

MODÉLISATION DE LA CROISSANCE DE GLACE
DE LAC PAR RÉSEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS
ET ESTIMATION DU VOLUME DE LA GLACE
ABANDONNÉE SUR LES BERGES DES RÉSERVOIRS
HYDROÉLECTRIQUES PENDANT
LES OPÉRATIONS D'HIVER

Rapport de recherche No R-788

Décembre 2005

MODÉLISATION DE LA CROISSANCE DE GLACE DE LAC PAR RÉSEAUX DE
NEURONES ARTIFICIELS ET ESTIMATION DU VOLUME DE LA GLACE
ABANDONNÉE SUR LES BERGES DES RÉSERVOIRS
HYDROÉLECTRIQUES PENDANT LES OPÉRATIONS D'HIVER

Par :

Ousmane Seidou

Massoud Hessami

Taha Ouarda

André St-Hilaire

Laurent Bilodeau

Pierre Bruneau

Bernard Bobée

Chaire en hydrologie statistique Hydro-Québec/CRSNG
Chaire du Canada en estimation des variables hydrologiques

INRS-ETE

490 rue de la Couronne, Québec (Québec) G1k 9A9

Rapport de recherche R-788

Décembre 2005

ISBN 2-89146-507-5

TABLE DES MATIÈRES

1.	INTRODUCTION	1
2.	PROBLÈMES LIÉS À LA PRÉSENCE DE GLACE DANS LES COURS D'EAU	3
3.	LA PROBLÉMATIQUE DE L'ABANDON DE GLACE SUR LES BERGES DES RÉSERVOIRS HYDROÉLECTRIQUES	5
4.	MODELISATION DE LA GLACE EN COURS D'EAU	7
4.1	PROCESSUS DE FORMATION DE LA GLACE	7
4.2	MODÈLES SUR LA FORMATION DE GLACE	8
4.2.1	FORMATION DE LA GLACE DE BORD	8
4.2.2	FORMATION, DISTRIBUTION DE LA TAILLE ET TRANSPORT DU FRAZIL	9
4.2.3	ÉPAISSEUR DE GLACE	9
5.	LES DONNÉES DISPONIBLES	13
5.1	MODÉLISATION DE L'ÉPAISSEUR DE GLACE DE LAC	14
5.2	LA LOI DE STEFAN CLASSIQUE	14
5.3	LA LOI DE STEFAN MODIFIÉE	14
5.4	LES RÉSEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS	15
5.4.1	IDENTIFICATION DES VARIABLES MÉTÉOROLOGIQUES PERTINENTES A UNE STATION	16
5.4.2	MODÈLE NEURONAL VALIDÉ A UNE STATION	17
5.4.3	RÉSEAU DE NEURONES GLOBAL	17
5.5	LES MESURES DE PERFORMANCES	17
6.	CALCUL DU VOLUME D'EAU GÉLÉE ET DÉPOSÉE SUR LES BERGES	19
7.	SITES D'APPLICATION	23
8.	RÉSULTATS ET DISCUSSION	25
8.1	MODÉLISATION DE LA CROISSANCE DE LA GLACE	25
8.2	CALCUL DU VOLUME D'EAU GÉLÉE ET DÉPOSÉE SUR LES BERGES	26
9.	CONCLUSION	29
10.	BIBLIOGRAPHIE	31
11.	LISTE DES SYMBOLES	35
	ANNEXE I. CALCUL DES RADIATIONS SOLAIRES AU DESSUS DE L'ATMOSPHERE	63

ANNEXE II. DESCRIPTION DE LA BASE DE DONNÉES SUR LA GLACE	65
AII.1 MESURES IN SITU	65
AII.2 TÉLÉDÉTECTION	65
AII.3 DONNÉES CLIMATIQUES	66
AII.4 CONSTRUCTION DE LA SÉRIE DE DONNÉES	67
ANNEXE III. INTERFACE ET MODE D'EMPLOI DU PROGRAMME D'IDENTIFICATION DU VOLUME DE GLACE ABANDONNÉE SUR LES BERGES EN HIVER	69
AIII.1 INTRODUCTION	69
AIII.2 PRÉPARATION DES DONNÉES	69
AIII.3 SIMULATION DE L'ÉPAISSEUR DE GLACE	70
AIII.4 SIMULATION DU VOLUME D'EAU GELÉE DÉPOSÉE SUR LES BERGES	71
AIII.5 ORGANISATION DU PROGRAMME	72

LISTE DES FIGURES

Figure 1:	Illustration du phénomène de dépôt de glace sur les berges.....	6
Figure 2:	Localisation des stations de mesure de glace de lac.....	52
Figure 3:	Identification de la phase de croissance de la glace à la station YZF :a) toutes les observations b) phase de croissance.	53
Figure 4:	Réservoir Outardes 4.....	54
Figure 5:	Réservoir Gouin.....	55
Figure 6:	Épaisseur de glace vs cumul des degrés jours à quelques stations de mesure de glace	56
Figure 7:	Variabilité dans l'espace des paramètres de la loi de Stefan Modifiée	57
Figure 8:	Application du modèle Neuronal et de la loi de Stefan à la station YGM (<i>leave one out</i>).....	58
Figure 9:	Paramètres météorologiques et épaisseurs de glace simulées et observées à la station YZF : a) cumul des degrés-jours; b) pluie moyenne pendant la phase de croissance de la glace; c) radiations journalières; d) épaisseur de glace observées et simulés (RNA)	59
Figure 10:	Calcul du volume d'eau immobilisé par gel sur les berges au réservoir Outardes 4: a) épaisseur de glace simulée; b) niveau dans le réservoir; c) volume de glace abandonnée sur les berges; d) diminution du niveau du réservoir.	60
Figure 11:	Calcul du volume d'eau immobilisé par gel sur les berges au réservoir Gouin: a) épaisseur de glace simulée; b) niveau dans le réservoir; c) volume d'eau gelée abandonnée sur les berges; d) diminution du niveau du réservoir.	61
Figure 12:	Emplacement des stations de mesure de glace par rapport aux stations météorologiques	66
Figure 13:	Interface de la base de données.....	68
Figure 14:	Préparation des données météorologiques d'entrée	70
Figure 15:	Simulation de l'épaisseur de glace	71
Figure 16:	Visualisation de la perte de hauteur de chute due au dépôt de glace.....	72

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1:	Liste des stations de mesure de glace de lac	36
Tableau 2:	Liste des combinaisons de variables météorologiques testées	37
Tableau 3:	Performances de la loi de Stefan modifiée	38
Tableau 4:	Critères de performance des réseaux locaux (meilleure combinaison et nombre optimal de neurones sur la couche cachée, leave one out)	39
Tableau 5:	Critères de performance des réseaux locaux (meilleure combinaison et nombre optimal de neurones sur la couche cachée, partition 80%-20% des données)	40
Tableau 6:	Critères de performance du réseau global pour les trois meilleures combinaisons (un neurone en couche cachée, leave one out)	41
Tableau 7:	Volume maximal d'eau gelée et abandonnée sur les berges au réservoir Outardes 4, et diminution de la hauteur de chute par hiver	42
Tableau 8:	Volume maximal d'eau gelée et abandonnée sur les berges au réservoir Gouin, et diminution de la hauteur de chute par hiver	42
Tableau 9 :	Identification des variables météorologiques pertinentes à la station HA1 (leave one out)	43
Tableau 10 :	Identification des variables météorologiques pertinentes à la station WFN (leave one out)	43
Tableau 11 :	Identification des variables météorologiques pertinentes à la station WLH (leave one out)	43
Tableau 12 :	Identification des variables météorologiques pertinentes à la station WTL (leave one out)	44
Tableau 13 :	Identification des variables météorologiques pertinentes à la station YAH (leave one out)	44
Tableau 14 :	Identification des variables météorologiques pertinentes à la station YBT (leave one out)	44
Tableau 15 :	Identification des variables météorologiques pertinentes à la station YBX (leave one out)	45
Tableau 16 :	Identification des variables météorologiques pertinentes à la station YEI (leave one out)	45
Tableau 17 :	Identification des variables météorologiques pertinentes à la station YGM (leave one out)	45
Tableau 18 :	Identification des variables météorologiques pertinentes à la station YIV (leave one out)	46

Tableau 19 :	Identification des variables météorologiques pertinentes à la station YKL (leave one out)	46
Tableau 20 :	Identification des variables météorologiques pertinentes à la station YPY (leave one out)	46
Tableau 21 :	Identification des variables météorologiques pertinentes à la station YVP (leave one out)	47
Tableau 22 :	Identification des variables météorologiques pertinentes à la station YYR (leave one out)	47
Tableau 23 :	Identification des variables météorologiques pertinentes à la station YZF (leave one out)	47
Tableau 24 :	Identification des variables météorologiques (réseau global)	48
Tableau 25 :	Performances du réseau de neurones validé par station (80% calibration, 20% validation)	50
Tableau 26 :	Performances du réseau de neurones global validé par station (80% calibration, 20% validation)	51

1. INTRODUCTION

Ce rapport présente les travaux réalisés dans le cadre du projet de la Chaire en hydrologie statistique portant sur l'influence du couvert de glace sur la conception des ouvrages et des biefs amont. Le projet vise une meilleure connaissance de la dynamique de la glace en rivière et en lac dans le but d'optimiser les contraintes d'exploitation et de maximiser les bénéfices liés à l'exploitation des ouvrages. En effet, la présence de glace dans les cours d'eau pose de nombreuses entraves à leur exploitation, et il serait important de développer des modèles capables de prédire le type (frasil, glace de bord, glace de surface, glace de fond), l'étendue et la localisation de la glace dans un cours d'eau pour en mitiger les impacts négatifs. Bien entendu, la modélisation simultanée de tous ces aspects est une tâche fort complexe et notre recherche sera concentrée sur des méthodes pragmatiques, destinées à une problématique concrète des gestionnaires de barrages.

Les travaux réalisés portent pour le moment sur la glace de lac. Ils portent sur deux des trois volets du projet :

- I. La constitution d'une base de donnée sur l'épaisseur de glace et sur les dates de gel/dégel;
- II. L'estimation du volume de glace immobilisé par gel dans les réservoirs d'Hydro-Québec.

Le troisième volet (régionalisation des paramètres des lois de croissance de la glace de lac) n'a pas beaucoup avancé par manque de données physiographiques pertinentes sur les sites de mesure de glace (en particulier la bathymétrie).

L'approche adoptée pour le premier volet est de trouver un ou plusieurs modèles simples pour la croissance de glace en lac. Pour cela, une revue de littérature sur les modèles de croissance de glace a été effectuée, puis trois modèles simples (la loi de Stefan, une version modifiée de la loi de Stefan et un modèle neuronal) ont été testés sur des données de mesure de glace de lac en provenance de 26 lacs au Canada. Les résultats ont montré que le modèle neuronal et la loi de Stefan modifiée ont des performances équivalentes et supérieures à celles de la loi de Stefan classique.

Une base de données d'épaisseur de glace de lacs et de rivière a également été mise en place dans le cadre du projet. Elle comporte également des valeurs de l'extension du couvert de glace sur les principaux lacs et réservoirs du pays et sera exploitée ultérieurement pour l'étude des dates de gel et de dégel.

Le présent rapport comporte huit parties. Dans la première partie, on présente différents problèmes liés à la présence de glace dans les cours d'eau. Dans la seconde, on présente en détails la problématique du dépôt de glace sur les berges des réservoirs hydroélectriques tandis que la troisième partie est une brève revue de littérature sur le processus de formation des différents types de glace et des différents modèles disponibles dans la littérature scientifique pour décrire ce processus. Dans la quatrième partie, on présente les données utilisées pour calibrer les modèles de croissance de glace sélectionnés tandis que la cinquième partie est consacrée à la description détaillée des modèles simples de croissance de glace sélectionnés. On établit dans la sixième partie l'équation utilisée pour calculer le volume de glace abandonné sur les berges des réservoirs hydroélectriques en hiver, et on décrit dans la septième les deux sites d'application (le réservoir Gouin et le réservoir Outardes 4). La huitième partie est consacrée aux résultats et à la discussion. Finalement, une conclusion et les perspectives de développements ultérieurs sont présentées.

2. PROBLÈMES LIÉS À LA PRÉSENCE DE GLACE DANS LES COURS D'EAU

La présence de glace en hiver complique l'exploitation des ressources en eau de diverses façons : entrave à la navigation, inondations dues aux embâcles, réduction de la capacité d'écoulement des rivières (et donc de leur capacité à produire de l'hydroélectricité), blocage des prises d'eau, gel des vannes des centrales hydroélectriques et réduction de leur hauteur de chute jusqu'à 25% (Martin 1981), dommages aux structures et aux berges, etc.

