

Article

« Modélisation de l'évolution du couvert nival, sur le sous-bassin LG4 de la rivière La Grande dans le nord du Québec, à l'aide du modèle français CROCUS »

S. Savary, J. P. Fortin, M. Bernier et E. Martin

Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 17, n° 3, 2004, p. 395-417.

Pour citer cet article, utiliser l'information suivante :

URI: <http://id.erudit.org/iderudit/705540ar>

DOI: 10.7202/705540ar

Note : les règles d'écriture des références bibliographiques peuvent varier selon les différents domaines du savoir.

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter à l'URI <https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/>

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche. Érudit offre des services d'édition numérique de documents scientifiques depuis 1998.

Pour communiquer avec les responsables d'Érudit : info@erudit.org

Modélisation de l'évolution du couvert nival, sur le sous-bassin LG4 de la rivière La Grande dans le nord du Québec, à l'aide du modèle français CROCUS

Simulation of snowpack evolution, on the LG4 sub-basin of the La Grande river in northern Quebec, using the CROCUS French snow model

S. SAVARY*¹, J.-P. FORTIN², M. BERNIER³, É. MARTIN⁴

Reçu le 9 avril 2003, accepté le 4 décembre 2003**.

SUMMARY

In Quebec, snow accumulation on the ground is important for a large number of activities, including hydroelectric production. Snow being an important environmental aspect to look at for operations in cold regions, making use of adequate models able to simulate the various physical processes affecting the characteristics of the snowpack throughout the entire snow season becomes also quite important. So, the present project aims to evaluate the ability of the CROCUS French multilayer snow model to be adapted to Northern Quebec environmental conditions. The choice of the study area has been done on the basis of data availability on both the temporal evolution of the snowpack at three automatic stations and the meteorological variables necessary as input to the model. Following preprocessing of input data, the CROCUS model has been calibrated in order to evaluate his capability to simulate the temporal evolution not only of the thickness and water equivalent of the snowpack, but also of the density and temperature profiles within the pack. Given the available data, the results for both the calibration and verification periods can be considered as good and very encouraging for future applications of the CROCUS model in Québec.

Key-words : *snowpack, snowmelt, model, CROCUS, northern Québec.*

- 1 INRS-ETE, Université du Québec, 2800 rue Einstein, CP 7500, Sainte-Foy (Québec), Canada/G1V 4C7, e-mail : Stéphane_Savary@inrs-ete.quebec.ca, tél. : (418) 654-3111.
- 2 INRS-ETE, Université du Québec, 2800 rue Einstein, CP 7500, Sainte-Foy (Québec), Canada/G1V 4C7, e-mail : Jean-Pierre_Fortin@inrs-ete.quebec.ca, tél. : (418) 654-2591.
- 3 INRS-ETE, Université du Québec, 2800 rue Einstein, CP 7500, Sainte-Foy (Québec), Canada/G1V 4C7, e-mail : Monique_Bernier@inrs-ete.quebec.ca, tél. : (418) 654-2585.
- 4 Météo-France, C.N.R.M., Centre d'étude de la neige, 1441 rue de la Piscine, 38406, Saint-Martin-d'Herès, France, e-mail : Éric.Martin@meteo.fr, tél. : (+33) 04 76 63 79 01

* Correspondance. E-mail : Stéphane_Savary@inrs-ete.quebec.ca

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 avril 2005.

RÉSUMÉ

Au Québec, l'accumulation de la neige au sol prend une grande importance dans bon nombre d'activités humaines comme la production d'hydroélectricité. 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 complet du manteau neigeux par la simulation des différents processus physiques agissant sur le couvert nival. En ce sens, la présente recherche vise à évaluer la capacité d'adaptation aux conditions environnementales du Québec, du modèle français multicouches CROCUS de suivi et de fonte du couvert nival, en vue de son utilisation ultérieure. 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. Suite au prétraitement des données d'entrée, le modèle CROCUS a pu être étalonné dans le but d'évaluer ses aptitudes à simuler l'évolution de l'épaisseur et de l'équivalent en eau du couvert nival, de même que les profils de densité et de température de ce couvert. Compte tenu des données disponibles, les résultats des périodes d'étalonnage et de vérification peuvent être considérés comme très bons et très encourageants pour des applications ultérieures de CROCUS au Québec.

Mots-clés : *couvert nival, fonte, modèle, CROCUS, nord du Québec.*

1 – INTRODUCTION

Depuis un bon nombre d'années, les modèles de simulation du couvert de neige 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, le développement et l'utilisation 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. À la lumière de telles utilisations ainsi que de l'importance 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 détaillé du couvert nival de la région hydrographique du Nord du Québec où sont situés les grands complexes hydroélectriques.

Dans cette optique, l'objectif général visé est de vérifier la capacité d'adaptation aux conditions environnementales du Québec, du modèle français multicouches CROCUS de suivi et de fonte du couvert nival développé par BRUN *et al.*, (1989 et 1992), au Centre national français d'étude de la neige. De façon plus spécifique, la présente recherche vise la réalisation, à l'aide du modèle CROCUS, de simulations des caractéristiques du couvert nival à trois sites de mesures situés sur le sous-bassin LG4 de la rivière La Grande dans le nord du Québec.

Dans cet article, nous présenterons tout d'abord le modèle CROCUS. Suivront une description du secteur d'étude et des données disponibles, les modifications apportées aux variables et paramètres de CROCUS pour vérifier sa capacité d'adaptation aux conditions du Nord du Québec et finalement, les

résultats obtenus pour la simulation de l'épaisseur, de l'équivalent en eau et des profils de densité et de température du couvert de neige.

2 - CROCUS

CROCUS est un modèle multicouches et unidimensionnel de suivi du couvert nival développé pour l'étude de la neige et la prévision du risque d'avalanche. Celui-ci simule donc la plupart des processus affectant l'évolution du manteau neigeux en utilisant des méthodes basées sur la physique. Les principaux processus physiques présentés à la figure 1 et pris en compte par le modèle CROCUS sont : la diffusion de chaleur et la percolation de l'eau liquide à l'intérieur du manteau neigeux ; la fonte et le regel dans les couches internes et superficielles du manteau neigeux ; le tassement des couches de neige ; l'absorption par le manteau neigeux du rayonnement solaire direct, diffus et infrarouge ; les échanges turbulents entre la surface de neige et l'atmosphère ; les échanges de chaleur entre le sol et le manteau neigeux et la métamorphose de la taille et du type des grains composant chacune des couches de neige (BRUN et MARTIN, 1997). À partir des processus énoncés, CROCUS permet de simuler l'évolution temporelle des caractéristiques de chaque couche du manteau neigeux (épaisseur, équivalent en eau, densité, température, taille et type des grains) (BRUN *et al.*, 1989, 1992).

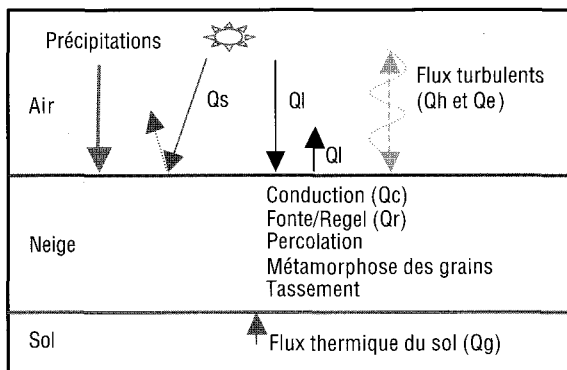


Figure 1 Processus physiques de neige pris en compte par le modèle CROCUS.
Physical process treated by the CROCUS model.

Dans la figure 1, Q_s représente le rayonnement de courtes longueurs d'ondes (solaire direct et diffus) alors que Q_l représente le rayonnement de grandes longueurs d'ondes (infrarouge).

Le modèle a besoin, en entrée, de l'évolution des conditions météorologiques au pas de temps horaire incluant la température et l'humidité de l'air, la

vitesse du vent, les précipitations (quantité et phase), le rayonnement solaire, direct et diffus, le rayonnement infrarouge et la nébulosité. Le modèle nécessite également en entrée le profil initial du manteau neigeux, lorsqu'il y a de la neige au sol au début de la période de simulation. En sortie, on obtient l'évolution temporelle complète des caractéristiques de chaque couche du couvert de neige, de l'écoulement à sa base, ainsi que de la température et des flux à sa surface.

