

ANALYSE DE SENSIBILITE DU MODELE SNOW-17 AU BASSIN DU LAC LAFLAMME
(SENSITIVITY ANALYSIS OF SNOW-17 IN THE LAKE LAFLAMME WATERSHED)

Gaétan Laberge et Jean Stein

Département des Sciences forestières
Université Laval
Ste-Foy (Québec) G1K 7P4

RESUME

Une étude de sensibilité des intrins du modèle de fonte SNOW-17 a été conduite à partir de données de fonte mesurées sur le versant nord du bassin du lac Laflamme situé à 80 km au nord de Québec. Les données des saisons de fonte de 1981 à 1987 ont été utilisées pour comparer l'efficacité du modèle à simuler l'écoulement journalier pour toute une saison de fonte selon différents intervalles de temps ou selon différentes procédures d'obtention des intrins. L'effet du choix du type d'intrins pour prédire à court terme la fonte selon certaines conditions météorologiques est aussi étudié. De plus, l'effet de la précision des intrins (température et précipitation) sur l'écoulement journalier simulé a été étudié grâce aux dérivées partielles des équations de fonte du modèle.

A sensitivity analysis of inputs for the snowmelt model SNOW-17 has been done with the snowmelt data measured on the north slope of Lac Laflamme watershed located 80 km north of Québec City. Data from the melt seasons of 1981 to 1987 have been used to compare the effectiveness of the model to predict the daily outflow for a whole melt season for different time intervals and types of inputs. The impact of type of input choice to predict short-term snowmelt runoff for different meteorological conditions is also studied. Furthermore, the effect of input precision (temperature and precipitation) on simulated daily outflow has been studied by using the differentials of snow-17 melt equations.

INTRODUCTION

Le modèle SNOW-17 est un sous-programme du modèle HYDRO-17 (Anderson, 1973) révisé traitant de l'accumulation et de l'ablation du couvert nival. Ce modèle à indice de température est très utilisé à travers les Etats-Unis. En effet, le modèle a été appliqué sur plusieurs régions des Etats-Unis (Peck et Anderson, 1977) par le "National Weather Service". Une étude de comparaison de modèles de fonte, appliquée sur un bassin de l'Idaho, a conclu que HYDRO-17 était le meilleur modèle parmi ceux vérifiés (Huber, 1983).

Le modèle SNOW-17 est appliqué sur le bassin du lac Laflamme situé à 80 km au nord de Québec depuis 1981. Une évaluation de ce modèle, à l'aide de mesures prises à un lysimètre, a montré que ce modèle est efficace et adéquat pour un site représentatif de l'écosystème de la forêt boréale de l'est du Canada (Roberge et al., 1987). Cette étude de sensibilité du modèle aux paramètres a été effectuée grâce à deux années de calibration (1982 et 1984) et trois années de validation (1981, 1983, 1985) mais aucune évaluation de la sensibilité aux intrins n'a été réalisée.

Suite à cette évaluation positive du modèle, il fut jumelé à un modèle de qualité des eaux de fonte sous le couvert nival (Stein et al., 1986). Une prochaine étape consiste à prédire à court terme l'écoulement journalier (quantité et qualité) à partir de prévisions météorologiques. Le modèle intégré utilisé pour ce travail de prédiction, SNOQUAL1, est le résultat du couplage de SNOW-17 et d'un sous-modèle simulant la concentration en différents anions dans les eaux de fonte.

L'emploi du modèle SNOWQUAL1 pour prédire à court terme (24 ou 48 heures) la fonte du couvert nival requiert la connaissance de la sensibilité de la partie quantitative du modèle aux intrins. En d'autres termes, nous devons connaître la précision des prévisions météorologiques (précipitation et température de l'air), nécessaire pour prédire un écoulement journalier se rapprochant raisonnablement de l'écoulement journalier observé.

Premièrement, dans cette étude, nous examinons l'effet de différentes intensités de la prise d'intrins météorologiques possibles et leurs implications sur la précision du modèle. En effet, les intrins horaires ont été utilisés pour la calibration du modèle de 1981 à 1985 (Roberge et al., 1987) mais des prévisions météorologiques fiables ne peuvent être produites sur cette base. Différentes alternatives sont examinées, comme par exemple, l'utilisation de la température de l'air minimale et maximale de la journée. Deuxièmement, la précision des intrins nécessaire pour obtenir une prédiction valable de l'écoulement journalier est vérifiée.

Le modèle SNOW-17 utilisé dans cette étude fait partie intégrante du "National Weather Service River Forecast System (NWSRFS)". Jusqu'à maintenant, peu d'études sur la partie accumulation et fonte de la neige (SNOW-17) ont été effectuées pour connaître la qualité des intrins nécessaires à l'obtention d'une précision donnée sur les extrins (Kitanidis et Bras, 1980). En effet, la plupart des études du modèle NWSRFS consistent à examiner la qualité des simulations des débits de rivières et non pas la qualité des simulations des débits de fonte à la base du couvert nival (Peck et Anderson, 1977; World Meteorological Organization, 1982; Huber 1983; Braun, 1985; et Calzori et Fontana, 1986). Seule une évaluation faite en forêt boréale (Roberge et al., 1987) étudie SNOW-17 à l'extérieur du NWSRFS. Donc, les applications actuelles de SNOW-17 ont nécessité la calibration des paramètres pour différentes situations mais aucune étude de sensibilité aux intrins de ce modèle n'a été produite.

Pour les études de sensibilité de modèles aux paramètres, il existe plusieurs techniques telles que la fonction objective de minimisation et la probabilité maximale d'estimation ou des techniques moins sophistiquées telles que des graphiques ou de simples estimateurs mathématiques. Ces outils avec quelques variantes peuvent être utilisés dans une étude de sensibilité de modèles aux intrins. Dans le passé, la sensibilité de modèles a été seulement étudiée pour trouver les valeurs optimales des paramètres (McCuen, 1973). Pourtant les techniques de dérivées partielles des équations des modèles par rapport aux intrins peuvent être utiles pour constater l'impact des erreurs aux intrins sur la qualité de la simulation.

METHODOLOGIE

Le programme d'accumulation et d'ablation de la neige SNOW-17 est un modèle à indice de température qui simule un bilan énergétique du couvert nival. Les intrins principaux du modèle sont la température moyenne de l'air et la précipitation totale durant l'intervalle de temps choisi par l'utilisateur. Une récente version de SNOW-17 permet le choix de l'intervalle de temps (≥ 1 hre) comparativement à un intervalle fixe de 6 heures avec l'ancienne version. La température de l'air peut être utilisée avec un intervalle de temps supérieur à celui des précipitations, mais l'inverse n'est pas possible.

