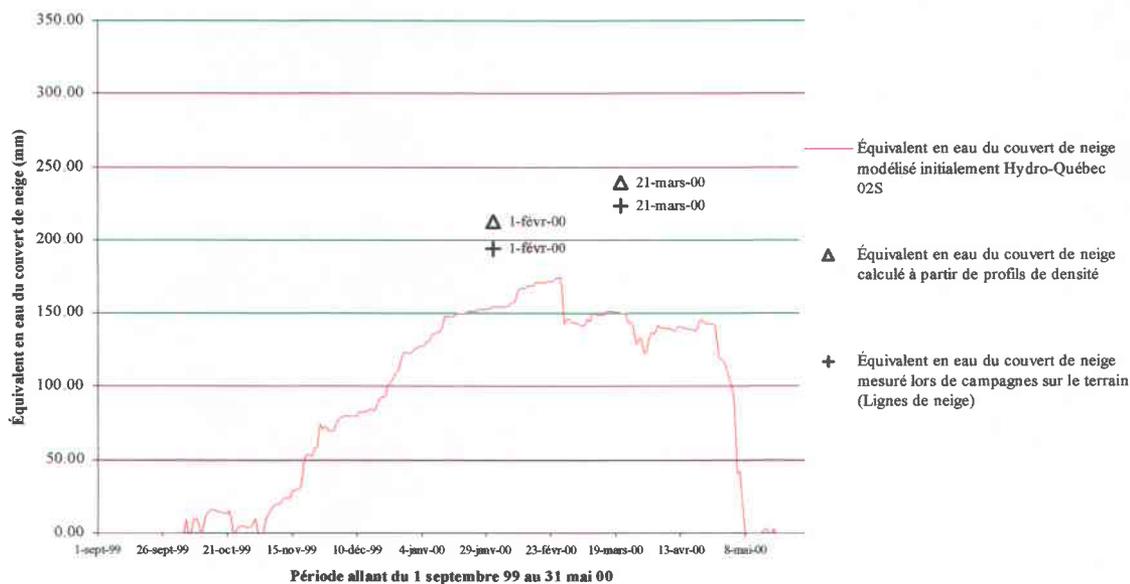


Figure A7.28 Évolution de l'équivalent en eau à la station Hydro-Québec 02s modélisé initialement à l'aide du modèle CROCUS

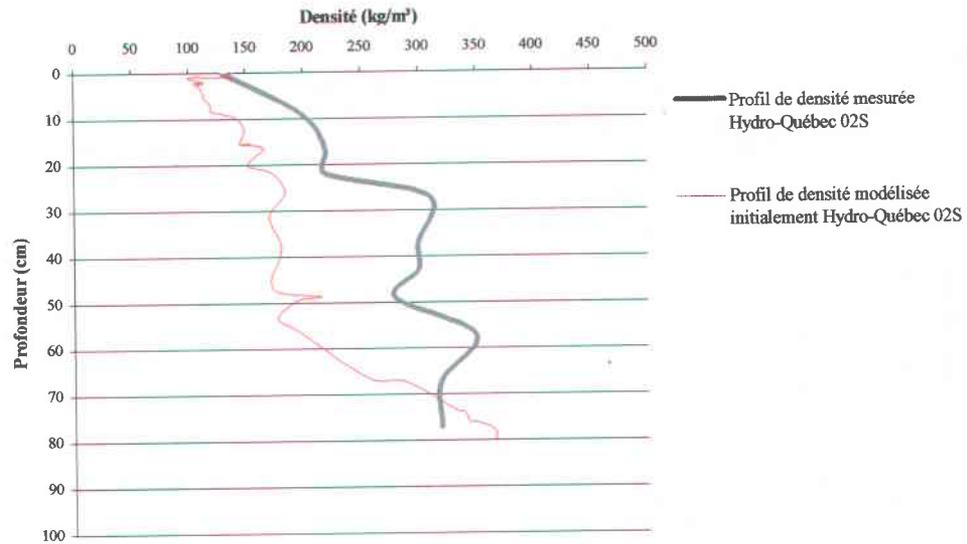


Figure A7.29 Profil de densité modélisée initialement, à l'aide du modèle CROCUS, et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 01 février 2000