Bien que l'on dénote un nombre considérable d'études contribuant à la validation du modèle CROCUS, notamment sur plusieurs sites répartis dans les Alpes françaises (BRUN *et al.*, 1989, 1992), son utilisation au Québec demeure à notre connaissance très restreinte. De plus, les conditions de modélisation du couvert de neige dans la région du Nord Québécois diffèrent grandement de celles des Alpes françaises. En ce sens, contrairement aux sites français de faibles superficies et situés sur des secteurs montagneux à fortes pentes, la région du Nord Québécois couvre une très large superficie et présente un relief onduleux d'amplitude relativement faible. Également, la présence d'hivers plus longs, froids et rigoureux sur le sous-bassin de la rivière La Grande entraîne des changements notables des caractéristiques du couvert de neige notamment sur l'épaisseur, la densité et la température du manteau neigeux ainsi que sur la taille et le type de grains constituant chacune des couches de neige.

3 – DESCRIPTION DU SECTEUR D'ÉTUDE ET DES DONNÉES DISPONIBLES

3.1 Secteur d'étude

Le secteur d'étude est situé dans la province de Québec au Canada, plus particulièrement sur le sous-bassin hydrographique LG4 de la rivière La Grande (figure 2). Ce sous-bassin se trouve dans la région climatique dite continentale froide de type subarctique (tableau 1). Il s'agit donc d'une région de transition entre la taïga et la toundra dominée par une forêt ouverte d'épinettes noires, de brûlis et de tourbières (BERNIER *et al.*, 1999).

Tableau 1 Paramètres climatologiques moyens du sous-bassin LG4.

Table 1 Mean climatological parameter of LG4 sub-watershed.

Paramètres climatologiques	Sous-bassin LG4
Température moyenne annuelle	-3,8° C
Précipitations moyennes annuelles	765 mm
Épaisseur moyenne du couvert de neige	100 cm
Densité moyenne du couvert de neige	250 kg/m ³

Le secteur d'étude du sous-bassin LG4 (figure 2) comporte trois stations automatiques d'acquisition de données sur le couvert nival (HQ 02s, 11e et 19e), où seront effectuées les simulations. Sont aussi présentes, deux stations

météorologiques d'Hydro-Québec (LG4-Sud et LG4-Est) et également, une station météorologique régionale située à l'aéroport de LG4 (YAH). De plus, des relevés du couvert de neige (carottage, profils) sont disponibles à deux reprises lors des périodes hivernales.

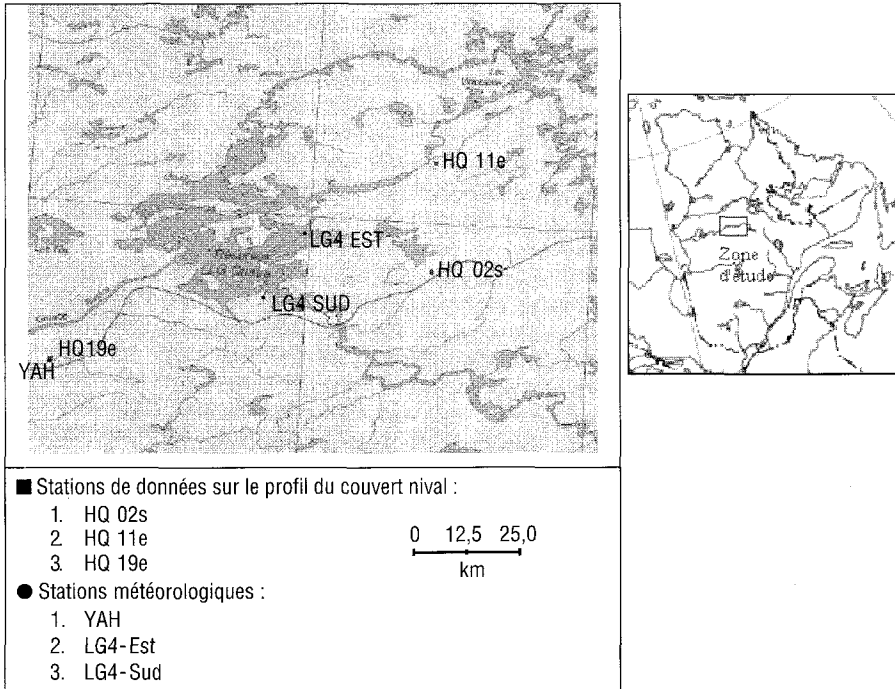


Figure 2 Site d'étude.
Research site.

3.2 Données disponibles

Le suivi du couvert nival a été effectué sur trois périodes hivernales successives pour lesquelles les données nécessaires à l'étalonnage du modèle ou encore à la vérification des simulations étaient disponibles. Ces périodes s'étendent du 1^{er} septembre 1997 au 31 mai 1998, du 1^{er} septembre 1998 au 31 mai 1999 et du 1^{er} septembre 1999 au 31 mai 2000. Le tableau 2 présente une description détaillée des données de modélisation et de validation disponibles aux différents sites de mesures et de simulations.

Il est à noter que les mesures ponctuelles d'équivalent en eau et d'épaisseur du couvert nival sont effectuées sur des lignes de neige à proximité des stations HQ 02s, 11e et 19e.

Tableau 2 Données de modélisation et de validation disponibles aux différents sites de mesures et de simulations.

Table 2 *Simulation and validation data available for the different measurements and simulation sites*

		YAH	LG4-Sud	LG4-Est	HQ 02s	HQ 11e ¹	HQ 19e ²
Données d'entrée du modèle	Données météorologiques						
	Température de l'air (°C)	v			v	v	v
	Vitesse du vent (m/s)	v					
	Précipitations (mm)	v	v	v			
	Type de précipitations	v					
	Nébulosité (%)	v					
Données de validation	Données en continues						
	Épaisseur de neige (cm) (Sonde ultrasonique)				v	v	v
	Température du couvert de neige (°C) (Thermocouples 0, 5, 13, 27, 57, 87cm)				v	v	v
	Données ponctuelles						
	Épaisseur de neige (cm)				v	v	v
	Équivalent en eau (mm)				v	v	v
	Profils de densité (kg/m ³)				v	v	v
Profils de températures (°C)				v	v	v	

1 Les données à la station Hydro-Québec 11e sont disponibles seulement pour les deux premières périodes hivernales

2 Les données à la station Hydro-Québec 19e sont disponibles uniquement pour la première période hivernale

4 – PRÉTRAITEMENT DES DONNÉES ET MÉTHODOLOGIE

L'objectif du prétraitement des données est de faire le calcul, l'ajustement et la mise en forme de l'ensemble des paramètres au pas de temps horaire exigé par le modèle aux trois sites de simulation (HQ 02s, 11e, 19e).

Dans un premier temps, une étude statistique simple évaluant la disparité des moyennes journalières de températures aux n stations disponibles a permis de cibler précisément les données aberrantes de température et de les corriger. Par la suite, nous avons complété 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.

Les données de précipitation mesurées à la station de référence YAH couvrent la totalité des périodes hivernales et seront utilisées dans l'étude. Toutefois, il est sensé de croire à l'occurrence de précipitations solides le même jour aux autres stations du secteur (LG4-Sud et Est), bien que l'épaisseur des chutes de neige puisse varier d'une station à l'autre. Par contre, une étude comparative des données de précipitations totales journalières cumulées entre

les différentes stations de mesures nous a permis de constater un mauvais fonctionnement des stations LG4-Sud et Est pour un nombre important de dates. Par conséquent, seules les données de la station LG4-Sud, pour la période hivernale comprise entre le 1^{er} septembre 1997 et le 31 mai 1998 sont comparables aux données de la station de référence YAH (figure 3).

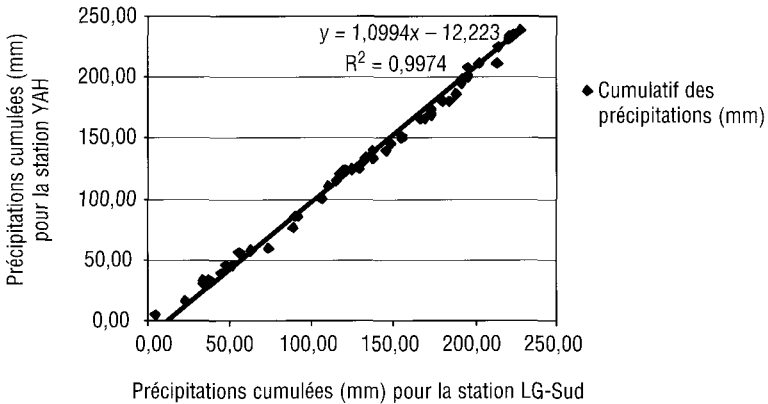


Figure 3 Précipitations cumulées pour les stations LG4-Sud et YAH pour la période allant du 1^{er} septembre 1997 au 31 mai 1998.