L'état de la précipitation peut être défini par la variable "PCTS" qui, variant de 0,00 à 1,00, indique la fraction solide de la précipitation totale durant l'intervalle de temps. Si elle n'est pas définie, le modèle sépare la pluie de la neige selon que la température de l'air est supérieure ou inférieure à une température limite choisie par l'utilisateur (paramètre PXTMP). Une description du couvert nival initial (équivalent en eau, déficit énergétique, contenu en eau liquide) doit être fournie au début de la simulation. Les paramètres initiaux du site sont déterminés par calibration (Roberge et al., 1987).

Le modèle évalue les échanges énergétiques au niveau de l'interface air-neige grâce à deux équations: l'une en période avec précipitation, l'autre sans précipitation. Lorsqu'il n'y a pas de précipitation significative (plus de 2,5 mm/6 hres) et que le déficit énergétique est égal à zéro, la fonte est calculée à partir du nombre de degrés de la température de l'air au-dessus d'une température de base (MBASE = 0°C) multiplié par le facteur de fonte. Ce facteur varie selon une courbe sinusoïdale ayant son minimum au

solstice d'hiver et son maximum au solstice d'été. En période froide, le déficit énergétique est évalué grâce à un facteur de fonte négatif et celui-ci doit être comblé par un apport énergétique avant que ne débute la fonte.

En période avec précipitation significative, le modèle simule un bilan énergétique complet à partir d'hypothèses sur le rayonnement, le vent et l'humidité relative (Anderson, 1973). A la fonte ainsi déterminée est ajoutée la pluie. Celles-ci doivent tout d'abord combler la capacité de rétention en eau de couvert et l'excédent est étalé dans le temps selon des équations empiriques (Anderson, 1973). Si le couvert nival n'est pas continu, selon la courbe de retrait du couvert évalué lors de la calibration (Anderson, 1982), alors la pluie tombant sur le sol nu contribue directement à l'écoulement.

La compilation des extrants du modèle nous renseigne sur le bilan énergétique et le déficit énergétique du couvert, l'équivalent en eau du couvert, la fraction du sol enneigé ainsi que l'écoulement à la base du couvert pour chaque jour simulé. Seuls les extrants journaliers ont été analysés dans cette étude.

Le site expérimental choisi est le bassin du lac Laflamme situé à 80 km de Québec (figure 1). Ce bassin de 63 ha est écologiquement caractérisé par le domaine climacique de la sapinière à bouleau blanc. Des précipitations moyennes de 1424 mm dont 33% sous forme de neige et une température annuelle moyenne de 0,2°C caractérisent son climat (Lemieux, 1983).

Les intrants et les données de validation du modèle sont recueillis depuis 1981 sur le versant nord du bassin sur un site ayant une pente moyenne de 20% et une altitude de 780 m. Selon un inventaire de 1982 (Prévost, 1983), le peuplement est composé à 80% de sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.) avec une densité de 4 000 à 5 000 tiges/ha et un niveau de défoliation de 50%. Suite à un chablis important, en décembre 1983, causé par des vents violents et des pluies verglaçantes, la densité a été réduite.

Les températures de l'air sont mesurées grâce à un thermistor YSI-401 ou YSI-405 dans un abri météorologique en sous-bois. Les données de température aux 30 minutes, (5 minutes en 1981) sont enregistrées sur cassette à l'aide d'un système d'acquisition de données (Campbell CR-5). De plus, pour la description du couvert nival au début de la simulation, une série de thermistors est installée in situ dans le couvert nival et des mesures de densité de la neige sont régulièrement prises. Les données de précipitations proviennent de la station principale de la forêt Montmorency située à 1,5 km du site d'application du modèle. Ces données permettent de différencier l'état de la précipitation (neige ou pluie).

Pour les données de calibration, un lysimètre de fonte de 20 m² où l'écoulement est mesuré grâce à un débitmètre à augets basculants (à valves électroniques, depuis 1986) relié au système d'acquisition de données. De plus, des mesures répétées de l'équivalent en eau du couvert nival sont aussi disponibles.

Pour notre étude de sensibilité du modèle SNOW-17 aux intrants, nous avons comparé les écoulements journaliers observés et simulés obtenus avec des intrants horaires et aux 6 heures et avec ou sans définition de l'état de la précipitation. De plus, différentes façons d'obtenir les intrants température et précipitation aux 6 heures ont été utilisées pour évaluer leur impact sur l'écoulement journalier simulé (tableau 1).

L'intervalle de temps des intrants utilisés par Roberge *et al.* (1987) est sur une base horaire (température et précipitation) avec une distinction entre la neige et la pluie. En effet, la fraction de la précipitation totale de l'heure sous forme de neige est définie. La température horaire est la moyenne des températures mesurées à toutes les 30 minutes et les précipitations sont totalisées sur une base horaire.

Pour le type d'intrants (2), nous utilisons la température moyenne de l'air et la précipitation totale pour des périodes de 6 heures (0:00 à 6:00, 6:00 à 12:00, 12:00 à 18:00 et 18:00 à 0:00). La température moyenne aux 6 heures est la moyenne arithmétique des températures horaires utilisées dans les intrants horaires et la précipitation est l'addition des précipitations horaires pour chaque période de 6 heures.

Dans le fichier des intrants, nous pouvons définir l'état de précipitation (pluie ou neige) pour un intervalle de temps (horaire et aux six heures). Par contre, si l'on ne

dispose pas de cette information, le modèle peut lui-même, grâce à la température de l'air et la variable PXTMP, définir le type de précipitation. Par exemple, si la température de l'air pour l'intervalle de temps choisi est supérieure à PXTMP (10°C pour toutes nos simulations) le modèle simule la fonte en considérant la précipitation comme étant de la pluie. Nous avons utilisé cette possibilité avec différents types d'intrans.

Etant donné la difficulté de prédire la quantité de pluie ou neige pour des périodes de 6 heures, nous avons créé des fichiers d'intrans ayant comme valeur de précipitation aux 6 heures, la précipitation totale journalière divisée également pour les quatre périodes de 6 heures de la journée. En fait, si la précipitation est solide, cela ne devrait pas introduire d'erreur, car, il ne devrait pas y avoir de fonte. L'erreur devrait être plus ou moins grande dépendamment de la durée et du volume de la précipitation liquide. Nous avons utilisé cette façon d'obtenir la précipitation aux 6 heures avec des températures moyennes et simulées aux 6 heures.