Le trafic sur les voies navigables peut être considérablement ralenti ou même arrêté lorsque l'épaisseur de glace est trop importante, obligeant les administrations concernées à adopter de coûteuses politiques de gestion de la glace incluant des mesures structurelles (principalement des ouvrages de rétention) et non structurelles (bris de la glace par des moyens mécaniques ou thermiques, épandage de produits pour faire fondre la glace, etc.).

En hiver, moment de forte demande en électricité, le débit turbiné ne peut être augmenté qu'avec précaution de peur de causer des embâcles et des inondations. On est alors obligé de faire appel à des sources d'énergie d'appoint (centrales thermiques) plus dispendieuses pour satisfaire la demande énergétique. Une meilleure connaissance des conditions qui influencent la formation et le bris de la couche de glace permettrait de fixer de façon sécuritaire et optimale le soutirage en hiver. D'autre part, si le réservoir est peu profond, la fraction de la réserve utile immobilisée par gel peut être relativement importante et fausser la courbe d'emmagasinement utilisée pour la planification de la production hydroélectrique.

L'épaisseur de glace est également influée sur la sécurité de certaines activités récréatives très populaires (motoneige, patinage, pêche) et il est important de pouvoir prédire l'impact d'une modification de l'aménagement des cours d'eau sur ces activités.

3. LA PROBLÉMATIQUE DE L'ABANDON DE GLACE SUR LES BERGES DES RÉSERVOIRS HYDROÉLECTRIQUES

L'hiver est une période de forte demande en électricité avec des apports naturels relativement peu élevés. De plus, les gestionnaires veillent à vider le réservoir au maximum vers la fin de l'hiver pour pouvoir contenir sans danger la crue de printemps. De ce fait, le niveau des réservoirs hydroélectriques du Québec baisse systématiquement en hiver pour remonter pendant le dégel. La partie du couvert de glace correspondant aux parties dénudées est alors abandonnée sur les berges et ne peut plus être utilisée pour la production hydroélectrique (contrairement à la glace flotte encore et qui participe à la hauteur de chute grâce à son poids). L'ampleur de ce phénomène (illustré à la Figure 1) est jusqu'ici non évaluée et on ignore à quel point il influe sur les courbes d'emmagasinement utilisées pour la planification hydroélectrique, et dans quelles proportions il réduit le potentiel de production d'électricité. Le National Research Council of Canada (1990) signale des réservoirs peu profonds dont la totalité de la réserve utile a gelé pendant l'hiver.

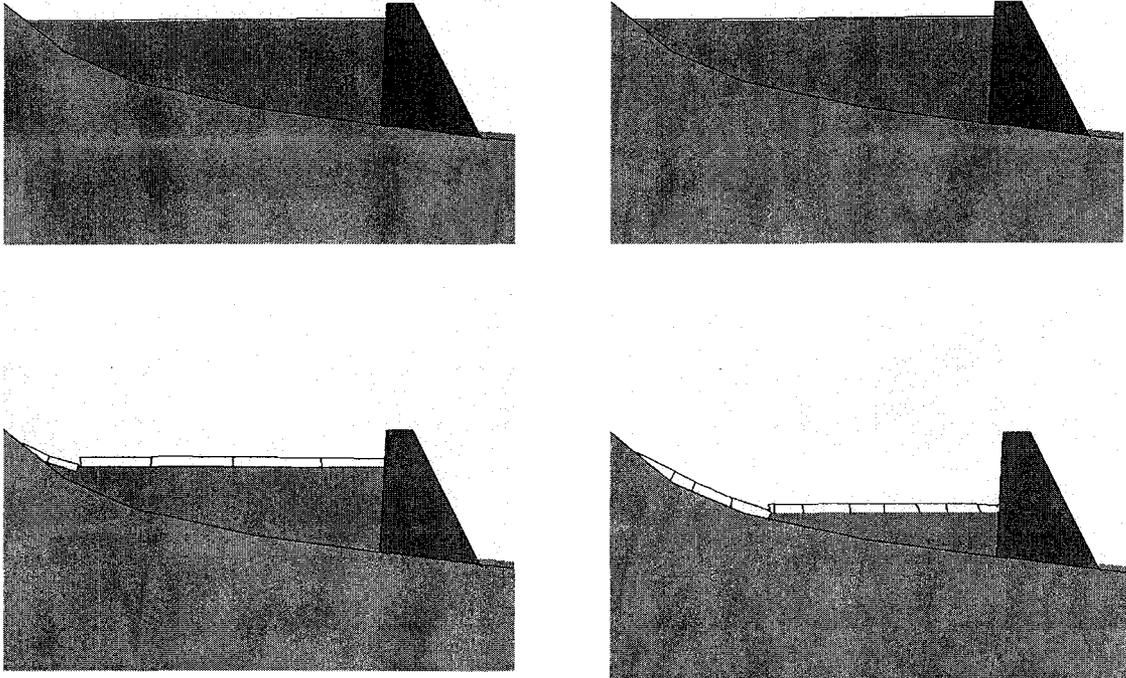


Figure 1: Illustration du phénomène de dépôt de glace sur les berges

4. MODELISATION DE LA GLACE EN COURS D'EAU

4.1 PROCESSUS DE FORMATION DE LA GLACE

La glace se forme en un point d'un cours d'eau quand la température en surface descend sous une valeur critique inférieure à 0°C et d'autant plus basse que le niveau de turbulence local est élevé. En effet, la turbulence entraîne un mélange perpétuel entre la couche superficielle et les couches inférieures moins froides, contrariant ainsi la formation cristaux de glace à la surface. C'est pourquoi les plaques de glace commencent généralement sur les bords, autour des obstacles, et dans les régions à basse vitesse pour croître ensuite progressivement vers le centre du cours d'eau. Si l'eau est particulièrement calme, ou la température très basse, des feuilles de glace peuvent également se former ailleurs que sur les berges. Ce processus peut se produire même quand la température de la masse d'eau est légèrement supérieure à 0°C.

Lorsque la température des couches inférieures atteint le point de congélation, il y'a formation de frasil (cristaux de glace en suspension de 1-4 mm de diamètre). Les particules de frasil adhèrent les unes aux autres, formant les "rochers" ou "flocons" de frasil qui flottent et remontent à la surface. Cette propriété d'adhérence de particules entraîne habituellement la formation de radeaux de glace, de barrages suspendus ou de glace de fond (Le sous-comité responsable des glaces de cours d'eau du Nouveau-Brunswick 1989). La glace de fond se forme quand la turbulence est assez forte pour entraîner le frasil ou de l'eau à très basse température jusqu'au fond du lit de la rivière.

L'agglomération du frasil finit par former, grâce à l'eau entre les parties qui gèle, la première couche de glace stable à la surface du cours d'eau. Une fois formée, cette glace commence à s'accroître vers le bas en gelant à l'interface de la glace et de l'eau. Cette croissance est principalement due aux pertes thermiques, mais peut également être alimentée par l'apport de frasil au dessous de la couche de glace et par le gel des couches inférieures de la neige au dessous.

4.2 MODÈLES SUR LA FORMATION DE GLACE

En plus de causer des inondations dues aux embâcles, la présence de glace en hiver sur les cours en hiver pose de nombreuses entraves à leur utilisation. Dans le but de planifier cette utilisation, des modèles numériques ont été développés pour prédire l'état du couvert de glace à plus ou moins longue échéance. Certains de ces modèles s'appliquent à une phase spécifique du développement de la glace comme la date d'apparition de la glace dans l'eau (Schulyakovskii, 1966), la croissance de glace de bord (Matousek, 1984; Svensson *et al.*, 1989), la formation de frasil (Omstedt, 1985a, 1985b; Omstedt, 1986; Svensson et Omstedt, 1994), et l'épaississement de la couche de glace (ex. Beltaos, 1995; Schulyakovskii, 1966; Lock, 1990); etc.). D'autres, plus complets simulent la formation, le transport, la croissance et la fonte de la glace (Shen et Chiang 1984, 1986; Shen *et al.* 1990; Shen *et al.* 1995). Tous utilisent le bilan énergétique pour prédire l'évolution de la glace, et se différencient par le niveau de détail avec lequel ils modélisent les différents aspects du phénomène: hydraulique, transfert de chaleur et radiations. La formule empirique la plus utilisée est la formule de Stefan qu'on retrouve en simplifiant les équations obtenues par bilan énergétique (voir par ex. Lock 1990).

4.2.1 FORMATION DE LA GLACE DE BORD

Svensson *et al.* (1989) ont développé un modèle bidimensionnel qui leur permet d'obtenir répartition de la vitesse et de la température sur le cours d'eau étudié. Deux conditions doivent être remplies pour que la glace se forme :

- Condition thermodynamique: la température de la surface l'eau atteint point de congélation (0°C).
- Condition mécanique: la surface de l'eau connaît un refroidissement supplémentaire (supercooling) supérieur a une valeur critique qui dépend de la turbulence locale. La valeur critique est estimée à l'aide d'une formule semi empirique.

Après ajustements, le modèle a assez bien reproduit les observations sur le terrain (rivière Lule, Suède). Michel *et al.* (1982) ont utilisé des observations sur la rivière Ste Anne et ont proposé une formule empirique pour la croissance de la glace de bord en eau froide.

4.2.2 FORMATION, DISTRIBUTION DE LA TAILLE ET TRANSPORT DU FRAZIL

La modélisation de la formation du frazil est importante pour prédire l'épaisseur initiale de glace, qui est une donnée requise pour plusieurs modèles numériques comme par exemple ICETHK développé par l'U.S. Army (Tuthill *et al.*, 1998). La connaissance de ses mouvements permet d'anticiper et de lutter contre ses effets négatifs sur les ouvrages hydroélectriques (blocage des prises d'eau et réduction de la hauteur de chute, par exemple). Il est généralement accepté que l'apparition du frazil est initiée par des particules introduites dans l'eau à l'interface air-eau, mais leur origine et le mécanisme précis de nucléation n'est pas connu (Beltaos 1995). En dépit du caractère fragmentaire des connaissances qu'on a des processus physiques, des modèles simplifiés basés sur la théorie de la couche limite ont été développés pour la formation du frazil en mer (Omstedt et Svensson 1984; Omstedt 1985; Svensson et Omstedt 1994). Une formule empirique pour les conditions d'apparition du frazil en rivière a été proposée par Matousek (1984).

4.2.3 ÉPAISSEUR DE GLACE

L'épaisseur du couvert de glace est l'un des aspects le plus couramment modélisé, que ce soit par les formules empiriques (Beltaos 1995); Shulyakovskii 1966; loi de Stefan) que par les modèles thermodynamiques (exemple Stefan and Fang, 1997; Fang *et al.*, 1996; Duguay *et al.* 2003). Pour les lacs canadiens, Menard *et al.* (2002a, 2002b) ont utilisé un modèle unidimensionnel appelé CLIMO (Canadian Lake Ice Model) qui calcule le profil vertical des températures en résolvant l'équation de la chaleur, et en tenant compte des radiations solaires pénétrant la masse d'eau, du couvert de glace et de l'épaisseur de neige sur la glace. CLIMO est une version modifiée d'un modèle unidimensionnel de glace de mer (Flato and Brown, 1996) et a été décrit en détails dans Duguay *et al.* (2003). Les données d'entrée au modèle sont les températures

moyennes journalières, la vitesse du vent, l'humidité relative, la couverture nuageuse, l'épaisseur de glace au sol et la latitude du lac. Les sorties sont les dates de gel/dégel et l'épaisseur de glace. Dans Menard *et al.* (2002a), CLIMO a été utilisé pour simuler la croissance de glace à la station YZF (Back Bay) pour la période 1960-1991, et il a reproduit l'épaisseur de glace avec un *rmse* de 9 cm. Ils ont également simulé l'épaisseur de glace pour les années 1977-1990 à la station YFL (Fort Reliance) et obtenu un *rmse* de 18 cm.

Un autre modèle thermodynamique de glace de lac est utilisé dans Fang *et al.* (1996) et Stefan et Fang (1997) pour simuler l'épaisseur de glace et les dates de gel/dégel sur des lacs situés au Minnesota, États-Unis. Le modèle résout l'équation de la chaleur selon un axe vertical et utilise le mélange des couches de surfaces provoqué par le vent et la température de l'eau comme critère de début de formation du couvert de glace. Dans Fang *et al.* (1996), le *rmse* des prédictions était de 2cm (pour une épaisseur de glace maximale observée de 55 cm) quand ce modèle a été validé sur le lac Ryan situé au Minnesota, États-Unis. Dans Stefan et Fang (1997), le modèle a été utilisé sans calibration pour simuler l'impact d'un réchauffement global (2×CO2) sur l'écosystème d'un ensemble de lacs.