Total precipitations amounts at the LG4-Sud and YAH stations from the 1st of september 1997 to the 31st of May 1998 period.

Il est clairement reconnu que les mesures de précipitations solides effectuées à l'aide de précipitomètres sous-estiment les hauteurs de précipitations réelles (GOODISON *et al.*, 1998). 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 correction des précipitations utilisées dans le cadre de cette recherche sont les suivantes :

1. Pour des précipitations solides :

$$CN = 100 - 0.44 * Ws^2 - 1.98 * Ws \quad (1)$$

2. Pour des précipitations mixtes :

$$CN = 97.29 - 3.18 * Ws + 0.58 * Tmax - 0.67 * Tmin \quad (2)$$

Dans ces équations, Ws représente la vitesse du vent (m/s), $Tmax$ la température journalière maximale de l'air (°C), $Tmin$ la température journalière minimale de l'air (°C) et CN le ratio entre la hauteur de précipitations mesurées et la hauteur réelle de précipitations (GOODISON *et al.*, 1998). Dans le cadre de cette recherche, la hauteur à laquelle le vent est mesuré à la station YAH (10 m) diffère de celle de l'orifice du précipitomètre de cette station et de celle de LG4-Sud (1,50 m). La littérature propose bon nombre de profils de vent au-dessus de différentes surfaces. Ceux-ci suggèrent une relation logarithmique entre la vitesse du vent à la hauteur de mesure (10 m) et la vitesse à la hauteur désirée (1,50 m) au-dessus de la surface, basée sur la rugosité du site et la vitesse de friction (BRUTSAERT, 1984). En relation avec de tels modèles, la vitesse du vent

à 1,5 m est plus faible d'environ 2,0 m/s par rapport à celle mesurée à 10 m. Une telle diminution affecte donc directement la correction des précipitations (Eq. 4 et 5) pour la station YAH. Ces précipitations corrigées seront directement utilisées aux sites de simulation HQ 19e, voisin de la station YAH. Par contre, en raison de la distance importante qui sépare ces derniers des sites de modélisation HQ 02s et HQ 11e (> 90 km), de l'augmentation non négligeable de l'altitude entre ces sites (> 60 m), de la faible rugosité de ces sites, de la présence de forêts ouvertes de faible densité offrant peu de résistance au vent, une utilisation des vitesses de vent mesurées à 10 m à la station YAH a été considérée plus conforme pour la correction des précipitations. Ces valeurs ainsi corrigées permettent également de meilleures simulation de l'épaisseur du couvert de neige et de l'équivalent en eau à ces stations.

5 – ÉTALONNAGE DU MODÈLE CROCUS

Suite au prétraitement des données météorologiques les données d'entrées (provenance) du modèle CROCUS et leur application aux stations HQ 02s, 11e et 19e peuvent être décrites selon les points suivants :

1. Pour l'ensemble des périodes hivernales, les données de température sont mesurées directement aux stations de modélisations HQ 02s, 11e 19e.

2. La totalité des mesures de vitesse de vent à 10 m, de type de précipitations et de nébulosité proviennent de la station YAH.

3. L'humidité de l'air est calculée à partir de la température de l'air mesurée aux stations de modélisation et de celle du point de rosée disponible à la station YAH.

4. Les données de précipitations utilisées dans le cadre de cette étude proviennent en grande partie des mesures journalières effectuées à la station YAH sauf pour la période de modélisation comprise entre le 1^{er} septembre 1997 et le 31 mai 1998 où les modélisations effectuées aux stations HQ 02s et 11e intègrent les mesures journalières de précipitations disponibles à la station LG4-Sud.

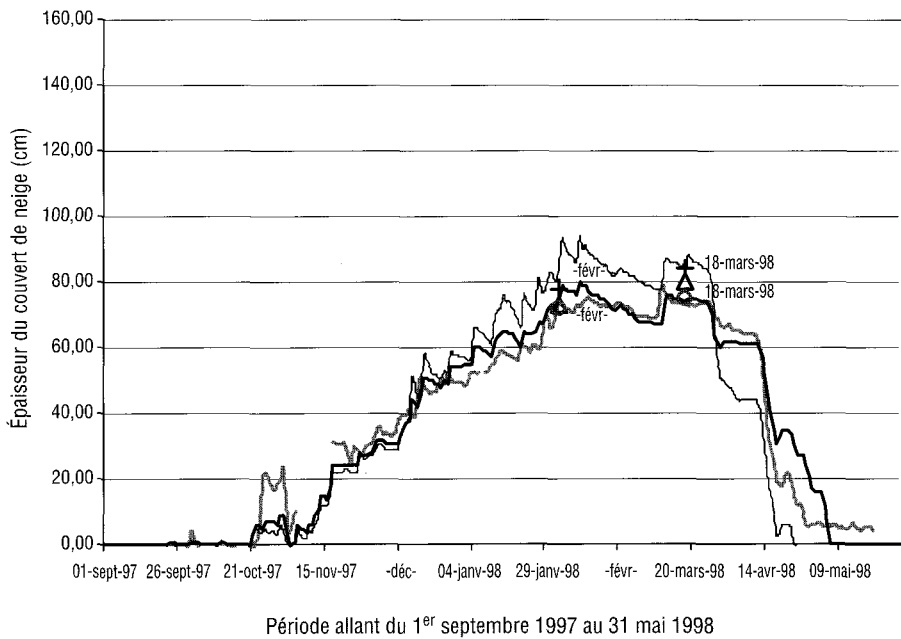
5. Les rayonnements solaires direct, diffus et infrarouge sont calculés à partir d'algorithmes fournis avec le modèle CROCUS. Ceux-ci font appel aux données d'entrées de nébulosité mesurée à la station YAH, de température de l'air mesurée directement aux stations de modélisations et d'humidité calculée précédemment.

6. La neige au sol est mesurée aux stations HQ 02s, 11e 19e et sa valeur est nulle au début de chaque période de modélisation.

5.1 Résultats initiaux

Il est à noter que l'utilisation du critère numérique de Nash-Sutcliffe a permis de quantifier la qualité des modélisations de l'épaisseur du couvert de neige puisque contrairement aux mesures ponctuelles d'équivalent en eau et de densité du couvert nous disposons de cette mesure en continue. Une première simulation de l'évolution temporelle du couvert de neige à la station HQ 02s a été

tentée pour l'hiver 1997-1998 sans aucune modification des équations ou des valeurs initiales des paramètres du modèle CROCUS. Comme on peut le constater sur la figure 4, l'épaisseur du couvert de neige simulée est trop importante au cours de la période d'accumulation, c'est-à-dire entre le 10 décembre 1997 et le 10 février 1998. D'ailleurs, la valeur du coefficient de Nash-Sutcliffe est relativement faible (0,85). De plus, on constate des fluctuations de l'épaisseur du manteau neigeux, reliées aux chutes de neige et au tassement successif du couvert, nettement plus importantes que celles qui ont été mesurées, tout au long de la période d'accumulation. Enfin, la période de fonte est trop rapide conduisant à des épaisseurs simulées nettement inférieures à celles qui ont été mesurées.