L'une des prévisions météorologiques des plus usuelles est la température minimale et maximale de la journée à venir. Nous pouvons, à partir de ces valeurs minimales et maximales, déterminer la température moyenne pour les 4 périodes de 6 heures de la journée. Une fonction harmonique asymétrique peut servir à déterminer ces températures moyennes et donner une bonne simulation avec le modèle SNOW-17 (Ca'zozzi et Dalla Fontana, 1986). Par contre, nous avons choisi d'utiliser les équations de la sous-routine MAI du modèle HYDRO-17 (Anderson, 1973) qui transforme les températures minimales et maximales en températures moyennes aux 6 heures à cause de sa simplicité d'utilisation. Les équations à la base de cette sous-routine ont été évaluées grâce à des données de température de saisons de fonte au "Central Sierra Snow Laboratory" (Californie) et au "NOAA-AR5 Cooperative Snow Research Station" (Vermont). Nous avons trouvé, à partir des données de températures horaires de 1981 à 1987, les températures minimales et maximales journalières. Ces températures utilisées dans les équations de la sous-routine MAI nous donnant des températures moyennes simulées aux 6 heures. Celles-ci sont ensuite utilisées comme intrans dans le modèle SNOW-17.

Comme outil d'analyse, nous avons donc opté pour des méthodes simples d'évaluation de la qualité des simulations. Ainsi, les écoulements journaliers simulés sont comparés aux écoulements journaliers observés au lysimètre par des critères simples selon l'intervalle de temps ou le type d'intrans utilisé. L'un de ces critères, l'erreur absolue moyenne (Bates, 1976) est définie par:

$$EAM = \frac{\sum (Q_s - Q_o)}{N}$$

où Q_s = Ecoulement journalier simulé;
 Q_o = Ecoulement journalier observé;
 N = Nombre de jours de simulation.

Ce critère mesure l'efficacité de la simulation des écoulements mais montre peu la qualité de la simulation lors des faibles écoulements (James et Burges, 1982).

Le coefficient de corrélation "r", souvent utilisé pour vérifier l'accord entre des valeurs simulées et observées, est calculé pour les écoulements journaliers selon le type d'intrans.

$$r = \frac{1}{N} \sum \left(\frac{Q_o - \bar{Q}_o}{S_o} \right) \left(\frac{Q_s - \bar{Q}_s}{S_s} \right)$$

où \bar{Q}_o et \bar{Q}_s = Moyennes des écoulements journaliers observés et simulés;

S_o et S_s = Ecart-type des écoulements journaliers observés et simulés.

Ce coefficient de corrélation peut être pondéré selon le ratio des écarts-types (McCuen et Snyder, 1975).

$$\begin{aligned} \text{Si } S_s < S_o & \quad Cr = \frac{S_s}{S_o} \times r \\ S_s \geq S_o & \quad Cr = \frac{S_o}{S_s} \times r \end{aligned}$$

Le coefficient de corrélation de Pearson pondéré "Cr" a une valeur unitaire lorsqu'il y a un parfait accord entre l'écoulement journalier observé et simulé.

De plus, l'effet de la précision des intrans est étudié grâce aux dérivées partielles des équations générales de fonte de SNOW-17.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Effet du choix du type d'intrans sur la simulation de l'écoulement journalier pour l'ensemble d'une saison de fonte

Intrans horaires (1)

De 1981 à 1987, le modèle SNOW-17 donne une très bonne simulation de l'écoulement journalier. Le coefficient de corrélation de Pearson, le coefficient de corrélation de Pearson pondéré par le ratio des écarts-types (McCuen and Snyder, 1975) et l'erreur absolue moyenne (Bates, 1976) démontrent pour les 7 années de simulation la bonne performance du modèle pour simuler les écoulements journaliers (tableaux 2 et 3). Les différences interannuelles observées ne sont pas uniquement dues à la capacité du modèle à simuler l'écoulement dans certaines conditions météorologiques, mais aussi à l'imprécision des valeurs mesurées au lysimètre notamment en 1986. De plus, il existe une différence entre la fonte simulée et observée vers la fin de la période de fonte parce que le couvert nival sur le lysimètre a alors une fonte plus rapide que l'ensemble du site (Roberge *et al.*, 1987).

Intrans aux 6 heures avec température observée (2)

Pour l'ensemble des saisons de fonte simulée, l'emploi de ce type d'intrans n'a pas d'influence significative sur la qualité des simulations de la fonte du couvert nival par rapport à l'utilisation des données horaires (tableaux 2 et 3). A la figure 2, pour l'année de calibration 1982, on remarque peu de différence entre les écoulements journaliers simulés à partir des intrans horaires et aux 6 heures.

Au début de la saison, l'utilisation des températures moyennes aux 6 heures, semble diminuer l'écoulement en diminuant la période de fonte dans la journée. En effet, au début d'une saison de fonte, les périodes où la température de l'air est au-dessus de 0°C ne sont que de quelques heures durant la journée. Si l'on utilise comme intrans la température moyenne aux 6 heures, pour ces courtes périodes de fonte le déficit énergétique est évalué avec le facteur de fonte négatif dans le cas où la température moyenne de l'entière période de 6 heures est au-dessous de 0°C. Tandis qu'avec les intrans horaires, les courtes périodes où la température est au-dessus de 0°C, le déficit énergétique est rapidement diminué grâce au facteur de fonte positif et ainsi la fonte simulée commence plus tôt. Nous avons constaté ce phénomène le 7 avril 1984 où l'écoulement journalier simulé avec un intervalle de temps des intrans aux 6 heures est de 8,4 mm comparativement à 11,6 mm pour l'intervalle de temps horaire. L'écoulement journalier observé étant de 14,1 mm, l'erreur absolue journalière passe donc de 2,5 à 5,7 mm due à l'utilisation des intrans aux 6 heures pour cette journée.

L'état de la précipitation non-défini (3)

Lorsque la température moyenne aux 6 heures est utilisée en combinaison avec l'état de la précipitation non-défini, la qualité de la simulation de l'écoulement journalier peut être diminuée (tableaux 2 et 3). Par exemple, pour la saison 1983 où le nombre de jours pluvieux durant la fonte est grand et où certaines journées sont caractérisées par une pluie abondante avec une température près de 0°C, la qualité de la simulation est moins bonne avec ce type d'intrans. Cette situation est due à l'existence de pluie verglaçante qui affecte la fonte et l'écoulement de l'eau dans le couvert nival. Ainsi, pour les écoulements journaliers de 1983, l'erreur absolue moyenne de la simulation passe de 2,2 mm avec l'état

de la précipitation défini à 4,5 mm si l'état de la précipitation est non-défini (tableau 2).

Par contre, pour les années 1981, 1982, 1985, 1986, 1987 et dans une moindre mesure 1984, les caractéristiques particulières de 1983 ne sont pas présentes et la simulation de l'écoulement journalier pour l'ensemble de la saison de fonte avec ce type d'intrans est peu modifié par rapport à la simulation avec un intervalle de temps horaire.