Ce type de modèles demande des types de données qui ne sont pas facilement disponibles, à moins qu'il n'y ait une station météorologique près du site. Par conséquent, en pratique, ce sont des formules empiriques qui sont utilisées; on ne présente ici que quelques formules simples proposées par différents auteurs : Beltaos (1995), Shulyakovskii (1966) et la loi de Stefan. Elles sont plus intéressantes dans le contexte actuel que les modèles plus complexes parce qu'elles requièrent peu de données. D'après Beltaos (1995), une fois un couvert de glace stable formé, sa croissance est déterminée par la différence entre les flux de chaleur aux interfaces glace-air et glace-eau :

$$\rho_i \lambda \frac{dh_i}{dt} = \frac{T_m - T_a}{\left(\frac{h_i}{k_i}\right) + \frac{1}{C_a} + \left(\frac{h_s}{k_s}\right)} - Q_w \quad [1]$$

où :

- T_a et T_m sont les températures moyennes de l'eau et de l'air.
- k_i et k_s sont les conductivités thermiques de la glace (2.2W/m °C) et de la neige (0.1 à 0.5W/m °C)
- h_i et h_s sont les épaisseurs de glace et de neige (cm)
- C_a est le coefficient de transfert de chaleur de la glace vers l'air (W/m2. °C)
- ρ_i est la densité de la glace (kg/m³) ;
- λ est la chaleur latente de fusion de la glace (J/Kg).
- Q_w est le flux de chaleur de l'eau vers la glace (W).

En utilisant le bilan énergétique, Shulyakovskii (1966) dérive une formule qui s'applique dans les conditions suivantes :

- 1 il est possible de négliger l'apport de chaleur due aux couches inférieures de l'eau.
- 2 il n'y a pas de formation de glace par solidification de la neige.
- 3 il n'y a pas d'accumulation de glace sous le couvert.

L'épaisseur de glace n jours après la phase de formation d'un couvert stable est alors :

$$h_{ic} = -\frac{k_i}{k_s} h_i + \sqrt{\left(h_{i0} + \frac{k_i}{k_s} h_{s0}\right)^2 + \frac{2k_i}{\lambda\rho_i} 86400 \sum_{k=1}^n T_k} \quad [2]$$

où :

- h_{i0} et h_{s0} sont les épaisseurs initiales de glace et de neige;
- T_k est la température moyenne k jours après la formation du premier couvert stable.

La loi de Stefan est une loi plus simple très souvent utilisée en ingénierie et qui peut être déduite de l'équation [1] en négligeant les termes $1/C_a$, h_s/k_s et Q_w ou encore de l'équation [2] en supposant que $h_{i0} = 0$ et $h_{s0} = 0$. Elle s'énonce :

$$h_i = k\sqrt{D_f} \quad [3]$$

où :

- h_i est l'épaisseur de la couche de glace (cm);
- D_f la somme des degrés jours de gel ($^{\circ}\text{C}\times\text{Jour}$).

Le facteur k a une valeur théorique (déduite de [1]) égale à $\frac{2k_i}{\rho_i\lambda}$ ($3.5 \text{ cm}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{Jour})^{0.5}$),

mais cette valeur doit être réduite pour tenir compte des conditions d'exposition et de l'insolation de surface. Les valeurs usuelles de k sont de $2.7 \text{ cm}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{Jour})^{0.5}$ pour les lacs sans neige, 1.7 à $2.4 \text{ cm}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{Jour})^{0.5}$ pour les lacs avec couvert de neige, 1.4 à $1.7 \text{ cm}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{Jour})^{0.5}$ pour les rivières avec couvert de neige, et 0.7 à $1.4 \text{ cm}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{Jour})^{0.5}$ pour les petites rivières avec un écoulement rapide (Beltaos, 1995). Du fait de l'exposant 0.5 dans l'équation [3], la formule de Stefan donne des résultats erronés pour des petites valeurs de h_i .

5. LES DONNÉES DISPONIBLES

Les données de mesure de glace proviennent du Service Canadien des Glaces qui les met à la disposition du public sur son site Internet (<http://ice-glaces.ec.gc.ca>). Elles proviennent de deux programmes consécutifs de mesures d'épaisseur de glace : le programme initial qui porte sur 195 sites comprend les mesures d'épaisseur de glace et de la neige prises depuis l'installation des premières stations de l'arctique en 1947. Le nombre de relevés varie considérablement selon le nombre d'années d'activité des stations. Certaines stations sont en opération depuis plus de 50 années. Un certain nombre de stations font également des observations météorologiques et des mesures de radiation. Les relevés postérieurs à 1992 contiennent de l'information supplémentaire dont la topographie de la glace, les ouvertures dans la glace ainsi que méthode d'observation. Par le début de 2002, la plupart des stations du programme initial ne prenaient plus de mesures en raison des compressions budgétaires au début des années 90. Un nouveau programme a été instauré à l'automne 2002 pour répondre à un intérêt croissant de mise à jour de ces données historiques en vue de leur utilisation dans les études de changements climatiques. 53 de ces sites sont identifiés comme des sites grâce à la Base de Données Canadienne des Glaces (Lenormand et al. 2002). Cette base de données est disponible sur le site Internet du CRYSYS (<http://www.ccin.ca>). Seules 26 de ces 53 stations comportent un nombre suffisant d'observation par an pour calibrer une loi comme celle de Stefan. La liste de ces stations est donnée au tableau 1 et leur localisation géographique à la figure 2.

Comme les stations de mesure de glace ne coïncident pas avec les stations météorologiques, la température à une date donnée est obtenues par la méthode des quatre quadrants : un programme informatique recherche la station météorologique la plus proche successivement au nord-est, au nord-ouest, au sud ouest et au sud-est. La température au site de mesure de glace est considérée comme la moyenne pondérée des températures aux stations météorologique. Les facteurs de pondération sont inversement proportionnels aux distances du site de mesure aux stations météorologiques.

Les valeurs d'épaisseur de glace mesurées diminuent rapidement au printemps avec les premières températures positives. Comme la phase que nous voulons modéliser est la phase de croissance de la glace, on a isolé celle en utilisant une règle empirique qui consiste ne garder que les mesures inférieures ou égales à la moyenne des mesures subséquentes effectuées au cours du même hiver. On a illustré à la Figure 3 La différence entre l'ensemble des observations (2a) et l'ensemble des observations retenues (2b) à la station YZF.

5.1 MODÉLISATION DE L'ÉPAISSEUR DE GLACE DE LAC

Trois modèles ont été testés sur les données de croissance de glace : la loi de Stefan classique, la loi de Stefan modifiée et les réseaux de neurones artificiels (RNA). Chacun de ces trois modèles est calibré (entraîné pour les RNA) sur la moitié des données disponibles. La seconde moitié des données set utilisée pour valider le modèle.

5.2 LA LOI DE STEFAN CLASSIQUE

C'est la formule la plus utilisée en ingénierie du fait de sa simplicité :

$$h = k\sqrt{D_f} \quad (k \text{ constant}) \quad [4]$$

5.3 LA LOI DE STEFAN MODIFIÉE

La loi de Stefan suppose que la croissance de glace commence dès la première température négative, ce qui n'est pas toujours le cas si on trace l'épaisseur de glace en fonction du cumul de degrés-jours avec les valeurs tirées de la base de donnée du projet. On a donc légèrement modifié la formule pour tenir compte du décalage entre la première température négative et la date du début de croissance effective de la glace :

$$h_i = k\sqrt{C + Df_i} \quad [5]$$

où C est une constante qui dépend du site.

5.4 LES RÉSEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS

LES RÉSEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS

Un réseau de neurones artificiels (RNA) est un ensemble de neurones formels (d'unités de calcul simples, de noeuds processeurs) associés en couches (ou sous-groupes) et fonctionnant en parallèle. Dans un réseau, chaque sous-groupe fait un traitement indépendant des autres et transmet le résultat de son analyse au sous-groupe suivant. L'information donnée au réseau va donc se propager couche par couche, de la couche d'entrée à la couche de sortie, en passant soit par aucune, une ou plusieurs couches intermédiaires (dites couches cachées). Les RNA ont la capacité de stocker de la connaissance empirique et de la rendre disponible à l'usage. Les habiletés de traitement (et donc la connaissance) du réseau vont être stockées dans les poids synaptiques, obtenus par des processus d'adaptation ou d'apprentissage. En ce sens, les RNA ressemblent donc au cerveau car non seulement, la connaissance est acquise au travers d'un apprentissage mais de plus, cette connaissance est stockée dans les connexions entre les entités, soit dans les poids synaptiques. Les RNA ont été utilisés dans presque tous les domaines scientifiques pour modéliser des phénomènes pour lesquels on dispose des observations sont disponibles, mais peu ou pas de connaissances scientifiques pour construire un modèle détaillé. Par contre, c'est un modèle de type « black box » pour lequel l'utilisateur n'a pas d'emprise sur le fonctionnement interne, et ils peuvent être très mauvais en généralisation surtout en quand le nombre de neurones est élevé pour la complexité du problème traité (overfitting). En hydrologie, les RNA ont été utilisés entre autres pour la classification des données hydrologiques (e.g. Liang et Hsu 1994), la prévision des débits des rivières (e.g. Asaad 1997), l'évaluation et la prévision de la quantité et de la qualité de l'eau (e.g. Wen et Lee, 1998; Zhang et al. 1994), l'estimation des précipitations (e.g. Xiao et Chandrasekar 1997), la prévision des apports naturels aux réservoirs d'irrigation ou de production hydroélectrique (e.g. Coulibaly et al 2000).

MÉTHODOLOGIE DE CONSTRUCTION DES MODÈLES

Afin d'estimer l'épaisseur de glace, nous avons utilisé un algorithme basé sur les réseaux de neurones artificiels (RNA). Le RNA utilisé est un perceptron multicouche avec une couche des trois neurones sigmoïdes et une couche de neurone linéaire. La quantité modélisée par réseaux de neurones est le taux de croissance du carré de la glace $\frac{h^2}{DJ}$ en fonction des degrés-jours (lorsqu'on a tenté de modéliser directement h , on en a trouvé qu'il était peu ou pas sensible aux variables météorologiques). Les variables explicatives considérées sont:

- Radiation solaire totale des jours sans couverture nuageuse Rad_{nc} ($W \times Jour/m^2$) pendant la période de croissance de la glace, divisée par les degrés-jours.
- Radiation solaire totale des jours avec couverture nuageuse Rad_c ($W \times Jour/m^2$) pendant la période de croissance de la glace, divisée par les degrés-jours.
- Pluie moyenne pendant la croissance de la glace (mm)
- Épaisseur de neige moyenne au sol (cm)
- Degrés-jours de gel DJ

Comme les radiations solaires sont atténuées les jours avec couverture nuageuses, on a considéré en plus de la pluie et de la neige plusieurs combinaisons de Rad_{nc} et de Rad_c : Rad_{nc} , $Rad_{nc}+0.25 Rad_c$, $Rad_{nc}+0.50 Rad_c$, $Rad_{nc}+0.75 Rad_c$, $Rad_{nc}+ Rad_c$. On obtient les 23 combinaisons de variables météorologiques présentées au tableau 2.

En plus de ces variables, on considèrera la longitude et la latitude lorsqu'on cherchera à construire un réseau de neurones général (pour toutes les stations).

5.4.1 IDENTIFICATION DES VARIABLES MÉTÉOROLOGIQUES PERTINENTES A UNE STATION

Pour chaque combinaison de variables météorologiques, on éliminera successivement chacune des n années et on entraînera le réseau de neurones sur le reste des données. On estime ensuite avec le réseau les hauteurs de glace pour l'année qui a été éliminée. On obtient ainsi une estimation pour chacune des observations. Les critères

de performance ($rmse$, r^2 , $rrmse$, $nash$, $biais$, $rbiais$) sont ensuite utilisés pour déterminer quelle combinaison de variables météorologiques permet de mieux expliquer les données. On fait également une itération sur la structure du réseau (nombre de neurones de la couche cachée) afin de trouver le meilleur réseau de neurones. *Il faut noter qu'on n'obtient pas de réseau de neurones validé à cette étape.*

5.4.2 MODÈLE NEURONAL VALIDÉ A UNE STATION

Une fois la bonne structure du réseau de neurones et les bonnes variables météorologiques identifiées, on divise les données en deux parties contenant respectivement 80% et 20% des observations. La première partie est utilisée pour entraîner le réseau tandis que la deuxième est utilisée pour la validation. La répartition des données entre les ensembles de calibration et de validation est faite de façon aléatoire. L'opération est exécutée plusieurs fois et on retient la plus performante (plus petit $rrmse$ du réseau de neurones dans notre cas).