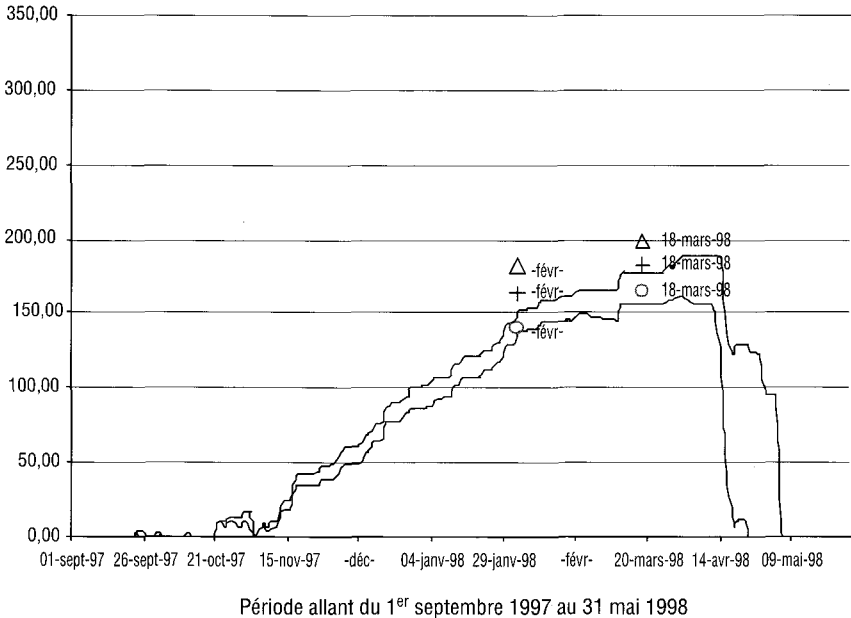


- Épaisseur du couvert de neige mesurée HQ 02S
- Épaisseur du couvert de neige modélisée initialement HQ 02S
- Épaisseur du couvert de neige modélisée après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée HQ 02S
- ▲ Épaisseur du couvert de neige mesurée lors de campagnes sur le terrain (Fosses)
- + Épaisseur du couvert de neige mesurée lors de campagnes sur le terrain (Lignes de neige)
- Épaisseur du couvert de neige mesurée lors de campagnes sur le terrain (Carottier à la station)

Figure 4 Évolution de l'épaisseur de neige à la station HQ 02s pour la période allant du 1^{er} septembre 1997 au 31 mai 1998.

Snow depth evolution at the HQ 02s station from the 1st of september 1997 to the 31st of may 1998.

L'équivalent en eau du couvert (figure 5) demeure, quant à lui, inférieur aux valeurs des lignes de neige prises sur le site environnant la station ou encore calculées à partir des profils de densité déterminés à proximité de la station.

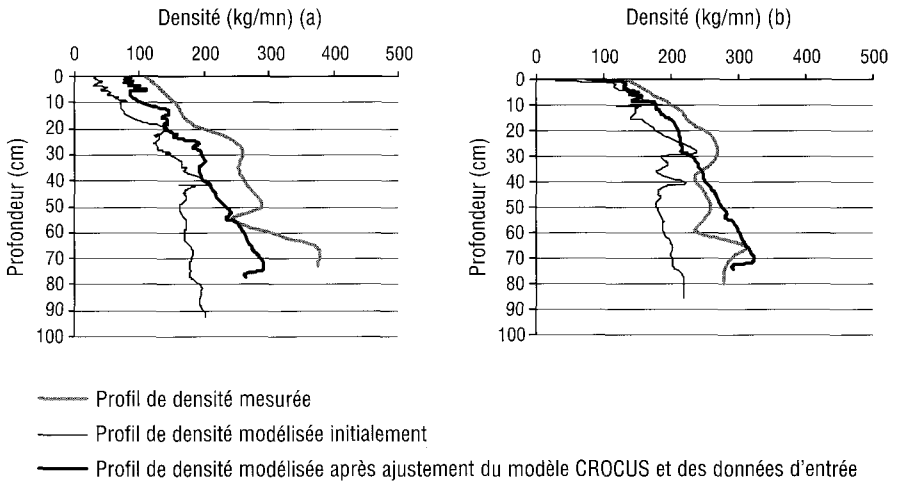


- Équivalent en eau du couvert de neige modélisé initialement HQ 02S
- - - Équivalent en eau du couvert de neige modélisé après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée HQ 02S
- △ Équivalent en eau du couvert de neige calculé à partir de profils de densité
- + Équivalent en eau du couvert de neige mesuré lors de campagnes sur le terrain (Lignes de neige)
- Équivalent en eau du couvert de neige mesuré lors de campagnes sur le terrain (Carottier à la Station)

Figure 5 Évolution de l'équivalent en eau à la station HQ 02s pour la période allant du 1^{er} septembre 1997 au 31 mai 1998.

Snow water equivalent evolution at the HQ 02s station from the 1st of September 1997 to the 31st of May 1998.

Il n'est pas étonnant, alors, de constater que les profils de densités modélisées sous-estiment nettement les densités mesurées lors des deux campagnes de terrain de l'hiver 1997-1998 (figure 6). Quant aux températures, elles sont beaucoup plus froides que celles qui ont été observées lors des deux visites sur le terrain en février et mars 1998 (figure 7).



Figures 6 Profils de densités modélisées et mesurées à la station HQ 02s en date du 3 février 1998 (14 h 30) (a) et du 18 mars 1998 (9 h 30) (b).
Simulated and measured density profiles at the HQ 02s station on the 3rd of february 1998 (14 h 30) (a) and the 18th of march 1998 (9 h 30) (b).

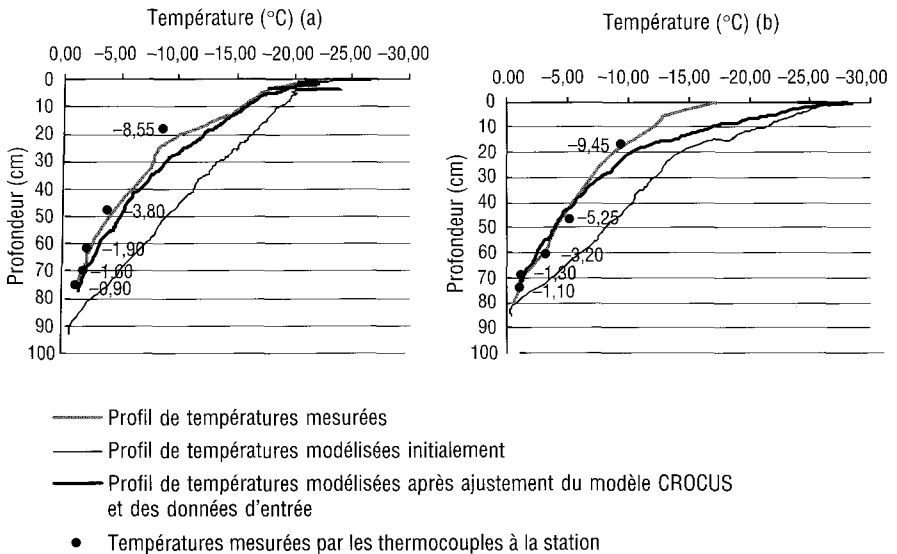
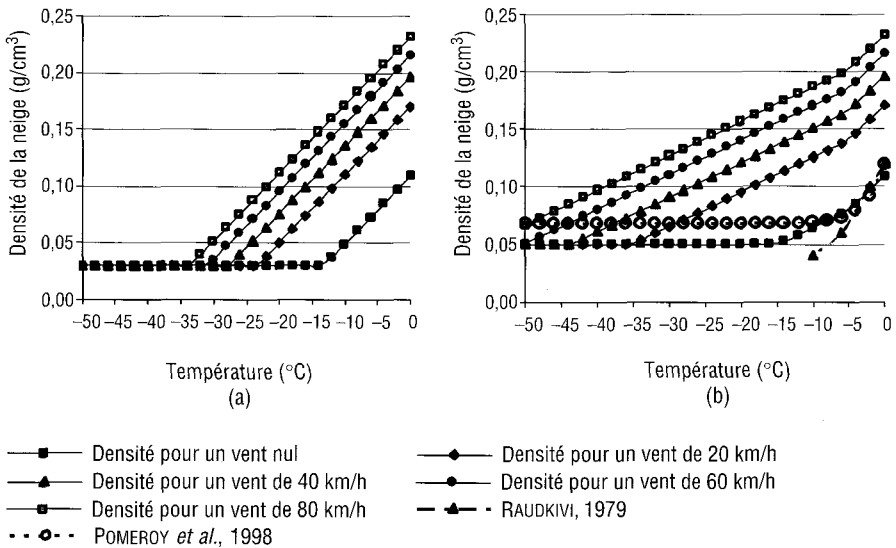


Figure 7 Profils de températures modélisées et mesurées à la station HQ 02s en date du 3 février 1998 (14 h 30) (a) et du 18 mars 1998 (9 h 30) (b).
Simulated and measured temperatures profiles at the HQ 02s station on the 3rd of february 1998 (14 h 30) (a) and the 18th of march (9 h 30) 1998 (b).

Des résultats similaires ayant été obtenus aux autres stations, il était clair que certains ajustements devaient être apportés au modèle pour obtenir de meilleures simulations des caractéristiques du couvert nival, ce qui est normal en modélisation. Cet étalonnage a été effectué à l'aide des mesures effectuées à la station HQ 02s qui présente un suivi soutenu et rigoureux du couvert de neige pour les trois périodes hivernales modélisées. En pratique, il a été suffisant de n'utiliser que la première année de données à cette station pour réaliser l'étalonnage du modèle, ce qui a permis de conserver les autres données à cette station et aux stations HQ 11e et 19e comme vérification des résultats de l'étalonnage.