Il est normal de constater peu d'influence de la non-définition de l'état de la précipitation sur l'ensemble des saisons de fonte simulées. Les journées ayant une précipitation ne représente qu'une fraction de la saison de fonte. Donc une augmentation de l'erreur absolue est amoindrie si on l'exprime par une moyenne pour l'ensemble de la simulation. De plus, seules les journées ayant des températures près de 0°C lors d'une précipitation sont susceptibles d'avoir une erreur de l'écoulement due à une mauvaise définition de l'état de la précipitation. Cette situation est survenue le 6 avril 1984 où l'écoulement observé de 14,1 mm n'a pas été simulé puisque l'état de la précipitation a été défini par le modèle comme étant de la neige alors qu'en réalité c'était de la pluie.

Précipitation calculée à partir de la précipitation journalière et état de la précipitation non-défini (4)

Pour les années 1981 à 1986, nous obtenons des valeurs de critères d'évaluation qui sont semblables à celles obtenues avec un intervalle de temps aux 6 heures avec état de la précipitation non-défini (tableau 2). C'est donc généralement la non-définition de l'état de la précipitation qui amène l'augmentation de l'erreur. En effet, une mauvaise définition de la précipitation a un impact direct sur la simulation de l'écoulement tandis que l'utilisation de moyennes journalières de précipitation peut entraîner une erreur dans le type d'équation de fonte utilisée par le modèle ou un écoulement prématuré ou retardé pour une journée donnée.

Ce comportement a d'ailleurs été analysé plus spécifiquement pour certaines journées. A la figure 3, le 18 et 21 avril 1982, nous constatons des différences significatives entre les écoulements journaliers simulés avec des intrans aux 6 heures (pluie moyenne aux 6 heures avec état défini) et les écoulements journaliers simulés avec un pas de temps aux 6 heures, pluie moyenne journalière avec état non-défini. Le 21 avril, la différence de 3,4 mm entre les deux simulations est due à la non-définition de l'état de la précipitation tandis que le 18 avril, la fonte simulée est réduite de 7,3 mm à cause de la redistribution de la précipitation sur une période de 24 heures jumelée à la non-définition de l'état de la précipitation. Le 18 avril, en redistribuant sur 24 heures la précipitation journalière, on crée une précipitation durant une période de la journée où la température est inférieure à 0°C alors qu'en réalité la précipitation a eu lieu lorsque la température de l'air était supérieure à 0°C. Un effet important de la redistribution de la pluie sur 24 heures sur l'écoulement journalier est moins fréquent comparativement à un effet de la non-définition de l'état de la précipitation.

Intrans aux 6 heures avec température simulée à partir de la valeur minimale et maximale journalière (5)

Premièrement, nous avons obtenu un coefficient de corrélation de Pearson de 0,94 entre les températures moyennes observées et simulées de 1981 à 1987. Deuxièmement, le graphique de la température simulée à partir de la valeur minimale et maximale journalière en fonction de la température moyenne observée (figure 4) montre la concordance qu'il existe entre les deux variables. Certains points s'éloignent de façon plus importante de la droite d'accord parfait mais ces points sont généralement des températures au-dessous de 0°C et ont donc moins d'influence sur la simulation de la période de fonte. En effet, en période froide, les différences entre les températures simulées et observées généralement s'annulent et ainsi influencent peu le déficit énergétique calculé au début de la fonte. De plus, l'erreur absolue moyenne est de seulement 1,25°C.

Une étude plus spécifique de la saison 1982, grâce à un graphique des températures moyennes observées et simulées en fonction du temps (figure 5), nous renseigne sur les raisons des différences entre les valeurs observées et simulées. En effet, les jours où nous constatons une différence plus grande entre les températures observées et simulées (le

14, 18, 21 avril et le 20 mai) sont des journées avec précipitation. Donc, les équations seraient moins efficaces lors du passage de fronts météorologiques.

L'utilisation des températures simulées à partir des équations de la sous-routine MAT avec la précipitation aux 6 heures et l'état de la précipitation défini entraîne une légère augmentation non-significative de l'erreur par rapport à l'utilisation de la température moyenne aux 6 heures pour l'ensemble des saisons de fonte simulée. Ainsi, l'erreur absolue moyenne passe de 2,1 à 2,3 mm pour 1981 à 1987 (tableau 2).

Il est important de noter que les températures minimales et maximales utilisées pour créer des températures aux 6 heures sont les températures observées sur le site expérimental. La différence entre la simulation avec des intrans aux 6 heures et avec ce type d'intrans est donc seulement due à l'erreur entre la température moyenne observée aux 6 heures et la température moyenne simulée aux 6 heures.

Les températures moyennes observées et simulées étant très semblables (1,15°C et 1,12°C), donc sur une période de temps assez longue (par exemple une saison de fonte), les erreurs de simulation de l'écoulement due aux différences des températures ont tendance à s'annuler. Par contre, pour des simulations à court terme, on constate des erreurs entre les écoulements observés et simulés plus importantes. Par exemple, le 2 avril 1986, la température simulée est au total de 5,2 °C inférieure à la température moyenne pour les 4 périodes de 6 heures. L'erreur absolue journalière de 1,1 mm avec les intrans aux 6 heures (températures moyennes aux 6 heures) passe à 4,2 mm avec l'utilisation des températures aux 6 heures simulées comme intrans. Le 16 avril 1985, le phénomène est encore plus visible, l'erreur absolue journalière passant de 2,9 mm à 10,9 mm due principalement à une différence entre les températures simulées et moyennes de 20,5 pour la première période de 6 heures de la journée.

Température simulée et état de la précipitation non-défini (6)

En plus d'utiliser la température simulée à partir des équations de la sous-routine MAT, l'état de la précipitation n'est pas défini dans le type d'intrans (6). L'erreur absolue moyenne augmente jusqu'à 2,7 mm pour les 7 années étudiées (tableau 2). La qualité de la simulation avec ce type d'intrans est diminuée due à deux sources d'erreur, soit la température simulée et la non-définition de l'état de la précipitation.

Ces sources d'erreurs ne semblent pas avoir un effet additif tout au long de la simulation. La moyenne des températures simulées de 1981 à 1987 est d'ailleurs très semblable à la moyenne des températures observées ce qui ne favorise pas des erreurs de définition de l'état de la précipitation en surestimant la pluie ou la neige l'une par rapport à l'autre.

Lors de prédiction à court terme de la fonte, l'utilisation de ce type d'intrans peut augmenter considérablement l'erreur absolue journalière. Par exemple, le 18 avril 1982, l'erreur absolue journalière de l'écoulement qui est de 1,3 mm passe à 11,8 mm si l'état de la précipitation est non-défini. Cette situation est logique puisque l'ajout d'une source d'erreur tel que la non-définition de la précipitation jumelée avec une autre source d'erreur, la température simulée à partir des températures minimales et maximales, est susceptible dans certaine situation de générer une prédiction plus ou moins exacte de l'écoulement sous le couvert nival.