5.4.3 RÉSEAU DE NEURONES GLOBAL

On procède de la même façon que précédemment sauf qu'on élimine une station et non une année de données. Le modèle neuronal validé est obtenu de la même façon, en entraînant le réseau de neurones choisi sur 80% des observations, et en le validant sur les 20% restants.

5.5 LES MESURES DE PERFORMANCES

Les mesures de performance choisies sont l'erreur quadratique moyenne ($rmse$), l'erreur quadratique moyenne relative ($rrmse$), le critère de nash ($nash$), le biais ($biais$). Si $[h_1, \dots, h_n]$ est le vecteur des épaisseurs de glace observées sur un site, $[\hat{h}_1, \dots, \hat{h}_n]$ le vecteur des épaisseurs de glace simulée avec l'un des trois modèles et n le nombre de mesures, les critères de performance s'écrivent :

$$rmse = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_i - \hat{h}_i)^2 \quad [5]$$

$$rrmse = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{h_i - \hat{h}_i}{\bar{h}} \right)^2 \quad [6]$$

$$r^2 = \frac{\text{cov}([h_1, \dots, h_n], [\hat{h}_1, \dots, \hat{h}_n])^2}{\text{var}([h_1, \dots, h_n]) \text{var}([\hat{h}_1, \dots, \hat{h}_n])} \quad [7]$$

$$biais = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_i - \hat{h}_i) \quad [8]$$

$$nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \hat{h}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2} \quad [9]$$

6. CALCUL DU VOLUME D'EAU GÉLÉE ET DÉPOSÉE SUR LES BERGES

Dans cette section, une expression simple est dérivée pour évaluer le taux de dépôt de la glace flottante sur les berges d'un réservoir pendant les opérations d'hiver. On assume que le volume d'eau stocké dans le réservoir est progressivement utilisé pendant l'hiver de façon que, globalement, le niveau de l'eau descende. La glace apportée dans le réservoir par les rivières est ignorée. La chute de neige sur la glace est également négligée. Le couvert de glace est vu comme une feuille flottante d'épaisseur uniforme à un instant donné. Quand le niveau descend, une partie de ce couvert de glace se retrouve immobilisée sur les berges.

Le volume total de glace sur le réservoir et ses berges peut être décrit comme :

$$V_{TOTAL} = V_I + V_G \quad [10]$$

où V_{TOTAL} représente toute la glace qui a été formée par gel de l'eau dans le réservoir, V_I le volume de la glace flottante, et le V_G le volume de glace abandonné sur les berges.

De ces trois variables, seule V_I peut être aisément calculée à tout moment. Soit A_I la surface du couvert de glace, et H_I son épaisseur. Le volume de glace flottante s'écrit alors :

$$V_I = A_I H_I \quad [11]$$

Les autres termes peuvent être obtenus par intégration dans le temps, en tenant compte des conditions initiales ($V_{TOTAL} = V_G = 0$). En particulier, nous sommes intéressés par le volume de glace déposé au sol V_G . La dérivée par rapport au temps de [10] est:

$$\frac{\partial V_{TOTAL}}{\partial t} = \frac{\partial V_I}{\partial t} + \frac{\partial V_G}{\partial t} \quad [12]$$

Analysons maintenant l'équation [12]. V_{TOTAL} peut croître et décroître à cause des variations de l'épaisseur de glace flottante. La glace déposée n'est pas en contact avec

l'eau liquide pour croître, et nous avons choisi de négliger les précipitations. On néglige également la fonte étant donné qu'on étudie la période la plus froide de l'hiver. Par conséquent, le taux de changement du volume total de glace est:

$$\frac{\partial V_{TOTAL}}{\partial t} = A_I \frac{\partial H_I}{\partial t} \quad [13]$$

Considérons maintenant la dérivée par rapport au temps du volume de glace flottante VL. La dérivation par rapport au temps de l'équation [11] donne :

$$\frac{\partial V_I}{\partial t} = A_I \frac{\partial H_I}{\partial t} + H_I \frac{\partial A_I}{\partial t} \quad [14]$$

Le premier terme à droite dans [14] est le taux de croissance du couvert de glace dû à l'épaississement du couvert de glace, que nous avons déjà vu dans l'équation [12]. On peut donc substituer [13] et [14] dans [12] pour obtenir une expression de VG en fonction de variables qui peuvent être estimées :

$$\frac{\partial V_G}{\partial t} = -H_I \frac{\partial A_I}{\partial t} \quad [15]$$

Cette expression peut être utilisée en la transformant en une expression équivalente de différences finies, qui sera ensuite intégrée:

Soit $S(z)$ la courbe d'emménagement du réservoir. On a $\frac{\partial S(z)}{\partial z} > 0$. Soit $Y_S(t)$

l'élévation du niveau du réservoir, et $Y_B(t)$ l'élévation de la surface inférieure du couvert de glace. On a :

$$Y_B(t) = Y_S(t) - H_I(t) \quad [16]$$

Et par conséquent, la surface de glace flottante est:

$$A_I = S(Y_B(t)) = S(Y_S(t) - H_I(t)) \quad [17]$$

La relation [16] peut maintenant être différenciée par rapport au temps et introduite dans [14] pour obtenir une nouvelle expression du taux de changement du volume de glace déposée, sachant que les dérivées partielles de $S(z)$ par rapport à x et y sont nulles:

$$\frac{\partial V_G}{\partial t} = \left(H_I \frac{\partial S}{\partial z} \right) \frac{\partial H_I(t)}{\partial t} - \left(H_I \frac{\partial S}{\partial z} \right) \frac{\partial Y_S(t)}{\partial t} \quad [18]$$

où $\frac{\partial S}{\partial z}$ est évaluée à $z = Y_B$, la surface inférieure du couvert de glace.

L'équivalent en différences finies de l'expression [14] est :

$$V_G(t + \Delta t) - V_G(t) = \left(S(Y_B(t + \Delta t)) - S(Y_B(t)) \right) \cdot \frac{H_I(t + \Delta t) + H_I(t)}{2} \quad [19]$$

7. SITES D'APPLICATION

Le calcul du volume de glace abandonné sur les berges a été faite sur deux réservoirs : Le réservoir Outardes 4 dont la localisation est donnée à la figure 4 et le réservoir Gouin (figure 5). Le réservoir Outardes 4 est un réservoir très allongé du nord au sud tandis que le réservoir Gouin est très large et très ramifié. Il est donc probable que les épaisseurs de glace seront différentes selon la partie du réservoir qu'on considère. Trois points différents ont été utilisés sur le réservoir Outardes 4: Outardes 4 nord (longitude $-69^{\circ}13'30''$; latitude $50^{\circ}32'50''$), Outardes 4 sud (longitude $-68^{\circ}59'20''$; latitude $50^{\circ}06'48''$) et la centrale Outardes 4 (longitude $-68^{\circ}54'28''$; latitude $49^{\circ}42'2''$). Quant au réservoir Gouin, 7 points répartis sur tout le réservoir ont été considérés: leurs coordonnées géographiques (Lon. ; Lat.) sont respectivement ($-75^{\circ} 25' 00''$; $48^{\circ} 24' 00''$), ($-75^{\circ} 06' 00''$; $48^{\circ} 14' 00''$), ($-74^{\circ} 27' 00''$; $48^{\circ} 15' 00''$), ($-74^{\circ} 06' 00''$; $48^{\circ} 21' 00''$), ($-74^{\circ} 36' 00''$; $48^{\circ} 48' 00''$), ($-75^{\circ} 05' 00''$; $48^{\circ} 40' 00''$) et ($-74^{\circ} 51' 00''$; $48^{\circ} 33' 00''$) . L'épaisseur de glace est en moyenne 1.86 cm (resp. 5.42 cm) plus élevée à Outardes 4 Sud (resp. Outardes 4. Nord) par rapport à la centrale. Au niveau du réservoir Gouin, les épaisseurs de glace simulées sont 1.88 cm (resp. 1.43 cm, 0.71 cm) plus élevées au point 1 (resp. 4, 5) qu'au point 7, et 1.55 cm, 0.69 cm et 0.23 cm plus basses aux points 2, 3 et 6. Ces résultats sont basés sur les dates pour lesquelles on a une estimation de l'épaisseur de glace en chaque paire de points. Le calcul des volumes de glace immobilisés sur les berges des réservoirs est basé sur la moyenne des valeurs simulées.

8. RÉSULTATS ET DISCUSSION

8.1 MODÉLISATION DE LA CROISSANCE DE LA GLACE

Le premier constat est que la loi de Stefan modifiée modélise remarquablement bien la croissance de glace lorsqu'elle est calibrée pour un site. A la figure 6 on a représenté pour quelques unes des stations les données observées et les données simulées par la loi de Stefan dont les paramètres ont été estimés par la méthode des moindres carrés sur 80% des données. La concordance est très bonne entre les données simulées et les observations. Toutefois, les paramètres C et k sont très variables de lac en lac et on ne sait par quels paramètres utiliser pour un lac sans observations (voir Figure 7). Les paramètres de la loi ainsi trois critères de performance ($rmse$, r^2 et $biais$) sont donnés au Tableau 3. A la station YZF, elle donne des $rmse$ de 6.57 cm en calibration et 13.80 cm (12.48 cm pour le modèle neuronal local) en validation pour les années 1958-1996 et 2002-2003. elle donne un $rmse$ de 14.10 cm (14.31 cm pour le modèle neuronal local) sur les données des années 1960-1991 contre 9 cm pour le modèle déterministe CLIMO (Ménard et al. 2002a, 2002b). Les modèles performant légèrement mieux que CLIMO sur les données des années 1977-1990. Le $rmse$ était de 17.10 cm pour la loi de Stefan modifiée, 16.78 cm pour le modèle neuronal local et de 18 cm pour CLIMO. L'inconvénient majeur de la loi de Stefan et de la loi de Stefan modifiée est que la valeur des paramètres est variable de lac en lac (figure 8), et il qu'est ainsi difficile de déterminer quelles valeurs appliquer à un lac sans observations.

Les modèles neuronaux se sont révélés être plus flexibles que la loi de Stefan car ils s'adaptent également aux variation de paramètres supplémentaires (voir Figure 9). Il a été possible de trouver une combinaison de variables météorologiques telle que les réseaux neuronaux performant mieux que la loi de Stefan sauf au niveau de deux stations: la station YBK (Figure 8.e) et la station YGK (Figure 8.f). Les données de la première présentent peu de variabilité et les deux modèles ont des performances quasi égales. Les données de la seconde sont suspectes puisque la croissance de la glace commence assez tard comparativement à toutes les autres (degrés-jours de l'ordre de 200). Le nombre de combinaisons (variables météo \times nombre de neurones de la

couche cachée) telles que les RNA performent mieux que la loi de Stefan varie de deux (YBT) à plus de 120 (station YAH). La meilleure combinaison (en termes de rmse) pour chaque station sont données aux Tableaux 4 (les meilleures combinaisons telles que les RNA performent mieux que la loi de Stefan sont données pour chaque station aux Tableaux 9 à 23; les dix premières y sont fournies si le nombre dépasse dix). Le premier constat est que les combinaisons sont différentes pour chaque station, mais 86% contiennent la radiation, 60% la neige et 33% la pluie. On en déduit que le facteur dominant en dehors des degrés-jours dans la croissance de la glace est la radiation solaire, suivie par la neige et la pluie. Les critères de performance (rmse, r2, nash, biais) du meilleur réseau validé à chaque station sont donnés au Tableau 5.

La meilleure combinaison pour expliquer la croissance de glace au niveau global est la combinaison 15 (*DJ; Rad_{nc}+ Rad_c; Pluie*) suivie de très près par la 20 (*DJ; Rad_{nc}+ Rad_c; Neige; Pluie*). Les résultats pour les six meilleures combinaisons (15, 20, 19, 14, 18, 13) lorsqu'on procède par leave one out sont donnés au tableau 6. Les performances du réseau global validé sont données à la dernière ligne du Tableau 5. On remarque que la combinaison de variables géographiques n'a pas d'influence sur le résultat. Un résultat inattendu est le fait que la neige au sol n'ait pas été identifiée comme un paramètre important pour la croissance de la glace de lac. Ce fait est probablement dû à la très grande variabilité dans l'espace de ce paramètre, qui a été estimé par interpolation à partir des stations météorologiques situées à plusieurs dizaines de kilomètres. A titre d'exemple, on présente à la Figure 9 les paramètres météorologiques et épaisseurs de glace observées et simulées avec le RNA global à la station YZF. On peut y voir l'excellente concordance entre les valeurs observées et simulées.