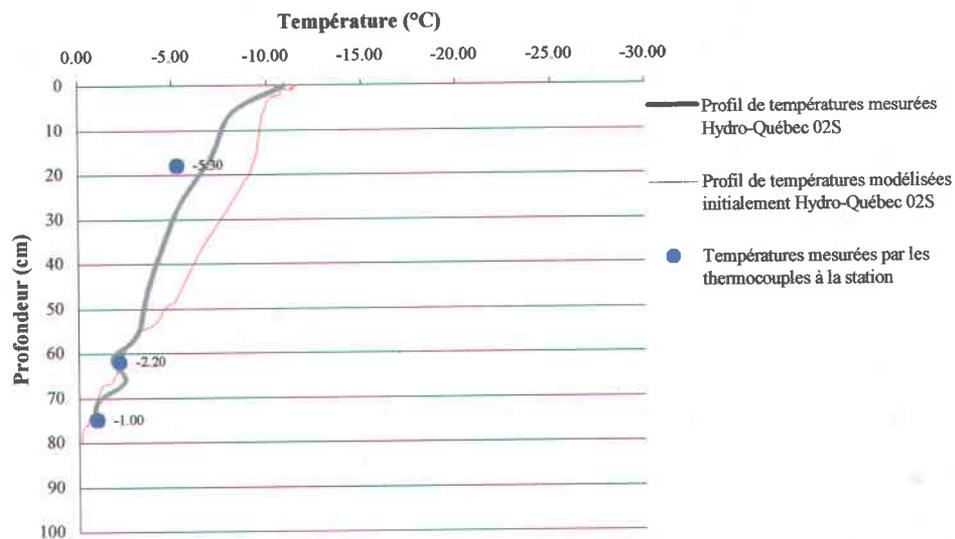


Figure A7.30 Profil de températures modélisées initialement, à l'aide du modèle CROCUS, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date du 01 février 2000

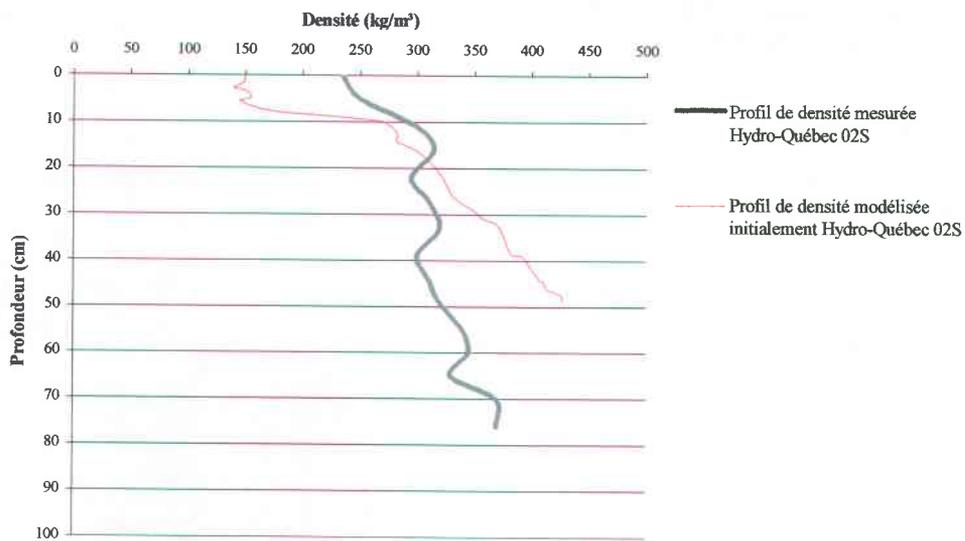


Figure A7.31 Profil de densité modélisée initialement, à l'aide du modèle CROCUS, et mesurée à la station Hydro-Québec 02s en date du 21 mars 2000

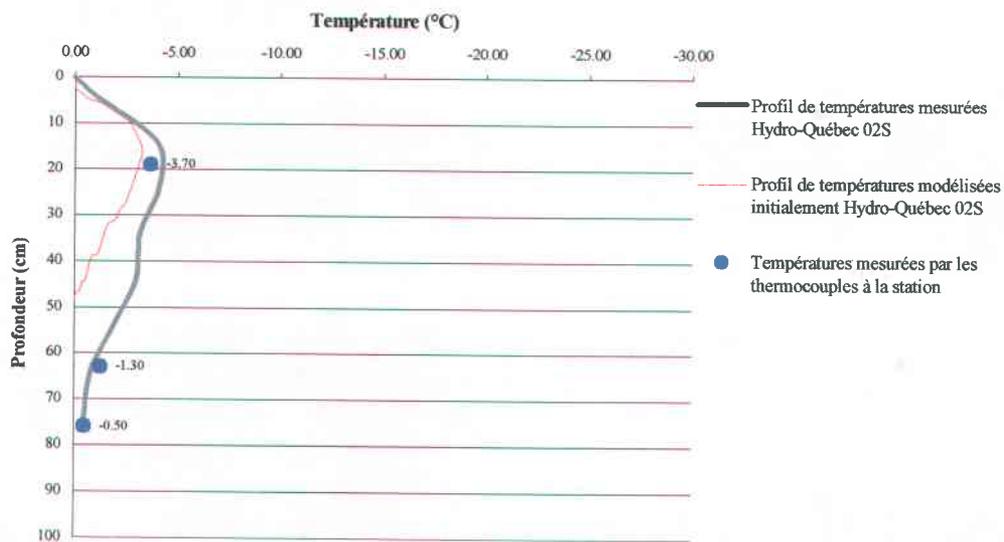


Figure A7.32 Profil de températures modélisées initialement, à l'aide du modèle CROCUS, et mesurées à la station Hydro-Québec 02s en date du 21 mars 2000