Température simulée, précipitation calculée à partir de la précipitation journalière et état non-défini (7)

Avec le type d'intrans (7), la précipitation totale journalière est répartie également pour les 4 périodes de 6 heures de la journée. La qualité de la simulation des écoulements journaliers est peu affectée comparativement à l'utilisation des températures simulées avec précipitation aux 6 heures et état de la précipitation non-défini (tableau 2). Cette nouvelle source d'erreur (la répartition de la précipitation journalière) ne semble pas avoir d'impact important sur l'ensemble d'une saison de fonte. Par contre, comme dans le cas où ce type d'intrans précipitation a été utilisé avec des températures moyennes aux 6 heures, pour certaines journées on peut s'attendre à ce que les effets de cette source d'erreur (précipitation calculée à partir de la précipitation journalière) se combine avec

les autres sources d'erreurs (température simulée, état de la précipitation non-définie) et augmente l'erreur absolue journalière de l'écoulement.

Effet du choix du type d'intrans sur la prédiction à court terme de l'écoulement journalier

A partir de l'évaluation des types d'intrans sur la qualité de la simulation de l'écoulement journalier, nous pouvons constater les impacts du choix du type d'intrans lors de simulation de la fonte sur de courtes périodes de temps. Ceci dans le but futur d'utiliser SNOW-17 pour prédire à court terme la fonte, à partir de prévisions météorologiques. Le choix du type d'intrans est important puisque dans certaines conditions la qualité de la prédiction de l'écoulement dépend grandement du type d'intrans utilisé.

Les intrans horaires utilisés avec les paramètres de calibration pour le lac Laflamme (Roberge et al., 1987) donne une bonne simulation de la fonte mais ne sont pas utilisables sur une base opérationnelle pour prédire à court terme la fonte. Des prédictions précises de 24 à 48 heures à l'avance de la température de l'air et de la précipitation sur une base horaire ne sont pas réalisables. De plus, comparé à l'utilisation d'intrans aux 6 heures, il n'y a pas d'avantage de choisir ce type d'intrans pour prédire l'écoulement journalier.

Au tableau 4, l'impact de l'utilisation des différents types d'intrans sur la prédiction à court terme de l'écoulement journalier selon certaines conditions météorologiques est résumé. Ainsi, la non-définition de l'état de la précipitation par l'utilisateur peut entraîner une augmentation de l'erreur de prédiction de l'écoulement journalier lors d'un événement pluvieux caractérisé par une température de l'air près de 0°C. En effet, lors de pluie verglaçante, la définition de l'état de la précipitation par l'utilisateur nous donne une meilleure simulation de l'écoulement journalier. En d'autres circonstances, le modèle simule une même valeur d'écoulement journalier avec ou sans définition de l'état de la précipitation par l'utilisateur.

Si l'on calcule la précipitation pour chaque période de 6 heures à partir de la précipitation journalière, l'erreur entre l'écoulement journalier simulé et observé peut augmenter. Par exemple, pour une journée où il y a un événement pluvieux intense mais de courte durée avec une température de l'air de quelques degrés positifs, la répartition de cette précipitation sur les quatre périodes de six heures augmente l'erreur si certaines de ces périodes ont des températures de l'air sous zéro. En effet, la précipitation originellement sous forme de pluie sera considérée par le modèle comme étant de neige puisque la température de l'air est négative pour certaines périodes de 6 heures de la journée (état de la précipitation défini par le modèle). Le modèle sous-estimera la précipitation sous forme liquide et par le fait même sous-estimera l'écoulement journalier. Par contre, si toute la journée est caractérisée par une température de l'air sous zéro, il n'y a pas d'effet à l'utilisation de ce type d'intrans. Pour une précipitation avec la température de l'air au-dessus de zéro durant toute la journée, il y aura un déphasage de l'écoulement dans le temps mais peu d'effet sur l'écoulement journalier.

A l'étude des températures simulées à partir de la valeur minimale et maximale journalière pour l'année 1982, nous constatons que les équations simulant la température aux 6 heures à partir des températures minimales et maximales journalières sont souvent déficientes lors des précipitations. Donc, lors de passage d'une perturbation atmosphérique, la température simulée étant souvent en désaccord avec la température observée, la prédiction de l'écoulement journalier est moins bonne. De plus, si cette erreur est jumelée avec une mauvaise définition de l'état de la précipitation par le modèle, la prédiction de l'écoulement journalier peut être très incertaine. Par contre, en période de stabilité atmosphérique (sans passage de dépression importante) l'erreur de température étant minime, la prédiction de l'écoulement journalier avec ce type d'intrans est assez semblable à celle obtenue aux 6 heures.

Effet de la précision des intrans

En période sans précipitation, la fonte de la neige simulée par SNOW-17 est directement reliée à la température ambiante selon l'équation (1).

$$M = M_f \cdot (T_a - M_{base}) \quad (1)$$

où M = fonte (mm);
 M_f = facteur de fonte ($\text{mm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot 6 \text{ hr}^{-1}$);
 T_a = température de l'air ($^\circ\text{C}$);
 M_{base} = température à laquelle la fonte commence ($^\circ\text{C}$).

Le changement de la fonte simulé dû à une erreur si la température de l'air peut être évaluée grâce à la dérivée selon T_a de l'équation (1) (McCuen, 1973).

$$\frac{\delta M}{\delta T_a} = M_f \cdot dT_a$$

où dT_a est l'erreur de la température au-dessus de la température à laquelle la fonte commence (MBASE).

Le facteur de fonte (M_f) varie au cours de l'hiver passant de 0,30 en décembre à 0,80 en juin. Donc une erreur de 1°C sur une période de 6 heures entraîne une erreur de 0,85 mm en juin. En moyenne, au cours de la période de fonte (avril à juin), on peut dire qu'une erreur de 1°C sur la température de l'air, pour une période de 6 heures, entraîne une erreur de 0,75 mm. Ceci, naturellement, lorsque la température de l'air est plus haute que la température à laquelle la fonte commence (MBASE). Si cette erreur se répète pendant les 24 heures de la journée, on obtient une erreur de 3,0 mm.

En période avec précipitation, la fonte est simulée par une équation (2) plus sophistiquée qu'en période sans précipitation.

$$M = 3,67 \times 10^{-9} (T_a + 273)^4 - 20,4 + 0,0125 P_x \cdot T_a + 8,5 F(V_a) \left[(0,9 E_{sat} - 6,11) + 0,00057 \cdot P_a \cdot T_a \right] \quad (2)$$

où M = Fonte (mm);
 T_a = Température de l'air ($^\circ\text{C}$);
 P_x = Equivalent en eau de la précipitation liquide ou solide (mm);
 $F(V_a)$ = Variable fonction du vent ($\text{mm mb}^{-1} 6 \text{ h}^{-1}$);
 E_{sat} = Pression de vapeur saturée (mb);
 P_a = Pression atmosphérique (mb).