8.2 CALCUL DU VOLUME D'EAU GÉLÉE ET DÉPOSÉE SUR LES BERGES

Le volume de glace abandonné sur les berges a été calculé pour les hivers 85-86 à 97-98 pour le réservoir Outardes 4, les hivers 85-86 à 95-96 et 97-98 pour le réservoir Gouin. L'épaisseur de glace simulée, les niveaux historiques du réservoir, le volume de glace abandonné sur les berges, la perte de hauteur de chute ainsi que le rapport entre le volume d'eau immobilisé et le volume d'eau disponible pour la production

hydroélectrique sont représentés aux figures 10 (réservoir Outardes 4) et 10 (réservoir Gouin). Les hivers antérieurs à 85-86 n'ont pas été considérés parce que, dans le souci limiter la taille de la base de donnée qui contient plus de 10 000 stations, seules les données météorologiques entre 1985 et 2002 y ont été incluses. D'autres hivers entre 1985 et 2002 n'ont pas été traités par manque d'une ou plusieurs données d'entrée aux stations météorologiques proches du site étudié. L'ampleur du phénomène est très différente entre les deux réservoirs. Le volume maximal de glace laissé sur les berges varie entre un maximum de 292.27 millions de m³ (268.01 millions de m³ d'eau) et un minimum de 126.80 millions de m³ (116.27 millions de m³ d'eau) au réservoir Gouin, contre 34.62 millions de m³ (31.74 millions de m³ d'eau) et 19.17 millions de m³ d'eau (17.57 millions de m³ d'eau) au réservoir Outardes 4. La baisse maximale du niveau du réservoir attribuable à ce phénomène est de 24.42 cm au réservoir Gouin et de 7.94 cm au réservoir Outardes 4. Le ratio maximal entre le volume de la partie de la réserve immobilisée et le volume d'eau disponible pour la production hydroélectrique est négligeable à Outardes 4 (1.15%) mais important à Gouin (8.48%). Ces résultats sont résumés au Tableaux 7 (réservoir gouin) et 8 (réservoir Outardes 4).

9. CONCLUSION

On a pu démontrer dans ce rapport que les réseaux de neurones artificiels peuvent efficacement remplacer les modèles thermodynamiques de croissance de glace lacustre, surtout lorsqu'on ne dispose pas de données en quantité et en qualité suffisante. Ils sont plus flexibles et généralisent mieux que la loi de Stefan. Les RNA ont été utilisés dans cet article pour construire un modèle Canadien de croissance de glace de lac et estimer le volume de d'eau immobilisé par gel en hiver aux réservoirs Outardes 4 et Guoin situés au Québec, Canada. Le phénomène de diminution de la réserve utile s'est finalement révélé être négligeable au niveau du premier réservoir (1.51% au maximum de la quantité d'eau disponible) et plus importante pour le second (jusqu'à 8.48% de la quantité d'eau disponible). Cela veut dire qu'au niveau de Gouin, les méthodes de planification qui ignorent le phénomène surestiment quelque peu le potentiel de production hydroélectrique d'hiver. Une étude du phénomène à l'échelle du parc de barrages d'Hydro-Québec serait souhaitable pour voir le réservoir Gouin est un cas isolé ou si le phénomène est significatif au niveau de la majorité des complexes hydroélectriques. Pour les réservoirs au niveau desquels le phénomène est marqué, il sera nécessaire de produire une courbe d'emmagasinement d'hiver différente de la courbe d'emmagasinement habituellement utilisée.

10. BIBLIOGRAPHIE

- Asaad Y.S. 1997. Application of neural network technique to rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology* **199**: 272-294.
- Beltaos S. 1995. River Ice Jams. Water Ressources Publications: LLC, Highlands ranch, Colorado, USA.
- Coulibaly P., Anctil F. and Bobée B. 2000. Daily reservoir inflow forecasting using artificial neural networks with stopped training approach. *Journal of Hydrology* **230**: 244-257.
- Duguay C.R., Flato G.M., Heffries M.O., Ménard P., Morris K. and Rouse W.R. 2003. Ice cover variability on shallow lakes at high altitudes: model simulation and observations. *Hydrological processes* **17**: 3465-3483.
- Fang, X., Ellis C.R. and Stefan, H.G. 1996. Simulation and observation of ice formation (freeze-over) in a lake. *Cold Regions Science and Technology* **24**: 129-145.
- Flato, G.M., Brown, R. 1996. Variability and climate sensitivity of lanfast arctic sea ice. *Journal of geophysical research-ocean* **101(C10)**: 25767-25777.
- Liang R.H. and Hsu Y.Y. 1994. Sheduling of hydroelectric generation using artificial neural networks. *IEEE proceedings, Generation, Transmission and Distribution* **145(5)**: 452-458.
- Lenormand F., Duguay C.R., and Gauthier R. 2002. Development of a historical ice database for the study of climate change in Canada. *Hydrological processes* **16**: 3707-3722.
- Lock G.S.H. 1990. The growth and Decay of ice. Cambridge University Press: Cambridge; New York; Port Chester; Melbourne; Sydney.
- MacKay, D.J.C., 1992. Baysian Interpolation, *Neural Computation*, **4**, 415-447.
- Mackay, D.J.C., 1995. *Bayesian Non-Linear Modelling with Neural Networks*, University of Cambridge programme for Industry, 1-26.

Matousek V. 1984. Regularity of the freezing up of the water surface and heat exchange between water body and water surface. *In proceedings of the IAHR International Symposium on ice*, Hamburg, Germany, Vol. I, 315-327.

Ménard P., Duguay C.R., Flato G. M. and Rouse, W.R. 2002a. Simulation of ice phenology on Great Slave Lake, Northwest Territories, Canada. *Hydrological Processes* **16**: 3691-3706.

Ménard P., Duguay C.R., Flato G. M. and Rouse, W.R. 2002b. Ménard P., Duguay C.R., Flato G. M. and Rouse, W.R. 2002b. Simulation of ice phenology on a large lake in the Mackenzie river basin. 59th eastern snow conference, Stowe, Vermont, USA.

Michel, Bernard . 1971. Winter Regime of Rivers and Lakes. AD 724 121, Cole Regions Research and Engineering Laboratory, Corps of Engineers, U. S. Army, Hanover, New Hampshire, U. S. A.

National Research Council of Canada (1990). *Optimum operation of hydro-electric plants during the ice regime of rivers, a Canadian experience*. NRC Task Force on winter operation of hydro-plants: Ottawa.

Omstedt A. 1985a. On supercooling and ice formation in turbulent seawater. *Journal of glaciology* **31**: 272–280.

Omstedt, A., 1985b. Modelling frazil ice and grease ice formation in the upper layers of the ocean. *Cold Region Science and Technology* **11**: 87–98

Ouarda, T.B.M.J., Gingras, H., Hamilton, S., Ghedira, H., and B. Bobée, 2003. Estimation of streamflow under ice. 12th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, Committee on River Ice Processes and the Environment, Canadian Geophysical Union (CGU-HS), Edmonton, 19-21 Juin 2003.

Schulyakovskii L.G. (ed.) 1966. Manual of Ice-Formation forecasting for Rivers and Inland Lakes . Israel Program for Scientific Translations; Jerusalem.

Shen H.T. and Chiang L.A. 1984. Simulation of growth and decay of river ice cover. *journal of hydraulic engineering* **110** (7): 958-971.

- Shen H.T., Shen H.H., and Tsai S.M. (1990) Dynamic transport of river ice. *Journal of Hydraulic Research* **28**(9): 659-671.
- Shen H.T., Wang D. S., and Lal A. M. W. 1995. Numerical simulation of river ice processes. *Journal of cold regions engineering* **107**: 107-118.
- Stefan, H.G and Fang X. 1997. Simulated climate change effects on ice and snow covers on lakes in a temperate region. *Cold regions science and technology* **25**: 137-152.
- Svensson U., Billfalk L., and Hammar L. 1989. A mathematical Model of Border-Ice formation in Rivers. *Cold regions science and technology* **16**: 179-189.
- Svensson U. and Omstedt A. 1994. Simulation of supercooling and size distribution of frazil ice dynamics. *Cold regions science and technology* **22**: 221-233.
- Solar Radiations Monitoring Laboratory. 2004. Solar Radiations Basics. University of Oregon. Url [<http://www.solardat.uoregon.edu/SolarRadiationsBasics.html>]. consulted on 21-06-2004.
- Xiao R., and Chandrasekar, V. 1997. Development of a neural network based algorithm for rainfall estimation from radar observation. *In IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, **35**(1): 160-171.
- Zhang S.P., Watanabe, H. and Yamada, R. 1994. Prediction of daily water demand by neural networks. *In Stochastic and Statistical methods in hydrology and environmental engineering*, Vol. 3. Éditeurs: K.W. Hipel, A.I. McLeod, U.S. Panu et V.P. Singh. Kluwer academic publishers, Dordrecht, Hollande. pp. 217-227.

11. LISTE DES SYMBOLES

A_I	Superficie du couvert de glace
C	Paramètre de la loi de Stefan modifiée (décalage par rapport à l'origine)
C_a	Coefficient de transfert de chaleur de la glace vers l'air
D_d	Somme des degrés-jours de gel
H_I	Épaisseur de glace
H_{I0}	Épaisseur de glace initiale
\bar{H}_I	Épaisseur de glace moyenne
H_I^k	$k^{\text{ème}}$ mesure d'épaisseur de glace dans les données
\hat{H}_I^k	Estimation de la $k^{\text{ème}}$ mesure d'épaisseur de glace dans les données
H_S	Épaisseur de neige au sol
H_{S0}	Épaisseur de glace initiale au sol
\bar{H}_S	Épaisseur de glace moyenne au sol
k	Coefficient de la loi de Stefan
k_i	Conductivité thermique de la glace
k_s	Conductivité thermique de la neige
λ	Chaleur latente de fusion de la glace
Q_w	Flux de chaleur de l'eau vers la glace
\bar{R}	Hauteur moyenne de pluie pendant la phase de croissance de la glace
Rad_c	Cumul des radiations solaires au dessus de l'atmosphère pour les jours avec précipitation (neige ou pluie)
Rad_{nc}	Cumul des radiations solaires au dessus de l'atmosphère pour les jours sans précipitation (neige ou pluie)
ρ_i	Densité de la glace
S	Surface du réservoir
T_a	Température moyenne de l'air
T_m	Température moyenne de l'eau
T_{ak}	Température moyenne journalière de l'air au jour k
V_G	Volume de glace déposée au sol
V_I	Volume de glace flottante
Y_B	Élévation de la surface inférieure du couvert de glace
Y_S	Élévation de la surface libre de l'eau dans le réservoir

Tableau 1: Liste des stations de mesure de glace de lac

STATION	COURS D'EAU	LONGITUDE	LATITUDE	UTILISÉE POUR L'ENTRAÎNEMENT DES RNA
HA1	Lac sans nom	-68.36	61.03	Oui
LT1	Upper Dumbell Lake	-61.5	82.46	Non
WFN	Cree lake	-105.15	57.33	Oui
WIQ	Primrose lake	-109.93	54.76	Non
WLH	Attawapiskat lake	-86.09	52.21	Oui
WOH	Lac des sables	-73.69	46.03	Non
WTL	Big trout lake	-88.11	53.81	Oui
YAH	Lac la Tarrière	-72.36	53.76	Oui
YBK	Baker Lake	-95.96	64.3	Oui
YBT	Brochet bay of Reindeer lake	-100.31	57.86	Oui
YBX	Lac à la truite	-56.81	51.45	Oui
YEI	Ennadai Lake	-99.09	61.11	Oui
YGK	Lake Ontario-Horsey Bay	-75.5	44.2	Oui
YGM	Lake Winnipeg	-95.01	50.61	Oui
YGV	Patterson Lake	-63.88	50.29	Non
YIV	Island Lake	-93.31	53.84	Oui
YKL	Knob Lake	-65.19	54.78	Oui
YNE	Little Playgreen Lake	-96.16	53.98	Non
YNI	Nitechequon lake	-69.08	53.18	Non
YPY	Lake athabasca	-110.83	58.7	Oui
YQT	Thunder Bay	-88.78	48.43	Non
YVP	Stewart lake	-67.53	58.11	Oui
YFL	Great Slave Lake (Fort Reliance)	-108.86	62.70	Oui
YYR	Terrington Basin	-59.58	53.33	Oui
YZE	Huron Lake (South Bay)	-81.98	45.54	Non
YZF	Back Bay	-114.34	62.45	Oui