5.2 Ajustement du calcul de la densité de la neige fraîche et du tassement du couvert nival

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 et caractérisés par des températures plus douces (ESSERY *et al.*, 1999). Toutefois, les processus de transport et de densification de la neige par le vent, qui ne sont pas pris en compte par le modèle CROCUS, peuvent grandement affecter l'évolution du couvert de neige sur des sites exposés au vent. Par conséquent, la densité initiale en milieu subarctique (sous-bassin LG4) exposé à la fois à de forts vents et à des températures plus froides, est souvent plus grande que celle prévue à partir des mesures françaises. La figure 8a présente les courbes CROCUS en fonction de la température et du vent.



Figures 8 Représentation graphique de l'estimation originale (a) et modifiée (b) de la densité de la neige fraîche effectuée par CROCUS en fonction de la température et du vent.

Graphic representation of the original (a) and modified (b) fresh snow density estimation by CROCUS, based on air temperature and wind speed.

On constate que, pour un vent constant, les valeurs de densité de la neige fraîche se situent sur une droite qui est fonction de la température et dont la pente et l'ordonnée à l'origine correspondent à des coefficients d'ajustement de la densité qui peuvent être modifiés. Considérant que, pour des températures supérieures à $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, les densités simulées étaient acceptables, nous avons décidé de modifier l'équation initiale, qui relie la densité à la température pour un vent constant, afin d'augmenter la densité de la neige fraîche uniquement pour les températures inférieures à ce seuil. Ces modifications s'accordent avec la littérature qui mentionne que dans la plupart des régions du Canada, la densité de la neige fraîche varie entre $0,05\text{ g/cm}^3$ en présence de température froide et de neige sèche et $0,12\text{ g/cm}^3$ pour des conditions de neige humide et des températures plus chaudes (POMEROY et GRAY, 1995).

Comme on peut le constater sur la figure 8b, pour des températures supérieures à $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, l'équation utilisée reste la même. Toutefois, pour des températures inférieures à $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, l'équation du calcul de la densité de la neige fraîche est modifiée afin d'assurer l'obtention de densités plus élevées pour des températures plus froides. Le seuil de densité minimale de la neige fraîche est aussi augmenté à $0,05\text{ g/cm}^3$ pour ainsi limiter de façon plus importante la présence de valeurs trop faibles de densité, rarement rencontrées en région nordique exposée au vent. De plus, 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. Malgré l'absence de mesures directes de densité de neige fraîche sur le sous-bassin LG4 de la rivière La Grande, il est possible de noter que 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 (LANGHAM, 1981) et HEDSTROM et POMEROY, 1998 bien que cette dernière présente un seuil plus élevé.

En ce qui a trait à l'évolution temporelle de la densité du couvert nival, certaines études présentent des problèmes similaires de sous-estimation systématique de la densité de la neige dans le cadre de modélisations en milieu polaire. Cette sous-estimation peut être attribuée à la prédominance de températures relativement froides en surface qui limitent le calcul du tassement par le modèle et occasionnent un tassement trop faible et une mauvaise densification de la neige (BRUN et MARTIN, 1997). De plus, il est important de rappeler que le modèle CROCUS ne traite pas des processus de densification de la neige par le vent qui peuvent influencer l'évolution du couvert nival pour des sites ventés tel que les stations HQ 02s, 11e et 19e. Afin de rectifier cette sous-estimation face aux conditions météorologiques des différents sites, le calcul du tassement mécanique utilisé par CROCUS a été augmenté. Plus précisément, CROCUS considère la neige comme un fluide newtonien et 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 (BRUN *et al.*, 1989). L'unique modification apportée au calcul du tassement mécanique repose sur la modification d'un paramètre intégré au test permettant l'augmentation de la viscosité en présence de grains facettés dans les différentes couches constituant le profil de la neige. Il est à noter que de 50 à 70 % des différents profils de neige rencontrés en milieu nordique sont constitués de grains facettés dont la présence influence grandement la viscosité des couches de neige. Plus précisément, le diamètre minimal des grains fins initialement imposé à ce test est de $0,4\text{ mm}$.

Toutefois, cette valeur demeure trop restrictive pour des sites nordiques où le diamètre des grains fins peut prendre des valeurs aussi faibles que 0,1 à 0,2 mm. En ce sens, le diamètre minimal des grains fins a été abaissé à 0,15mm dans le but de répondre à la présence de grains fins facettés de très faible diamètre et par le fait même de diminuer la viscosité des couches de neige qu'ils constituent. Une telle diminution de la viscosité a pour conséquence d'augmenter le tassement des couches de neige constituées de grains facettés.

5.3 Ajustement de la fonte printanière

Tel que mentionné précédemment, l'évolution de l'épaisseur du couvert présente une fonte printanière à la fois trop hâtive et trop rapide (figure 4). Il est, par ailleurs, assez difficile de cibler un seul processus physique 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 courtes longueurs d'ondes absorbées 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.

Divers essais de modification des paramètres du modèle reliés aux divers processus énoncés plus haut ont toutefois permis de constater que la modification des transferts convectifs de chaleur sensible à l'interface neige-air semblait représenter un juste compromis, puisque ce processus gagne en importance lors de période de réchauffement et n'affecte pas la période froide, contrairement à d'autres processus dont l'effet est ressenti sur l'ensemble de la période hivernale. Pour la détermination des flux turbulents, CROCUS fait appel, entre autres, à des coefficients empiriques introduits pour la linéarisation des échanges turbulents. Il est à noter que ces coefficients peuvent être ajustés expérimentalement pour un site donné (BRUN *et al.*, 1989). En ce sens, les valeurs attribuées à ces coefficients résultent d'études comme celles menées, au Col-de-Porte en France par MARTIN et LEJEUNE (1998) sur les flux turbulents au-dessus de la surface du couvert de neige, pour des conditions météorologiques propres à des sites montagneux caractérisés par une plus faible exposition aux vents. Toutefois, aucune étude partageant ces objectifs n'a été menée, jusqu'à présent, sur le sous-bassin LG4 de la rivière La Grande. Ainsi, les modifications apportées aux modèles CROCUS s'accordent avec les caractéristiques physiques et les conditions météorologiques du secteur d'étude. Comme l'exposition du secteur d'étude aux vents est susceptible d'occasionner une diminution de la rugosité des sites, il est logique de proposer un coefficient plus faible (MARTIN et LEJEUNE, 1998). De meilleurs résultats sont ainsi obtenus en abaissant le coefficient de rugosité du site de $7.4E-07$ à $3.7E-07$.

5.4 Résultats après étalonnage

Après étalonnage, les résultats obtenus à la station HQ 02s pour l'hiver 1997-1998 présentent en général une bonne qualité. L'épaisseur du couvert de neige modélisée (figure 4) respecte assez fidèlement, tout au cours de la période d'accumulation, celle mesurée en continue à la station et lors des campagnes sur le terrain, alors qu'une légère sous-estimation suivi d'une surestimation de l'épaisseur est notée lors de la période de fonte. D'ailleurs, l'erreur absolue moyenne est de 4,50 cm alors que le coefficient de Nash-Sutcliffe est de 0,95. Ces résultats démontrent que, suite à l'étalonnage, le modèle est maintenant apte à mieux simuler l'ajout de neige fraîche et le tassement général de l'ensemble du couvert nival. L'équivalent en eau du couvert de neige modélisé (figure 5) s'approche grandement des valeurs des lignes de neige qui sont jugées représentatives du secteur de la station HQ 02s. De plus, ces résultats témoignent de la validité des données de précipitations utilisées à cette station au cours de cette période.