Il est à noter que P_a et E_{sat} sont obtenus à partir des équations suivantes:

$$P_a = 1012,2 - 1134 \cdot E1 + 0,00745 \cdot E1^2$$

$$E_{sat} = 2,749 \cdot 10^3 \cdot \exp \left[\frac{-4278,6}{T_a + 242,8} \right]$$

où $E1$ = élévation (centaine de mètres);
 T_a = température de l'air.

Donc, la température de l'air a une influence sur la variable pression de vapeur saturée (E_{sat}). On ne peut pas, comme dans le cas de la fonte en période sans précipitation, trouver une relation linéaire entre un changement de la fonte suite à une erreur de la température de l'air sans tenir compte des précipitations. L'impact de l'erreur d'évaluation de la température sur la fonte est évalué grâce à la dérivée de l'équation (2) selon T_a .

$$\frac{\delta M}{\delta T_a} = \left[1,468 \times 10^{-8} \cdot (T_a + 273)^3 + 0,0125 \cdot P_x \cdot 8,5 \cdot F(VA) \cdot 2749 \times 10^6 \cdot \left(\frac{-4278,6}{4278,6 + \exp \frac{-4278,6}{T_a + 242,8}} \right) + (0,00057 \times P_a) \right] \cdot dT_a$$

où dT_a = erreur d'évaluation de la température.

L'erreur de la fonte due à une erreur d'évaluation de la température augmente avec la température réelle de l'air et avec la précipitation (tableau 5). Généralement, l'erreur de la fonte est de 0,6 mm par 6 heures pour une erreur d'évaluation de 1°C de la température en période avec précipitation.

L'impact de l'erreur de la précipitation sur la fonte est évalué grâce à la dérivée de l'équation (2) selon P_x .

$$\frac{\delta M}{\delta P_x} \cdot dP_x = 0,0125 \cdot T_a \cdot dP_x$$

où dP_x = erreur d'évaluation de la précipitation (mm)

Nous remarquons que l'erreur d'évaluation de la précipitation a peu d'effet sur la fonte du couvert (tableau 6). Par contre, la précipitation contribuant à l'écoulement, une erreur d'évaluation de la précipitation a un impact important surtout si le couvert nival est discontinu sur le terrain.

CONCLUSION

Dans les conditions du bassin du lac Laflamme, l'étude de l'effet des différentes intensités et variantes de la prise d'intrans météorologiques démontrent que pour l'ensemble d'une saison de fonte la qualité de la simulation de l'écoulement journalier par rapport aux valeurs observées est peu affectée sauf lors d'années à forte pluviosité. Par contre, lors de simulation à court terme (1 ou 2 journées), selon certaines conditions météorologiques, le fait de définir ou de ne pas définir l'état de la précipitation ou d'utiliser des températures simulées à partir de valeurs minimales et maximales journalières peut augmenter l'erreur entre l'écoulement journalier simulé et observé.

De plus, la précision des intrans (température et précipitation) est importante pour l'obtention d'une bonne simulation de l'écoulement journalier. Un biais supérieur à 1°C sur la température diminue la qualité de la simulation de l'écoulement journalier aussi bien à court que pour toute la saison. La précision de la précipitation est, quant à elle, encore plus importante puisqu'elle contribue directement à l'écoulement. Dans un milieu comme le lac Laflamme, où les événements pluvieux sont fréquents, une bonne évaluation des précipitations est primordiale.

Finalement, à la lumière de cette étude de sensibilité, l'utilisation du modèle SNOW-17 pour prédire à court terme la fonte à partir de prévisions météorologiques ne peut être réalisable avec une marge d'erreur raisonnable sans la capacité d'obtenir des intrans météorologiques de très bonne qualité.

BIBLIOGRAPHIE

- Anderson, E.A., 1973. National Weather Service river forecast system, snow accumulation and ablation model. NOAA technical Memorandum NWS Hydro-17. U.S. Dept. of Commerce, NOAA, National Weather Service, Silver Spring, Md, 217 p.
- Anderson, E.A., 1982. Hydro-17 snow accumulation and ablation model. Documentation non publiée accompagnant SNOW-17, 89 p.

- Bates, C.L., 1976. Analysis of time series modelling errors with application to the Lake Sammamish hydrologic system. MSCE Thesis, Dept. of Civil Engineering, University of Washington, Seattle.
- Braun, L.N., 1985. Simulation of snowmelt runoff in lowland and lower alpine regions of Switzerland. *Zürcher Geographische Schriften* 21, Geographisches Institut Eidgenössische Technische Hochschule Zurich, Zurich, Switzerland, 166 p.
- Ca'zorzi, F., et G. Dalla Fontana, 1986. Improved utilization of maximum and minimum daily temperature in snowmelt modelling. *Proc. of the Budapest Symposium. Modelling Snowmelt-Induced Processes*, IAHS Publ. no 155, 141-150.
- Huber, L.A., 1983. A comparison of several snow accumulation and ablation algorithms used in watershed modeling. *Proceedings, 51st Annual Western Snow Conference*, Vancouver, Washington, p. 76-88.
- James, L.D., et S.J. Burges, 1982. Selection calibration and testing of hydrologic models. *Dans Hydrologic Modeling of Small Watersheds Monogr. 5*, p. 437-472. Edited by C.T. Haan et al. American Society of Agricultural Engineers, St-Joseph, Michigan.
- Kitanidis P.K., et R.L. Bras, 1980. Real-time forecasting with a conceptual hydrologic model 2. Applications and results. *Water Resources Research*, 16(6): 1034-1044.
- Lemieux, G., 1983. Le climat de la forêt Montmorency, Station météorologique de la forêt Montmorency, document interne.
- McCuen, R.H., 1973. The role of sensitivity analysis in hydrologic modeling. *J. Hydrol.*, 18: 37-53.
- McCuen, R.H., et W.M. Snyder, 1975. A proposed index for comparing hydrographs. *Water Resources Research* 11(6): 1021-1024.
- Peck, E.L., et E.A. Anderson, 1977. Operational use of snow accumulation and ablation model in the United States. *Northern Research Basin Symposium Workshop. Snow Accumulation and Ablation Models Symposium*, Fairbanks, 5 p.
- Prévost, M., 1983. Fonte de la neige et interception de la pluie dans la sapinière laurentienne de la forêt Montmorency. Université Laval. Thèse de maîtrise, 68 p.
- Roberge, J., J. Stein, et A.P. Plamondon, 1987. Evaluation d'un modèle de fonte nivale en forêt boréale. *Journal of Hydrology*. (Sous presse).
- Saxton, K.E., 1975. Sensitivity analysis of the combination evapotranspiration equation. *Agric. Meteorol.*, 15: 343-353.
- Stein, J., H.S. Jones, J. Roberge, et W. Sochanska, 1986. The prediction of both runoff quality and quantity by the use of an integrated snowmelt model. *Proc. of the Budapest Symposium. Modelling Snowmelt-Induced Processes*, IAHS Publ. no 155, 347-358.
- World Meteorological Organization, 1982. WMO project for the intercomparison of conceptual models of snowmelt runoff. *Proc. of Exeter Symposium. Hydrological aspects of alpine and high mountain areas*, IAHS Publ. no 138, p. 193-202.