Tableau 2: Liste des combinaisons de variables météorologiques testées

Combinaison de variables météorologiques	Variables
1	$DJ; Rad_{nc}$
2	$DJ; Rad_{nc}+0.25 Rad_c$
3	$DJ; Rad_{nc}+0.50 Rad_c$
4	$DJ; Rad_{nc}+0.75 Rad_c$
5	$DJ; Rad_{nc}+ Rad_c$
6	$DJ; Rad_{nc}; Neige$
7	$DJ; Rad_{nc}+0.25 Rad_c; Neige$
8	$DJ; Rad_{nc}+0.50 Rad_c; Neige$
9	$DJ; Rad_{nc}+0.75 Rad_c; Neige$
10	$DJ; Rad_{nc}+ Rad_c; Neige$
11	$DJ; Rad_{nc}; Pluie$
12	$DJ; Rad_{nc}+0.25 Rad_c; Pluie$
13	$DJ; Rad_{nc}+0.50 Rad_c; Pluie$
14	$DJ; Rad_{nc}+0.75 Rad_c; Pluie$
15	$DJ; Rad_{nc}+ Rad_c; Pluie$
16	$DJ; Rad_{nc}; Neige; Pluie$
17	$DJ; Rad_{nc}+0.25 Rad_c; Neige; Pluie$
18	$DJ; Rad_{nc}+0.50 Rad_c; Neige; Pluie$
19	$DJ; Rad_{nc}+0.75 Rad_c; Neige; Pluie$
20	$DJ; Rad_{nc}+ Rad_c; Neige; Pluie$
21	$DJ; Neige$
22	$DJ; Pluie$
23	$DJ; Neige; Pluie$

Tableau 2: Liste des combinaisons de variables météorologiques testées

Combinaison de variables météorologiques	Variables
1	<i>DJ; Rad_{nc}</i>
2	<i>DJ; Rad_{nc}+0.25 Rad_c</i>
3	<i>DJ; Rad_{nc}+0.50 Rad_c</i>
4	<i>DJ; Rad_{nc}+0.75 Rad_c</i>
5	<i>DJ; Rad_{nc}+ Rad_c</i>
6	<i>DJ; Rad_{nc}; Neige</i>
7	<i>DJ; Rad_{nc}+0.25 Rad_c; Neige</i>
8	<i>DJ; Rad_{nc}+0.50 Rad_c; Neige</i>
9	<i>DJ; Rad_{nc}+0.75 Rad_c; Neige</i>
10	<i>DJ; Rad_{nc}+ Rad_c; Neige</i>
11	<i>DJ; Rad_{nc}; Pluie</i>
12	<i>DJ; Rad_{nc}+0.25 Rad_c; Pluie</i>
13	<i>DJ; Rad_{nc}+0.50 Rad_c; Pluie</i>
14	<i>DJ; Rad_{nc}+0.75 Rad_c; Pluie</i>
15	<i>DJ; Rad_{nc}+ Rad_c; Pluie</i>
16	<i>DJ; Rad_{nc}; Neige; Pluie</i>
17	<i>DJ; Rad_{nc}+0.25 Rad_c; Neige; Pluie</i>
18	<i>DJ; Rad_{nc}+0.50 Rad_c; Neige; Pluie</i>
19	<i>DJ; Rad_{nc}+0.75 Rad_c; Neige; Pluie</i>
20	<i>DJ; Rad_{nc}+ Rad_c; Neige; Pluie</i>
21	<i>DJ; Neige</i>
22	<i>DJ; Pluie</i>
23	<i>DJ; Neige; Pluie</i>

Tableau 3: Performances de la loi de Stefan modifiée

STATION	PERFORMANCES CALIBRATION					PERFORMANCES VALIDATION				
	k	C	RMSE	r^2	RRMSE	BIAIS	RMSE	R^2	RRMSE	BIAIS
HA1	2.80	14.06	4.97	0.98	0.05	1.02	9.81	0.96	0.09	-3.56
LT1	2.57	46.16	11.94	0.90	0.12	3.16	30.29	0.72	0.19	47.30
WFN	1.54	90.23	4.17	0.86	0.07	0.10	14.84	0.68	0.16	-6.68
WIQ	1.84	231.50	6.21	0.84	0.17	-2.94	8.49	0.74	0.28	2.90
WLH	1.86	33.67	5.87	0.70	0.10	-1.76	9.34	0.83	0.14	3.61
WOH	2.06	60.66	4.94	0.69	0.08	0.73	8.41	0.82	0.18	1.20
WTL	1.95	14.72	5.61	0.91	0.08	0.49	13.82	0.87	0.15	-8.09
YAH	1.76	62.73	5.53	0.93	0.10	-1.99	10.65	0.89	0.16	7.20
YBK	3.05	154.12	6.07	0.97	0.06	4.27	11.69	0.96	0.10	-4.22
YBT	1.64	12.87	6.50	0.86	0.11	-0.28	7.32	0.92	0.14	-1.35
YBX	2.91	56.24	7.92	0.72	0.23	1.08	21.86	0.83	0.50	19.12
YEI	2.70	44.42	7.29	0.81	0.08	4.06	13.64	0.92	0.13	2.94
YGK	2.70	209.03	4.83	0.71	0.40	3.17	10.51	0.77	0.91	8.31
YGM	2.22	58.67	5.90	0.60	0.07	1.63	14.20	0.85	0.15	-9.81
YGV	2.35	108.00	5.15	0.87	0.10	1.24	32.87	0.74	1.13	28.97
YIV	1.88	140.33	5.14	0.69	0.08	0.15	11.22	0.76	0.19	1.78
YKL	2.09	59.87	6.29	0.92	0.07	0.83	11.38	0.91	0.15	-6.51
YNE	2.12	10.71	8.05	0.80	0.21	2.88	9.26	0.88	0.17	10.46
YNI	1.75	57.78	5.81	0.92	0.11	2.17	9.41	0.89	0.13	-5.44
YPY	1.89	95.19	10.30	0.55	0.26	1.25	13.83	0.70	0.29	8.65
YQT	3.13	147.73	4.19	0.74	0.08	-1.06	11.24	0.80	0.92	51.10
YVP	2.53	58.89	6.24	0.86	0.08	2.78	11.44	0.95	0.12	6.28
YYR	2.16	16.58	7.80	0.73	0.16	1.62	13.68	0.67	0.19	3.05
YZE	2.32	58.27	5.75	0.70	0.13	-0.92	6.95	0.74	0.16	2.30
YZF	2.14	52.98	6.57	0.85	0.09	2.21	13.80	0.84	0.16	0.27
YFL	1.99	423.2	15.24	0.80	0.09	-0.30	2.21	13.80	0.16	0.27
Maximum	3.13	423.20	15.24	0.98	0.40	4.27	32.87	13.80	1.13	51.10
Minimum	1.54	10.71	4.17	0.55	0.05	-2.94	2.21	0.67	0.09	-9.81
Moyenne	2.23	89.18	6.70	0.80	0.12	0.98	12.78	1.32	0.27	6.16

Tableau 4: critères de performance des réseaux locaux (meilleure combinaison et nombre optimal de neurones sur la couche cachée, leave one out)

Station	Comb.	Nombre de neurones	Rmse (Stefan)	Rmse (RNA)	r2 (Stefan)	r2 (RNA)	rrmse (Stefan)	rrmse (RNA)	Nash (Stefan)	Nash (RNA)	Biais (Stefan)	Biais (RNA)
HA1	10	1	8.95	8.14	0.96	0.96	0.12	0.13	0.96	0.96	-0.07	0.13
WFN	5	9	11.60	11.03	0.72	0.75	0.22	0.24	0.72	0.75	-0.14	-0.39
WLH	23	4	14.54	11.15	0.60	0.77	0.33	0.24	0.59	0.76	0.14	-0.16
WTL	9	1	10.55	10.51	0.86	0.86	0.21	0.22	0.86	0.86	0.11	-0.72
YAH	22	3	8.96	8.26	0.81	0.84	0.17	0.16	0.81	0.84	0.12	-0.51
YBK	15	1	11.60	11.73	0.96	0.96	0.21	0.21	0.96	0.96	-0.57	-0.16
YBT	9	1	8.54	8.62	0.87	0.87	0.26	0.27	0.87	0.87	-0.01	-0.19
YBX	4	10	13.64	13.33	0.66	0.68	1.06	1.15	0.66	0.68	-0.05	-1.12
YEI	10	1	15.55	14.37	0.87	0.89	0.23	0.22	0.87	0.89	0.23	-1.09
YGK	7	9	9.16	14.04	0.75	0.44	1.11	3.66	0.74	0.41	0.40	-2.94
YGM	9	3	14.71	11.11	0.60	0.77	0.22	0.18	0.60	0.77	0.00	-0.10
YIV	10	2	12.04	11.48	0.69	0.72	0.28	0.29	0.69	0.72	0.01	-0.59
YKL	1	9	9.73	10.25	0.89	0.89	0.18	0.19	0.89	0.88	0.01	1.29
YPY	11	9	19.98	0.55	20.74	0.51	0.68	0.63	0.55	0.51	-0.50	-0.83
YVP	20	2	13.22	0.89	12.89	0.89	0.18	0.18	0.89	0.89	-0.31	-0.50
YYR	14	9	12.87	0.69	12.08	0.73	0.46	0.34	0.69	0.73	-0.03	0.60
YZF	10	2	13.73	0.83	12.53	0.86	0.21	0.22	0.83	0.86	-0.11	-0.22
YFL	5	10	13.36	7.45	0.93	0.95	0.18	0.10	0.83	0.94	9.45	3.15

Tableau 5: Critères de performance des réseaux locaux (meilleure combinaison et nombre optimal de neurones sur la couche cachée, partition 80%-20% des données)

Station	Combinaison	rmse (Stefan)	rmse (RNA)	r2 (Stefan)	r2 (RNA)	rmse (Stefan)	rmse (RNA)	Nash (Stefan)	Nash (RNA)	Biais (Stefan)	Biais (RNA)
HA1	10	10.11	5.00	0.98	0.99	0.11	0.05	0.91	0.98	-8.45	-3.65
WFN	5	7.84	7.76	0.85	0.85	0.13	0.13	0.83	0.84	1.55	2.10
WLH	23	5.30	4.71	0.93	0.96	0.11	0.10	0.90	0.92	3.03	-2.82
WTL	9	8.85	7.36	0.93	0.93	0.13	0.11	0.90	0.93	4.54	1.33
YAH	22	7.35	6.99	0.93	0.93	0.14	0.13	0.87	0.88	4.63	4.12
YBK	15	7.59	7.28	0.98	0.99	0.06	0.06	0.98	0.98	0.28	0.21
YBT	9	8.31	7.38	0.88	0.89	0.14	0.12	0.85	0.88	-1.93	0.26
YBX	4	11.82	9.63	0.76	0.83	0.24	0.20	0.71	0.81	4.20	3.32
YEI	10	14.51	11.77	0.88	0.93	0.16	0.13	0.87	0.91	3.72	3.21
YGK	7	7.36	10.27	0.92	0.91	0.27	0.37	0.86	0.72	3.76	-3.35
YGM	9	14.42	6.14	0.64	0.93	0.18	0.08	0.63	0.93	0.83	0.18
YIV	10	8.33	7.34	0.88	0.90	0.15	0.13	0.84	0.87	3.79	1.80
YKL	1	10.18	9.66	0.92	0.92	0.14	0.13	0.90	0.91	3.83	2.47
YPY	11	18.11	17.57	0.69	0.70	0.31	0.30	0.67	0.69	0.32	-2.04
YVP	20	10.80	7.40	0.94	0.96	0.13	0.09	0.90	0.95	-5.45	1.30
YYR	14	9.64	9.15	0.77	0.81	0.14	0.14	0.77	0.79	-0.58	2.61
YZF	10	9.50	8.00	0.93	0.94	0.13	0.11	0.92	0.94	-4.25	-2.19
YFL	5	13.36	7.45	0.93	0.95	0.18	0.10	0.83	0.94	9.45	3.15
Réseau global	15	22.39	14.05	0.73	0.89	0.29	0.18	0.73	0.89	-0.32	-1.68

Tableau 6: Critères de performance du réseau global pour les trois meilleures combinaisons (un neurone en couche cachée, leave one out)