Quant aux profils de densités modélisées (figure 6), on observe un rapprochement net entre les deux courbes, mais les valeurs simulées sous-estiment encore les valeurs mesurées, tout en présentant des gradients comparables à ceux mesurés. Une telle sous-estimation peut être causée par l'équivalent en eau du couvert de neige modélisé qui est quelque peu inférieur aux valeurs estimées à partir des profils de densités mesurées sur le terrain, surtout en janvier. Pour l'ensemble des deux dates, l'erreur relative moyenne est de 18,04 % et l'erreur absolue moyenne est 42,18 kg/m³. En ce qui a trait aux températures (figure 7), le profil du 3 février 1998 est très bien simulé. Le 18 mars, les températures observées sont aussi très bien simulées à des profondeurs plus grandes que 40 cm, mais le profil simulé devient de plus en plus froid par rapport au profil observé à mesure que l'on s'approche de la surface. Ainsi pour cette date, l'erreur relative moyenne et l'erreur absolue moyenne sont respectivement de 35,15 % ou 4,18 °C pour les couches de neige en surface et de 12,35 % ou 0,35 °C pour les couches de neige profonde. Cette erreur peut être en partie attribuée aux valeurs de rayonnement solaire direct diffus et infrarouge qui sont calculées à partir d'algorithmes fournis avec le modèle CROCUS. Ceux-ci font appel, entre autre aux données d'entrées de nébulosité mesurée à la station YAH, de température de l'air mesurée directement aux stations de modélisations et d'humidité calculée précédemment. En raison de la forte distance séparant la station HQ 02s et YAH et du déplacement des masses nuageuses, il est raisonnable d'affirmer que la nébulosité peut être différente entre ces deux sites. Cette même différence affecte à la fois le calcul des rayonnements et le bilan énergétique à la surface et peut engendrer une sous-estimation notable de la température à la surface du couvert de neige notamment lors de conditions dites de ciel clair mesurées à la station YAH.

6 – VÉRIFICATION DE L'ÉTALONNAGE

Après avoir étalonné le modèle CROCUS dans le nord du Québec en procédant aux modifications décrites précédemment, il est approprié d'effectuer une

vérification de cet étalonnage aux stations HQ 02s, 11e et 19e pour l'ensemble des périodes hivernales, dans le but d'évaluer la qualité finale des modélisations (SAVARY, 2002).

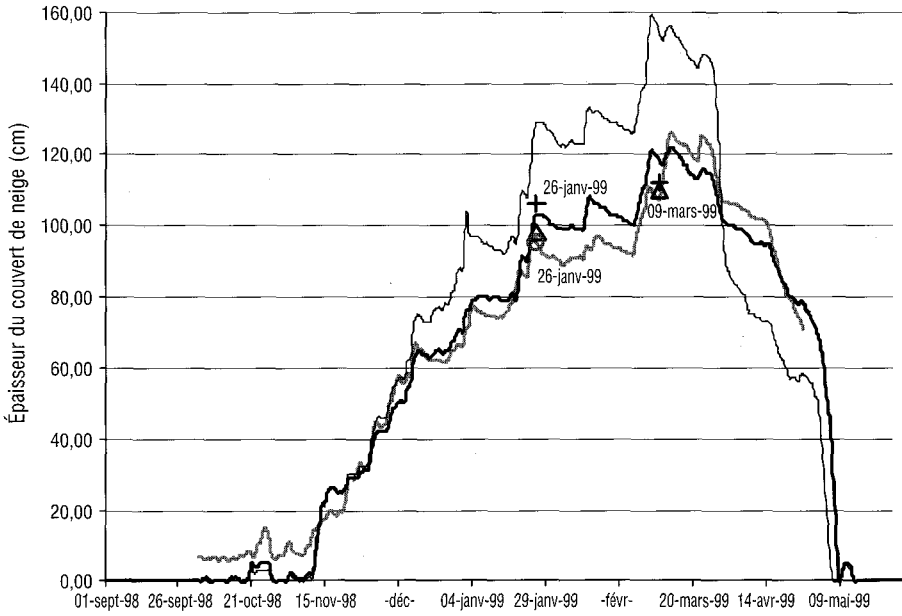
6.1 Période allant du 1^{er} septembre 1998 au 31 mai 1999 à la station HQ 02s

Pour cette période, les précipitations semblent présenter une très grande variabilité régionale. Par conséquent, étant donné la distance séparant le site de référence YAH et les sites de modélisation HQ 02s et 11e, il a été nécessaire de modifier la valeur du coefficient d'ajustement régional utilisé par le modèle CROCUS pour cette période, soit en l'abaissant de 1,00 à 0,90. L'abaissement de ce facteur multiplicatif, qui a pour effet de diminuer de 10 % les données de précipitations, a été déterminé en comparant les quelques données de précipitations disponibles à la station LG4-Sud avec celles de la station YAH, dans le but d'obtenir une meilleure modélisation de l'épaisseur et de l'équivalent en eau du couvert de neige au station HQ 02s et 11e.

Tout comme à l'hiver 1997-1998, on obtient pour l'hiver 1998-1999, de meilleurs résultats après étalonnage du modèle. La qualité des résultats obtenus à la station HQ 02s pour cette période (figures 9 à 12) est très comparable à celle atteinte à cette même station lors de la période précédente. L'épaisseur modélisée du couvert de neige (figure 9) respecte assez bien 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 peut être attribué à une surestimation de la chute de neige à la station HQ 02s. Toutefois, l'erreur absolue moyenne de 5.65 cm demeure assez faible alors que le coefficient de Nash-Sutcliffe est de 0.97. L'équivalent en eau du couvert de neige modélisé (figure 10) présente des valeurs qui sont quelque peu supérieures à celles des lignes de neige qui sont jugées représentatives du secteur de la station HQ 02s. Malgré cette légère différence, l'évolution de l'équivalent en eau demeure acceptable puisque les valeurs simulées passent à l'intérieur de l'intervalle de celles mesurées. Ainsi, ces résultats témoignent de la validité de l'utilisation et de l'ajustement pour la présente station, des données de précipitation provenant de la station YAH.

Les profils de densités modélisées (figure 11) se rapprochent aussi de ceux mesurés sur le terrain. En ce sens, l'erreur relative moyenne est de 18,36 % et l'erreur absolue moyenne est 45,65 kg/m³. Il est à noter qu'en date du 26 janvier 1999 (figure 11a), le modèle sous-estime les densités mesurées de 48.39 kg/m³ en moyenne entre 0 et 80 cm de profondeur alors que, pour les couches les plus profondes, le modèle surestime légèrement de 10,97 kg/m³ en moyenne les densités mesurées. Pour le 9 mars 1999, il y a une sous-estimation d'environ 50 kg/m³ en moyenne, sur pratiquement la totalité de l'épaisseur du couvert de neige (figure 11b). Une part de cette sous-estimation peut être attribuée à des phénomènes qui ne sont pas traités par le modèle CROCUS comme la densification par le vent des couches de neige à proximité de la surface. Il est aussi à remarquer que les deux profils de densités ont été mesurés au cours de la période où l'épaisseur de neige simulée était supérieure à celle qui était observée par la sonde à la station. Dans ces conditions, il est difficile de déterminer si cette sous-estimation provient d'une surestimation de

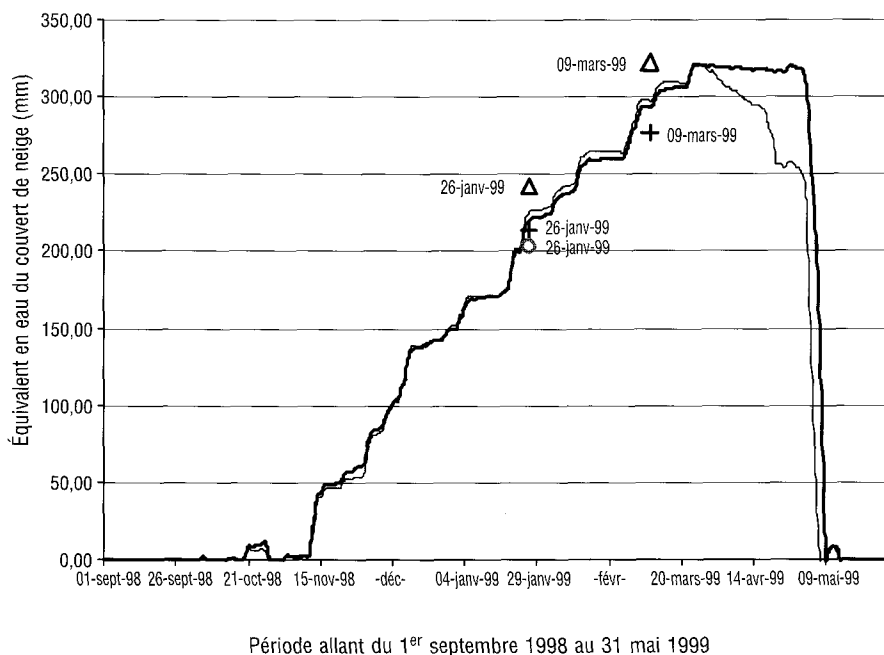
l'épaisseur du couvert de neige ou d'une sous-estimation de son équivalent en eau. Néanmoins, ces mêmes profils présentent des gradients qui s'approchent de ceux des profils mesurés.