Figure 1: Localisation du bassin du lac Laflamme

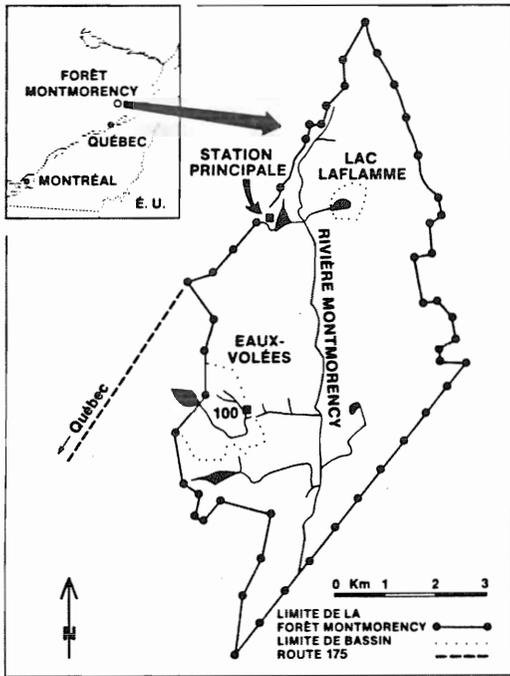


Figure 2: Ecoulements journaliers simulés à partir des intrins horaires et aux 6 heures, 1981

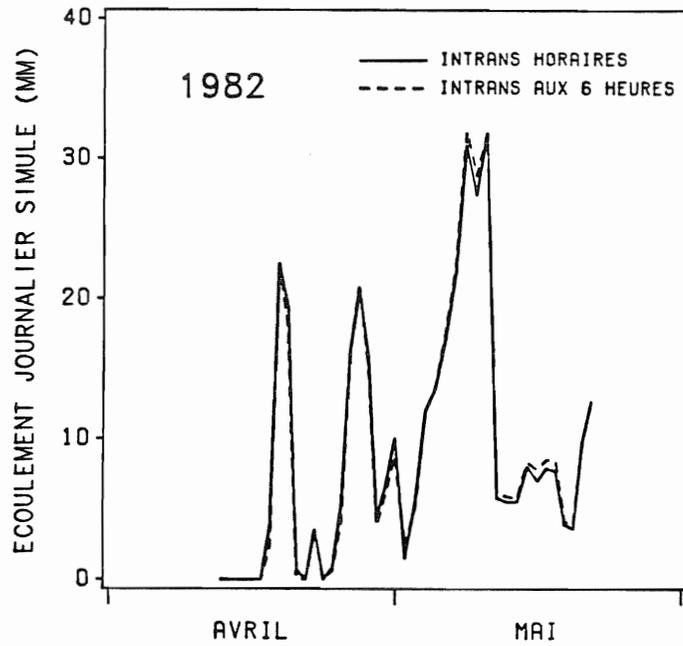


Figure 3: Ecoulements journaliers simulés à partir des intrins aux 6 heures, pluie moyenne aux 6 heures avec état défini et pluie moyenne journalière avec état non-défini

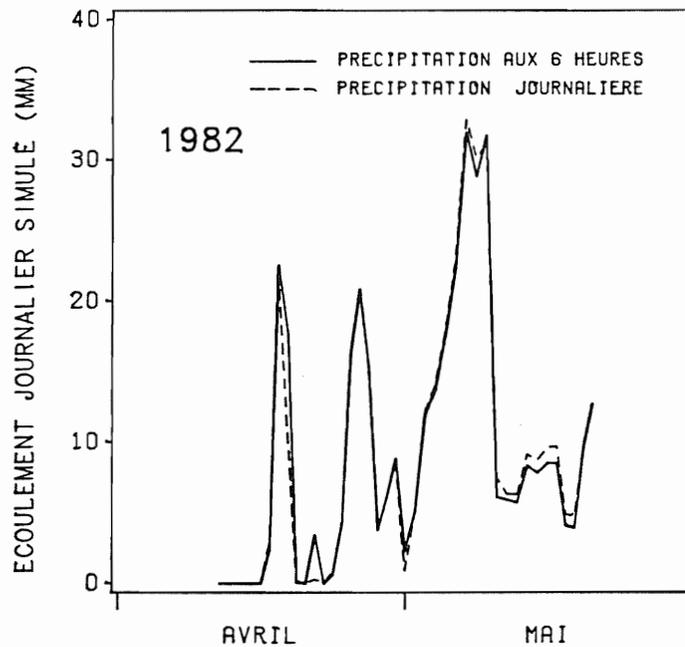


Figure 4: Température moyenne aux 6 heures et simulée à partir de la valeur minimale et maximale journalière (1981 à 1987)