Comb. Met.	Comb. Geo	Rmse (Stefan)	Rmse (RNA)	r2 (Stefan)	r2 (RNA)	rrmse (Stefan)	rrmse (RNA)	Nash (Stefan)	Nash (RNA)	Biais (Stefan)	Biais (RNA)	rbiais (Stefan)	rbiais (RNA)
15	1	25.08	18.13	0.65	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15	0.66	-0.09	-0.08
15	2	25.08	18.13	0.65	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15	0.66	-0.09	-0.08
15	3	25.08	18.13	0.65	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15	0.66	-0.09	-0.08
15	4	25.08	18.13	0.65	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15	0.66	-0.09	-0.08
20	1	25.08	18.14	0.65	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15	0.57	-0.09	-0.08
20	2	25.08	18.14	0.65	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15	0.57	-0.09	-0.08
20	3	25.08	18.54	0.65	0.81	0.42	0.44	0.65	0.81	-0.15	-0.02	-0.09	-0.10
20	4	25.08	18.14	0.65	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15	0.57	-0.09	-0.08
19	1	25.08	18.14	0.65	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15	0.13	-0.09	-0.09
19	2	25.08	18.14	0.65	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15	0.13	-0.09	-0.09
19	3	25.08	18.14	0.65	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15	0.13	-0.09	-0.09
19	4	25.08	18.54	0.65	0.81	0.42	0.44	0.65	0.81	-0.15	-0.45	-0.09	-0.10
14	1	25.08	18.17	0.65	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15	0.23	-0.09	-0.09
14	2	25.08	18.17	0.65	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15	0.23	-0.09	-0.09
14	3	25.08	18.17	0.65	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15	0.23	-0.09	-0.09
14	4	25.08	18.17	0.65	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15	0.23	-0.09	-0.09
18	1	25.08	18.22	0.65	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15	-0.47	-0.09	-0.10
18	2	25.08	18.22	0.65	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15	-0.47	-0.09	-0.10
18	3	25.08	18.22	0.65	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15	-0.47	-0.09	-0.10
18	4	25.08	18.22	0.65	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15	-0.47	-0.09	-0.10
13	1	25.08	18.26	0.65	0.82	0.42	0.43	0.65	0.81	-0.15	-0.37	-0.09	-0.10
13	2	25.08	18.26	0.65	0.82	0.42	0.43	0.65	0.81	-0.15	-0.37	-0.09	-0.10
13	3	25.08	18.26	0.65	0.82	0.42	0.43	0.65	0.81	-0.15	-0.37	-0.09	-0.10
13	4	25.08	18.26	0.65	0.82	0.42	0.43	0.65	0.81	-0.15	-0.37	-0.09	-0.10

Tableau 7: Volume maximal d'eau gelée et abandonnée sur les berges au réservoir Outardes 4, et diminution de la hauteur de chute par hiver

Hiver	Baisse maximale du niveau (cm)	Volume maximal de glace laissé sur les berges (millions de m3)	Volume minimal d'eau disponible pour la production hydroélectrique (millions de m3)	Ratio max (%)	Niveau min réservoir
85-86	5.57	25.57	4622.18	0.55	343.98
86-87	4.85	21.83	4016.59	0.54	342.67
87-88	4.87	21.72	3720.74	0.58	342.03
88-89	7.94	34.62	3022.69	1.15	340.52
89-90	4.41	19.34	3189.11	0.61	340.88
90-91	4.16	19.17	4714.64	0.41	344.18
91-92	5.79	25.73	3582.05	0.72	341.73
93-94	6.70	31.40	5250.88	0.60	345.34
94-95	5.03	23.64	5394.19	0.44	345.65
95-96	5.92	27.25	4686.90	0.58	344.12
96-97	5.61	25.54	4330.94	0.59	343.35
97-98	4.35	19.64	4062.82	0.48	342.77

Tableau 8: Volume maximal d'eau gelée et abandonnée sur les berges au réservoir Gouin, et diminution de la hauteur de chute par hiver

Hiver	Baisse maximale du niveau (cm)	Volume maximal de glace laissé sur les berges (millions de m3)	Volume minimal d'eau disponible pour la production hydroélectrique (millions de m3)	Ratio max (%)	Niveau min réservoir
85-86	11.14	126.80	4313.65	2.94	402.40
86-87	15.03	190.89	4964.15	3.85	402.94
87-88	26.63	180.24	2126.12	8.48	399.88
88-89	19.46	210.17	4048.00	5.19	402.16
89-90	19.53	185.70	3513.62	5.29	401.63
90-91	9.96	128.22	5057.55	2.54	403.01
91-92	21.60	205.39	3513.62	5.85	401.63
92-93	17.61	218.60	4817.64	4.54	402.82
93-94	23.78	292.27	4752.90	6.15	402.77
94-95	11.02	144.29	5176.01	2.79	403.10
95-96	23.79	190.50	2888.97	6.59	400.91
96-97	5.83	79.07	5176.01	1.46	403.10
97-98	11.97	143.93	4618.58	3.12	402.66

Tableau 9 : Identification des variables météorologiques pertinentes à la station HA1 (leave one out)

Combinaison	Nombre de neurones	rmse (Stefan)	r^2 (Stefan)	rmse (RNA)	r^2 (RNA)
10	1	8.9456	0.9568	8.0243	0.9667
9	1	8.9456	0.9568	8.1495	0.965
7	1	8.9456	0.9568	8.1762	0.9653
8	1	8.9456	0.9568	8.2241	0.9642
12	4	8.9456	0.9568	8.4393	0.9623
9	8	8.9456	0.9568	8.5293	0.9615
10	10	8.9456	0.9568	8.5414	0.9612
9	9	8.9456	0.9568	8.5536	0.9612
10	6	8.9456	0.9568	8.5985	0.9605
10	5	8.9456	0.9568	8.6147	0.9603

Tableau 10 : Identification des variables météorologiques pertinentes à la station WFN (leave one out)

Combinaison	Nombre de neurones	rmse (Stefan)	r^2 (Stefan)	rmse (RNA)	r^2 (RNA)
5	9	11.5966	0.7184	11.0788	0.7435
5	10	11.5966	0.7184	11.1517	0.7397
2	4	11.5966	0.7184	11.252	0.7397
5	3	11.5966	0.7184	11.2928	0.7331
3	7	11.5966	0.7184	11.295	0.7359
1	6	11.5966	0.7184	11.3161	0.7461
2	9	11.5966	0.7184	11.3213	0.7401
5	6	11.5966	0.7184	11.3216	0.732
2	10	11.5966	0.7184	11.3403	0.7408
2	6	11.5966	0.7184	11.3426	0.7407

Tableau 11 : Identification des variables météorologiques pertinentes à la station WLH (leave one out)

Combinaison	Nombre de neurones	rmse (Stefan)	r^2 (Stefan)	rmse (RNA)	r^2 (RNA)
23	4	14.5404	0.5973	11.2863	0.7616
23	7	14.5404	0.5973	11.3347	0.7595
23	3	14.5404	0.5973	11.7614	0.7412
23	6	14.5404	0.5973	11.7688	0.7443
23	1	14.5404	0.5973	12.1353	0.7224
18	3	14.5404	0.5973	12.566	0.7108
20	1	14.5404	0.5973	12.7115	0.7005
20	3	14.5404	0.5973	12.7335	0.7054
23	9	14.5404	0.5973	12.7353	0.6984
23	5	14.5404	0.5973	12.7912	0.6985
16	4	14.5404	0.5973	12.8734	0.7288

Tableau 12 : Identification des variables météorologiques pertinentes à la station WTL (leave one out)

Combinaison	Nombre de neurones	rmse (Stefan)	r^2 (Stefan)	rmse (RNA)	r^2 (RNA)
9	1	10.5492	0.8572	10.5092	0.8587
9	3	10.5492	0.8572	10.5241	0.8592
9	8	10.5492	0.8572	10.493	0.8609
10	1	10.5492	0.8572	10.4336	0.8601
10	2	10.5492	0.8572	10.4115	0.8611
10	3	10.5492	0.8572	10.5265	0.858
10	4	10.5492	0.8572	10.5015	0.8586
10	5	10.5492	0.8572	10.4511	0.8602
20	1	10.5492	0.8572	10.5149	0.858

Tableau 13 : Identification des variables météorologiques pertinentes à la station YAH (leave one out)

Combinaison	Nombre de neurones	rmse (Stefan)	r^2 (Stefan)	rmse (RNA)	r^2 (RNA)
22	3	8.9601	0.812	7.9769	0.8582
22	8	8.9601	0.812	8.0225	0.8521
22	7	8.9601	0.812	8.215	0.8464
22	9	8.9601	0.812	8.2299	0.8471
22	4	8.9601	0.812	8.3307	0.8404
3	9	8.9601	0.812	8.3683	0.8353
23	8	8.9601	0.812	8.3749	0.8596
22	6	8.9601	0.812	8.381	0.8383
22	10	8.9601	0.812	8.3835	0.8437
22	5	8.9601	0.812	8.4028	0.8407

Tableau 14 : Identification des variables météorologiques pertinentes à la station YBT (leave one out)

Combinaison	Nombre de neurones	rmse (Stefan)	r^2 (Stefan)	rmse (RNA)	r^2 (RNA)
9	1	8.5385	0.8687	8.524	0.8692
8	4	8.5385	0.8687	8.532	0.8705

Tableau 15 : Identification des variables météorologiques pertinentes à la station YBX (leave one out)

Combinaison	Nombre de neurones	rmse (Stefan)	r^2 (Stefan)	rmse (RNA)	r^2 (RNA)
4	10	13.6363	0.6641	13.0374	0.6919
4	9	13.6363	0.6641	13.1585	0.6858
4	6	13.6363	0.6641	13.2498	0.681
4	3	13.6363	0.6641	13.2659	0.6822
5	8	13.6363	0.6641	13.288	0.6879
3	7	13.6363	0.6641	13.3302	0.6768
4	5	13.6363	0.6641	13.3494	0.6781
5	7	13.6363	0.6641	13.3835	0.6861
3	9	13.6363	0.6641	13.4309	0.6771
5	3	13.6363	0.6641	13.4842	0.6845
3	8	13.6363	0.6641	13.4944	0.6775

Tableau 16 : Identification des variables météorologiques pertinentes à la station YEI (leave one out)

Combinaison	Nombre de neurones	rmse (Stefan)	r^2 (Stefan)	rmse (RNA)	r^2 (RNA)
10	1	15.5543	0.8673	14.2724	0.8885
10	2	15.5543	0.8673	14.3991	0.8867
9	1	15.5543	0.8673	14.414	0.8867
20	1	15.5543	0.8673	14.425	0.8863
10	3	15.5543	0.8673	14.4318	0.8863
9	2	15.5543	0.8673	14.4401	0.8864
10	4	15.5543	0.8673	14.4432	0.8861
10	10	15.5543	0.8673	14.4599	0.8859
9	3	15.5543	0.8673	14.4719	0.886
19	1	15.5543	0.8673	14.4807	0.8858

Tableau 17 : Identification des variables météorologiques pertinentes à la station YGM (leave one out)

Combinaison	Nombre de neurones	rmse (Stefan)	r^2 (Stefan)	rmse (RNA)	r^2 (RNA)
9	3	14.7051	0.5991	10.9934	0.7753
10	3	14.7051	0.5991	11.0244	0.7749
10	4	14.7051	0.5991	11.1517	0.7692
7	8	14.7051	0.5991	11.2751	0.7631
8	7	14.7051	0.5991	11.3514	0.7601
21	2	14.7051	0.5991	11.3832	0.7698
10	5	14.7051	0.5991	11.4116	0.758
7	3	14.7051	0.5991	11.4149	0.7594
21	3	14.7051	0.5991	11.43	0.7675
21	4	14.7051	0.5991	11.4343	0.7672

Tableau 18 : Identification des variables météorologiques pertinentes à la station YIV (leave one out)

Combinaison	Nombre de neurones	rmse (Stefan)	r^2 (Stefan)	rmse (RNA)	r^2 (RNA)
10	2	12.0361	0.6931	11.4757	0.7217
10	3	12.0361	0.6931	11.5513	0.7182
9	4	12.0361	0.6931	11.5519	0.7176
5	5	12.0361	0.6931	11.5843	0.7158
9	3	12.0361	0.6931	11.6066	0.7153
21	10	12.0361	0.6931	11.6562	0.7127
10	4	12.0361	0.6931	11.6641	0.7126
4	9	12.0361	0.6931	11.6665	0.7117
10	5	12.0361	0.6931	11.6729	0.7123
4	4	12.0361	0.6931	11.6802	0.7109

Tableau 19 : Identification des variables météorologiques pertinentes à la station YKL (leave one out)

Combinaison	Nombre de neurones	rmse (Stefan)	r^2 (Stefan)	rmse (RNA)	r^2 (RNA)
1	9	9.7283	0.8933	9.3622	0.9047
1	2	9.7283	0.8933	9.3778	0.9014
1	4	9.7283	0.8933	9.4836	0.8995
2	7	9.7283	0.8933	9.5587	0.9001
3	8	9.7283	0.8933	9.6002	0.8968
3	9	9.7283	0.8933	9.6104	0.8965
23	3	9.7283	0.8933	9.6253	0.8961
2	9	9.7283	0.8933	9.6491	0.8985
2	3	9.7283	0.8933	9.6589	0.8955
3	5	9.7283	0.8933	9.6621	0.8951

Tableau 20 : Identification des variables météorologiques pertinentes à la station YPY (leave one out)

Combinaison	Nombre de neurones	rmse (Stefan)	r^2 (Stefan)	rmse (RNA)	r^2 (RNA)
11	9	19.9803	0.5464	19.8887	0.5539
11	5	19.9803	0.5464	19.9645	0.5498