Période allant du 1^{er} septembre 1998 au 31 mai 1999

- Épaisseur du couvert de neige mesurée HQ 02S
- Épaisseur du couvert de neige modélisée initialement HQ 02S
- Épaisseur du couvert de neige modélisée après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée HQ 02S
- ▲ Épaisseur du couvert de neige mesurée lors de campagnes sur le terrain (Fosses)
- + Épaisseur du couvert de neige mesurée lors de campagnes sur le terrain (Lignes de neige)
- Épaisseur du couvert de neige mesurée lors de campagnes sur le terrain (Carottier à la station)

Figure 9 Évolution de l'épaisseur de neige à la station HQ 02s pour la période allant du 1^{er} septembre 1998 au 31 mai 1999.
Snow depth evolution at the HQ 02s station from the 1st of september 1998 to the 31st of may 1999.



- Équivalent en eau du couvert de neige modélisé initialement HQ 02S
- Équivalent en eau du couvert de neige modélisé après ajustement du modèle CROCUS et des données d'entrée HQ 02S
- ▲ Équivalent en eau du couvert de neige calculé à partir de profils de densité
- + Équivalent en eau du couvert de neige mesuré lors de campagnes sur le terrain (Lignes de neige)
- Équivalent en eau du couvert de neige mesuré lors de campagnes sur le terrain (Carottier à la Station)

Figure 10 Évolution de l'équivalent en eau à la station HQ 02s pour la période allant du 1^{er} septembre 1998 au 31 mai 1999.

Snow water equivalent evolution at the HQ 02s station from the 1st of september 1998 to the 31st of may 1999.

Les profils de températures, quant à eux, sont aussi bons que pour la période d'étalonnage, (figures 12 a et b). Le 26 janvier 1999, le profil simulé est assez bon. D'ailleurs l'erreur relative moyenne et l'erreur absolue moyenne pour cette date sont de 25,87 % et de 1,14 °C. Quant à celui du 9 mars, il est relativement bien simulé à des profondeurs supérieures à 40 cm, mais, comme pour l'année précédente, il est plus froid que le profil mesuré notamment en surface. Ainsi l'erreur relative moyenne et l'erreur absolue moyenne pour cette date pour les couches de surface sont de 56,61 % et de 6,54 °C contrairement à 46,75 % et 1,33 °C pour les couches profondes. Pour les raisons évoquées lors de la période hivernale précédente, cette sous-estimation peut être attri-

buée en partie aux valeurs de rayonnement solaire direct diffus et infrarouge qui sont calculés à partir d'algorithme fournis avec le modèle CROCUS utilisant entre autre la nébulosité mesurée à la station YAH comme paramètre d'entrée.

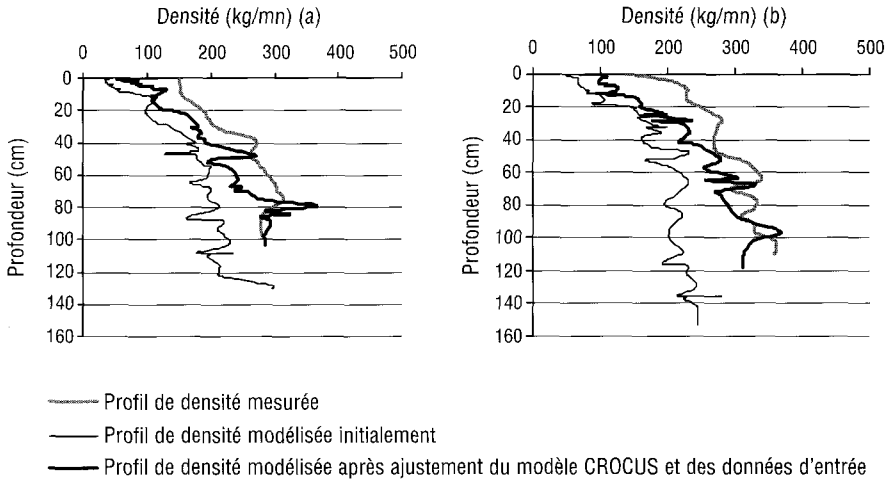


Figure 11 Profil de densités modélisées et mesurée à la station HQ 02s en date du 26 janvier 1999 (11 h 30) (a) et du 9 mars 1999 (11 h 30) (b).
Simulated and measured density profiles at the HQ 02s station on the 26th of January 1999 (11 h 30) (a) and the 9th of March (11 h 30) 1999 (b).

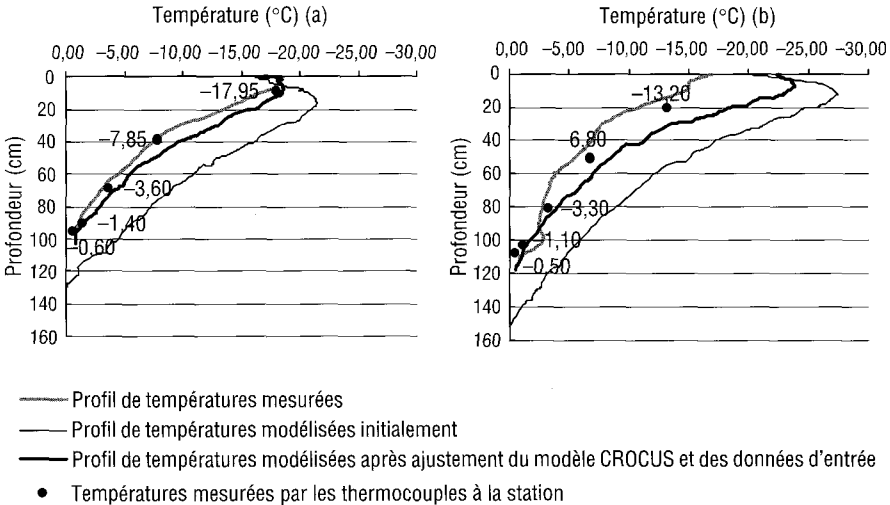


Figure 12 Profil de températures modélisées et mesurées à la station HQ 02s en date du 26 janvier 1999 (11 h 30) (a) et du 9 mars 1999 (11 h 30) (b).
Simulated and measured temperatures profiles at the HQ 02s station on the 26th of January 1999 (11 h 30) (a) and the 9th of March 1999 (11 h 30) (b).

6.2 Autres résultats de vérification

Le tableau 3 permet de vérifier, selon le critère de Nash-Sutcliffe, l'étalonnage du modèle CROCUS par rapport à l'évolution de l'épaisseur du couvert de neige mesurée en continu aux stations HQ 02s, 11e. Un tel critère ne peut être utilisé à la station 19e en raison d'un biais systématique dans la mesure de l'épaisseur par la sonde laser à cette station.

Le tableau 4 permet, quant à lui, d'obtenir un regard plus global sur l'ensemble des simulations effectuées tant à la station HQ 02s qu'aux stations 11e et 19e. Une troisième année de données était disponible à la station HQ 02s, alors que seulement l'hiver 1997-1998 permettait une vérification sur l'ensemble des stations. Il est à noter que les valeurs d'erreurs associées aux profils de densités et de températures cumulent les deux dates auxquelles de tels profils ont été mesurés pour une même période. Également, au cours de l'hiver 1998-1999, seulement des données sur l'évolution temporelle de l'épaisseur et de l'équivalent en eau du couvert nival étaient disponibles à la station 11e.

Tableau 3 Comparaison de l'épaisseur modélisée et mesurée aux différentes stations à l'aide du coefficient de Nash-Sutcliffe.

Table 3 Comparison between simulated and measured snow height at the various stations using the Nash-Sutcliffe coefficient.