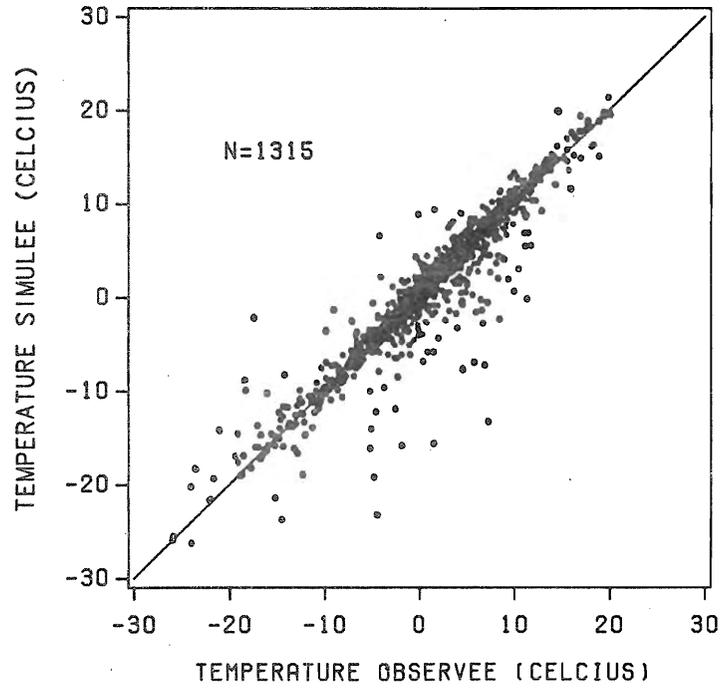


Figure 5: température aux 6 heures moyenne et simulée pour 1992

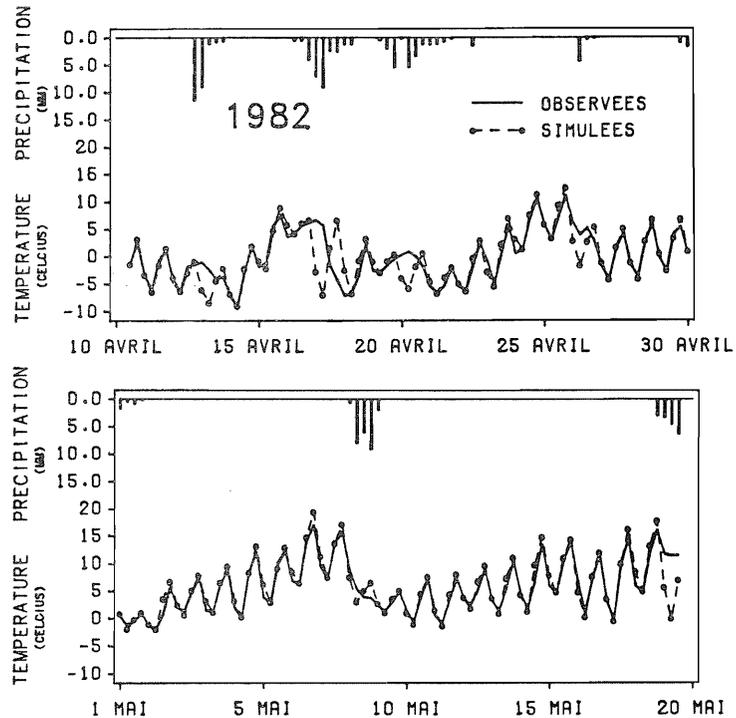


Tableau 1: Caractéristiques des types d'intrants

Type d'intrants	Intervalle de temps		Etat de la précipitation		Précipitation à partir du total de l'intervalle		Température	
	1 hre	6 hres	défini	non-défini	de l'intervalle	journalier	observée	simulée
1	X		X		X		X	
2		X	X		X		X	
3		X		X	X		X	
4		X		X		X	X	
5		X	X		X			X
6		X		X	X			X
7		X		X		X		X

TABLBAU 2: Moyenne des critères d'évaluation pour l'écoulement journalier selon le type d'intrants (1981 à 1987)

TYPE D'INTRANTS	C	Cr	EAM (mm)
2	0,94	0,80	2,1
3	0,87	0,74	2,5
4	0,87	0,75	2,5
5	0,92	0,80	2,3
6	0,87	0,75	2,7
7	0,87	0,74	2,6

1 L'écoulement moyen journalier observé est de 7,4 mm
 C: Coefficient de corrélation de Pearson
 Cr: Coefficient de corrélation de Pearson pondéré par le ratio des écarts-types (McCuen and Snyder, 1975)
 EAM: Erreur absolue moyenne (Bates, 1976)

TABLBAU 3: Erreur absolue moyenne de l'écoulement journalier simulé selon les années et le type d'intrants

Type d'intrants	Erreur absolue moyenne (mm)						
	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
1	1,0(1,4) a ²	2,5(2,6) a	2,2(1,9) c	2,5(3,3) a	2,3(2,4) a	2,6(3,7) a	1,4(2,3) a
2	1,0(1,3) a	2,4(2,5) a	2,2(2,1) c	2,5(3,3) a	2,3(2,1) a	2,6(3,6) a	1,5(2,4) a
3	1,2(1,5) a	2,5(2,5) a	4,5(5,5) ab	3,0(3,7) a	2,1(1,6) a	2,7(3,6) a	1,5(2,4) a
4	1,2(1,3) a	2,7(2,6) a	4,6(5,2) a	2,8(3,5) a	2,3(2,0) a	2,6(3,6) a	1,4(2,2) a
5	1,6(1,7) a	2,7(2,6) a	2,5(2,3) bc	2,8(3,5) a	2,7(2,8) a	2,5(3,5) a	1,5(2,4) a
6	1,9(2,6) a	2,9(2,7) a	3,3(3,5) abc	3,3(3,9) a	3,3(5,0) a	2,6(3,7) a	1,5(2,2) a
7	1,8(1,7) a	2,8(2,6) a	3,1(3,6) abc	3,2(3,7) a	3,2(4,8) a	2,4(3,6) a	1,6(2,5) a
Écoulement moyen observé	4,8	8,9	6,4	8,3	10,9	7,3	5,3

1 Ecart-type de l'erreur absolue moyenne entre parenthèses
 2 Erreur absolue moyenne ayant une même lettre ne sont pas différents significativement (test LSD)

TABLEAU 4: Effet du type d'intrans sur la prédiction à court terme de l'écoulement journalier par rapport aux intrans horaires

Type d'intrans	Conditions météorologiques	Effet
Aux 6 heures	Généralement	Pas de changement
Etat de la précipitation indéfinie par l'utilisateur	Précipitation lorsque la température de l'air aux environs de 0°C	Augmentation de l'erreur de prédiction
Idea	Température de l'air toujours au-dessus ou sous 0°C	Pas de changement
Précipitation calculée à partir de la valeur journalière	Précipitation lors d'une journée avec température de l'air au-dessus et sous 0°C	Augmentation de l'erreur de prédiction
Idea	Température toujours au-dessus ou sous 0°C	Faible changement de l'écoulement journalier
Température simulée à partir de la valeur minimale et maximale journalière	Passage d'une perturbation atmosphérique	Augmentation de l'erreur de prédiction
Idea	Stabilité atmosphérique	Pas de changement significatif

TABLEAU 5: Effet d'une erreur d'évaluation de la température de 1°C sur la fonte (M) calculée à partir de la seconde équation selon la température et la précipitation

T _a (°C)	P _x (mm)					
	2,5	3	4	5	10	15
1	0,47	0,48	0,49	0,50	0,57	0,63
5	0,50	0,51	0,52	0,53	0,60	0,66
6	0,51	0,52	0,53	0,54	0,60	0,67
10	0,54	0,55	0,57	0,58	0,64	0,70
15	0,60	0,61	0,62	0,63	0,69	0,76
20	0,67	0,67	0,68	0,70	0,76	0,82

TABLEAU 6: Effet d'une erreur d'évaluation de la pluie sur la fonte (mm) calculée à partir de la seconde équation selon la température de l'air

T _a (°C)	d P _x (mm)		
	1	5	10
0	0	0	0
1	0,0125	0,0625	0,125
5	0,0625	0,3125	0,625
10	0,125	0,6250	1,25
15	0,1875	0,9375	1,875