Période	Variables	Coefficient de Nash-Sutcliffe entre l'épaisseur modélisée et mesurée aux stations					
		HQ 02s		HQ 11e		HQ 19e ³	
		Initiale	Finale	Initiale	Finale	Initiale	Finale
1997-1998	Épaisseur (cm)	0,85	0,95	0,79	0,95	-	-
1998-1999	Épaisseur (cm)	0,65	0,97	0,82	0,98		
1999-2000	Épaisseur (cm)	-5,20	-0,05				

Rappelons que le modèle CROCUS a été étalonné en utilisant uniquement les données à la station HQ 02s pour l'hiver 1997-1998. À l'aide des tableaux 3 et 4, il est facile de constater que tant à la station 02s pour les autres périodes de simulation qu'aux autres stations pour les périodes pour lesquelles des données étaient disponibles, le modèle CROCUS se comporte assez bien. D'une part, on peut noter une nette amélioration des coefficients et des erreurs en comparaison avec ceux et celles obtenus à partir des résultats initiaux. De plus, les valeurs des erreurs à la station HQ 02s pour les autres périodes et aux autres stations pour les périodes disponibles sont très comparables, sinon meilleures que celles correspondant à la période et à la station d'étalonnage. Nous pouvons donc considérer que le modèle CROCUS présente de bonnes aptitudes à effectuer le suivi complet du couvert de neige dans des conditions météorologiques comparables à celles du Nord du Québec.

3 Le coefficient de Nash-Sutcliffe ne peut s'appliquer à la station Hydro-Québec 19e en raison d'un biais systématique dans la mesure de l'épaisseur par la sonde laser à cette station.

Tableau 4 Synthèse des résultats en fonction de leur erreur absolue moyenne entre les variables modélisées et mesurées aux différentes stations.**Table 4** Summary of results expressed in mean absolute errors between the simulated and measured variables at the various stations.

		Erreur absolue moyenne entre les variables modélisées et mesurées aux stations					
		HQ 02s		HQ 11e		HQ 19e	
Période	Variables	Initiale	Finale	Initiale	Finale	Initiale	Finale
1997-1998	Épaisseur (cm)	9,06	4,50	7,48	3,97	9,17 ⁴	4,83 ⁴
	EEN ⁵ (mm)	28,00	10,00	36,00	18,00	16,50	14,50
	Densité (kg/m ³)	85,69	42,18	92,65	53,53	77,35	51,87
	Température (°C)	4,30	1,47	3,39	2,46	4,71	1,83
1998-1999	Épaisseur (cm)	18,99	5,65	10,46	3,51		
	EQ ² (mm)	16,00	11,50	16,00	13,00		
	Densité (kg/m ³)	103,34	45,65	-	-		
	Température (°C)	6,42	2,38	-	-		
1999-2000	Épaisseur (cm)	16,15	6,45				
	EQ ² (mm)	56,00	11,50				
	Densité (kg/m ³)	74,40	42,48				
	Température (°C)	1,20	0,44				

7 – DISCUSSION ET CONCLUSION

D'abord, il est important de rappeler que tout au long de cette étude, une attention particulière a été portée aux mécanismes déterminant l'évolution du couvert nival susceptibles d'être influencés par les conditions météorologiques du Nord du Québec, qui sont différentes de celles où le modèle fût préalablement ajusté (Alpes françaises).

Compte tenu des données disponibles et des distances entre les stations de prise des données météorologiques et les sites de simulation, les résultats peuvent être considérés comme satisfaisants. En effet, l'amélioration des critères d'évaluation (coefficient de Nash-Sutcliffe, erreur absolue moyenne) relatifs aux résultats obtenus suite à l'étalonnage du modèle CROCUS démontrent sa capacité d'adaptation aux conditions environnementales du Nord du Québec. Ainsi la réalisation à l'aide du modèle CROCUS, de simulations des caractéristiques du couvert nival encourage fortement son utilisation ultérieure comme outil de modélisation sur le présent secteur d'étude.

4 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 campagnes sur le terrain.

5 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.

Toutefois, il serait souhaitable, si possible, 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.

De plus, il serait intéressant, dans le cadre d'études futures éventuelles, de revoir les échanges radiatifs à la surface du couvert de neige. Des études préliminaires (SAVARY, 2002) ont permis de constater un refroidissement trop marqué par temps clair par suite d'un bilan radiatif trop faible à la surface du couvert de neige. En ce sens, le modèle ne tient pas compte de la végétation, qui coupe une partie du rayonnement solaire mais émet du rayonnement infrarouge vers la surface du couvert nival. Par conséquent, une étude plus approfondie des différents phénomènes physiques déterminants dans l'évolution de la température du couvert de neige permettrait l'obtention de profils de températures comparables à ceux mesurés par la vérification des données d'entrée et la modification des algorithmes de calcul des rayonnement solaire direct, diffus et infrarouge. Cet ajustement visera à minimiser l'attribution d'événements erronés ainsi qu'à intégrer les caractéristique de sites de modélisations (présence de couvert forestier) tout en s'ajustant aux conditions météorologiques du nord du Québec.

Les résultats obtenus à partir du réseau météorologique en place dans la région du réservoir LG4 sont aussi très encourageants en ce qui a trait à l'amélioration de deux logiciels développés à l'INRS-ETE. D'une part, les résultats fournis par CROCUS pourront servir de référence pour la simulation de l'évolution temporelle et spatiale du couvert nival tel que simulé par le sous-modèle unicouche d'évolution et de fonte de neige du modèle hydrologique HYDROTEL (FORTIN *et al.*, 1995). Certaines approches de simulation des processus physiques et de préparation des données d'entrée pour CROCUS pourront aussi être adaptées et intégrées au sous-modèle de neige d'HYDROTEL dans le but de perfectionner ce module et d'obtenir de meilleures simulations. Cette intégration peut s'exprimer notamment par la transformation du sous-modèle de neige unicouche d'HYDROTEL en un sous-modèle multicouches comparable à celui de CROCUS. Il en sera de même pour EQeau (BERNIER *et al.*, 2000), un logiciel qui permet l'estimation de l'équivalent en eau du couvert nival à partir d'images du satellite RADARSAT-1 mais qui nécessite tout de même une valeur de densité de la neige au sol. Celle-ci pourrait provenir de simulations réalisées à l'aide du modèle CROCUS.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BERNIER, M., GAUTHIER, Y., FORTIN, J.P., ROYER, A., FILION, R., BOUCHARD, M.C., 2000. Rapport de recherche INRS-Eau No. R-568, 48 p + annexe.
- BERNIER M., FORTIN J.-P., GAUTHIER Y., GAUTHIER R., BISSON J.-L., VINCENT P., 1999. Estimation de l'équivalent en eau du couvert nival au moyen d'images radar satellitaires. *Revue des Sciences de l'Eau*, vol. 12, n° 2, p. 407-423.
- BRUN E., MARTIN E., 1997. Couplage d'un modèle de neige avec un modèle de climat. *La houille blanche*, vol. 7, p. 69-75.
- BRUN E., DAVID P., SUDUL M., BRUNOT G., 1992. A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting. *Journal of Glaciology*, vol. 38, n° 128, p. 13- 22.
- BRUN E., MARTIN E., SIMON V., GENDRE C., COLÉOU C., 1989. An energy and mass model of snow cover suitable for operational avalanche forecasting. *Journal of Glaciology*, vol. 35, n° 121, p. 333-342.
- BRUTSAERT, W. 1984. Evaporation into the Atmosphere, Theory, History, and Applications. col. Environmental fluid mechanics, Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Company, 299 p.
- ESSERY R., MARTIN E., DOUVILLE H., FERNÁNDEZ A., BRUN E., 1999. A comparison of four snow models using observations from an alpine site. *Climate Dynamics*, vol. 15, p. 583-593.
- FORTIN, J.P. MOUSSA, R., BOCQUILLON, C. VILLENEUVE, J.P. 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.
- GOODISON B.E., LOUIE, P.Y.T., YANG, D., 1998 WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison, Final Report. WMO/ CIMO Report No. 67, WMO/TD n° 872, World Meteorological Organization, Geneva.
- HEDSTROM N., POMEROY J.W., 1998 Intercepted snow in the boreal forest: measurement and modelling. *Hydrological Process*, vol. 12, p. 1611-1625.
- LANGHAM, E.J. 1981. Physics and properties of snowcover. In « *Handbook of snow* », GRAY D.M. and MALE D.H. (Eds.), Pergamon Press, Willowdale, pp. 275-337.
- MARTIN E., LEJEUNE Y., 1998. Turbulent fluxes above the snow surface. *Annals of Glaciology*, vol. 26, p. 179-183.
- POMEROY J.W., GRAY D.M., 1995 Snowcover accumulation relocation and management. *National Hydrology Research Institute Science Report n° 7*, NHRI, Environnement Canada, Saskatoon, 144 p.
- SAVARY S., 2002. Modélisation et suivi complet du couvert nival sur le sous-bassin LG4 de la rivière La Grande, INRS-ETE, col. 2002 n° T-306, 228 p.