Tableau 21 : Identification des variables météorologiques pertinentes à la station YVP (leave one out)

Combinaison	Nombre de neurones	rmse (Stefan)	r^2 (Stefan)	rmse (RNA)	r^2 (RNA)
20	2	13.2224	0.886	12.2584	0.903
23	1	13.2224	0.886	12.3854	0.9009
19	3	13.2224	0.886	12.4232	0.9005
23	2	13.2224	0.886	12.472	0.8993
22	3	13.2224	0.886	12.5438	0.8974
22	5	13.2224	0.886	12.5442	0.8973
22	6	13.2224	0.886	12.5447	0.8973
22	7	13.2224	0.886	12.5472	0.8973
22	8	13.2224	0.886	12.548	0.8973
20	5	13.2224	0.886	12.5561	0.899

Tableau 22 : Identification des variables météorologiques pertinentes à la station YYR (leave one out)

Combinaison n	Nombre de neurones	rmse (Stefan)	r^2 (Stefan)	rmse (RNA)	r^2 (RNA)
14	9	12.868	0.6939	11.9191	0.7402
14	10	12.868	0.6939	11.9646	0.7375
15	6	12.868	0.6939	12.0153	0.7335
14	8	12.868	0.6939	12.1452	0.7282
15	7	12.868	0.6939	12.1894	0.7246
14	7	12.868	0.6939	12.1964	0.7266
15	8	12.868	0.6939	12.205	0.7255
15	5	12.868	0.6939	12.3157	0.7192
14	4	12.868	0.6939	12.3285	0.7204
15	10	12.868	0.6939	12.3556	0.717
4	7	12.868	0.6939	12.3832	0.7161

Tableau 23 : Identification des variables météorologiques pertinentes à la station YZF (leave one out)

Combinaison	Nombre de neurones	rmse (Stefan)	r^2 (Stefan)	rmse (RNA)	r^2 (RNA)
10	2	13.73	0.8339	12.4886	0.8653
9	2	13.73	0.8339	12.5703	0.8643
20	1	13.73	0.8339	12.6071	0.8669
19	1	13.73	0.8339	12.6231	0.8663
10	1	13.73	0.8339	12.6575	0.8665
8	2	13.73	0.8339	12.6624	0.864
18	1	13.73	0.8339	12.6803	0.8654
9	1	13.73	0.8339	12.6805	0.8658
8	1	13.73	0.8339	12.7751	0.8642
20	2	13.73	0.8339	12.7822	0.8586

Tableau 24 : Identification des variables météorologiques (réseau global)

Comb. Met.	Comb. Geo.	Rmse (Stef.)	r2 (Stefan)	Rmse (RNA)	r2 (RNA)	Rrmse (Stefan)	Rrmse (RNA)	Nash (Stef.)	Nash (RNA)	Biais (Stefan)	Biais (RNA)
15.00	1.00	1.00	25.08	0.65	18.15	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15
15.00	2.00	1.00	25.08	0.65	18.15	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15
15.00	3.00	1.00	25.08	0.65	18.15	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15
15.00	4.00	1.00	25.08	0.65	18.15	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15
20.00	1.00	1.00	25.08	0.65	18.17	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15
20.00	2.00	1.00	25.08	0.65	18.17	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15
20.00	3.00	1.00	25.08	0.65	18.17	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15
20.00	4.00	1.00	25.08	0.65	18.17	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15
19.00	1.00	1.00	25.08	0.65	18.17	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15
19.00	2.00	1.00	25.08	0.65	18.17	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15
19.00	3.00	1.00	25.08	0.65	18.17	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15
19.00	4.00	1.00	25.08	0.65	18.17	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15
14.00	1.00	1.00	25.08	0.65	18.19	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15
14.00	2.00	1.00	25.08	0.65	18.19	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15
14.00	3.00	1.00	25.08	0.65	18.19	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15
14.00	4.00	1.00	25.08	0.65	18.19	0.82	0.42	0.43	0.65	0.82	-0.15
18.00	1.00	1.00	25.08	0.65	18.24	0.82	0.42	0.43	0.65	0.81	-0.15
18.00	2.00	1.00	25.08	0.65	18.24	0.82	0.42	0.43	0.65	0.81	-0.15
18.00	3.00	1.00	25.08	0.65	18.24	0.82	0.42	0.43	0.65	0.81	-0.15
18.00	4.00	1.00	25.08	0.65	18.24	0.82	0.42	0.43	0.65	0.81	-0.15
13.00	1.00	1.00	25.08	0.65	18.28	0.82	0.42	0.43	0.65	0.81	-0.15
13.00	2.00	1.00	25.08	0.65	18.28	0.82	0.42	0.43	0.65	0.81	-0.15
13.00	3.00	1.00	25.08	0.65	18.28	0.82	0.42	0.43	0.65	0.81	-0.15
13.00	4.00	1.00	25.08	0.65	18.28	0.82	0.42	0.43	0.65	0.81	-0.15
17.00	1.00	1.00	25.08	0.65	18.45	0.81	0.42	0.44	0.65	0.81	-0.15
17.00	2.00	1.00	25.08	0.65	18.45	0.81	0.42	0.44	0.65	0.81	-0.15
17.00	3.00	1.00	25.08	0.65	18.45	0.81	0.42	0.44	0.65	0.81	-0.15
17.00	4.00	1.00	25.08	0.65	18.45	0.81	0.42	0.44	0.65	0.81	-0.15
12.00	1.00	1.00	25.08	0.65	18.48	0.81	0.42	0.44	0.65	0.81	-0.15
12.00	2.00	1.00	25.08	0.65	18.48	0.81	0.42	0.44	0.65	0.81	-0.15
12.00	4.00	1.00	25.08	0.65	18.48	0.81	0.42	0.44	0.65	0.81	-0.15
21.00	1.00	1.00	25.08	0.65	18.90	0.81	0.42	0.43	0.65	0.80	-0.15
5.00	1.00	1.00	25.08	0.65	18.92	0.80	0.42	0.43	0.65	0.80	-0.15
5.00	2.00	1.00	25.08	0.65	18.92	0.80	0.42	0.43	0.65	0.80	-0.15
5.00	3.00	1.00	25.08	0.65	18.92	0.80	0.42	0.43	0.65	0.80	-0.15
5.00	4.00	1.00	25.08	0.65	18.92	0.80	0.42	0.43	0.65	0.80	-0.15
16.00	2.00	1.00	25.08	0.65	18.93	0.81	0.42	0.45	0.65	0.80	-0.15
16.00	4.00	1.00	25.08	0.65	18.93	0.81	0.42	0.45	0.65	0.80	-0.15
11.00	1.00	1.00	25.08	0.65	18.93	0.81	0.42	0.45	0.65	0.80	-0.15
11.00	2.00	1.00	25.08	0.65	18.93	0.81	0.42	0.45	0.65	0.80	-0.15
21.00	2.00	1.00	25.08	0.65	18.95	0.81	0.42	0.43	0.65	0.80	-0.15
21.00	3.00	1.00	25.08	0.65	18.95	0.81	0.42	0.43	0.65	0.80	-0.15
16.00	1.00	1.00	25.08	0.65	18.97	0.81	0.42	0.45	0.65	0.80	-0.15
16.00	3.00	1.00	25.08	0.65	18.97	0.81	0.42	0.45	0.65	0.80	-0.15
4.00	1.00	1.00	25.08	0.65	18.98	0.80	0.42	0.44	0.65	0.80	-0.15

4.00	2.00	1.00	25.08	0.65	18.98	0.80	0.42	0.44	0.65	0.80	-0.15
4.00	3.00	1.00	25.08	0.65	18.98	0.80	0.42	0.44	0.65	0.80	-0.15
6.00	2.00	1.00	25.08	0.65	19.00	0.80	0.42	0.45	0.65	0.80	-0.15
6.00	3.00	1.00	25.08	0.65	19.00	0.80	0.42	0.45	0.65	0.80	-0.15
6.00	4.00	1.00	25.08	0.65	19.00	0.80	0.42	0.45	0.65	0.80	-0.15
11.00	3.00	1.00	25.08	0.65	19.03	0.80	0.42	0.45	0.65	0.80	-0.15
11.00	4.00	1.00	25.08	0.65	19.03	0.80	0.42	0.45	0.65	0.80	-0.15
7.00	1.00	1.00	25.08	0.65	19.05	0.80	0.42	0.44	0.65	0.80	-0.15
7.00	3.00	1.00	25.08	0.65	19.05	0.80	0.42	0.44	0.65	0.80	-0.15
3.00	4.00	1.00	25.08	0.65	19.06	0.80	0.42	0.44	0.65	0.80	-0.15
3.00	1.00	1.00	25.08	0.65	19.06	0.80	0.42	0.44	0.65	0.80	-0.15
3.00	2.00	1.00	25.08	0.65	19.06	0.80	0.42	0.44	0.65	0.80	-0.15
3.00	3.00	1.00	25.08	0.65	19.06	0.80	0.42	0.44	0.65	0.80	-0.15
23.00	1.00	1.00	25.08	0.65	19.07	0.80	0.42	0.44	0.65	0.80	-0.15
10.00	1.00	1.00	25.08	0.65	19.09	0.80	0.42	0.44	0.65	0.80	-0.15
10.00	2.00	1.00	25.08	0.65	19.09	0.80	0.42	0.44	0.65	0.80	-0.15
10.00	3.00	1.00	25.08	0.65	19.09	0.80	0.42	0.44	0.65	0.80	-0.15
10.00	4.00	1.00	25.08	0.65	19.09	0.80	0.42	0.44	0.65	0.80	-0.15
23.00	3.00	1.00	25.08	0.65	19.09	0.80	0.42	0.43	0.65	0.80	-0.15
23.00	4.00	1.00	25.08	0.65	19.09	0.80	0.42	0.43	0.65	0.80	-0.15
21.00	4.00	1.00	25.08	0.65	19.09	0.80	0.42	0.43	0.65	0.80	-0.15
2.00	2.00	1.00	25.08	0.65	19.12	0.80	0.42	0.44	0.65	0.80	-0.15
9.00	1.00	1.00	25.08	0.65	19.12	0.80	0.42	0.44	0.65	0.80	-0.15
9.00	2.00	1.00	25.08	0.65	19.12	0.80	0.42	0.44	0.65	0.80	-0.15
9.00	3.00	1.00	25.08	0.65	19.12	0.80	0.42	0.44	0.65	0.80	-0.15
9.00	4.00	1.00	25.08	0.65	19.12	0.80	0.42	0.44	0.65	0.80	-0.15
1.00	2.00	1.00	25.08	0.65	19.14	0.80	0.42	0.44	0.65	0.80	-0.15
1.00	4.00	1.00	25.08	0.65	19.14	0.80	0.42	0.44	0.65	0.80	-0.15
8.00	1.00	1.00	25.08	0.65	19.15	0.80	0.42	0.44	0.65	0.80	-0.15
8.00	2.00	1.00	25.08	0.65	19.15	0.80	0.42	0.44	0.65	0.80	-0.15
8.00	3.00	1.00	25.08	0.65	19.15	0.80	0.42	0.44	0.65	0.80	-0.15
8.00	4.00	1.00	25.08	0.65	19.15	0.80	0.42	0.44	0.65	0.80	-0.15
4.00	4.00	1.00	25.08	0.65	19.18	0.80	0.42	0.44	0.65	0.80	-0.15
23.00	2.00	1.00	25.08	0.65	19.19	0.80	0.42	0.44	0.65	0.79	-0.15
7.00	2.00	1.00	25.08	0.65	19.20	0.80	0.42	0.44	0.65	0.79	-0.15
7.00	4.00	1.00	25.08	0.65	19.20	0.80	0.42	0.44	0.65	0.79	-0.15
2.00	1.00	1.00	25.08	0.65	19.21	0.80	0.42	0.44	0.65	0.79	-0.15
1.00	3.00	1.00	25.08	0.65	19.22	0.80	0.42	0.44	0.65	0.79	-0.15
2.00	3.00	1.00	25.08	0.65	19.32	0.79	0.42	0.44	0.65	0.79	-0.15
6.00	1.00	1.00	25.08	0.65	19.37	0.79	0.42	0.45	0.65	0.79	-0.15
22.00	1.00	1.00	25.08	0.65	19.55	0.79	0.42	0.44	0.65	0.79	-0.15
22.00	2.00	1.00	25.08	0.65	19.59	0.79	0.42	0.44	0.65	0.79	-0.15
22.00	3.00	1.00	25.08	0.65	19.59	0.79	0.42	0.44	0.65	0.79	-0.15
22.00	4.00	1.00	25.08	0.65	19.59	0.79	0.42	0.44	0.65	0.79	-0.15
1.00	1.00	1.00	25.08	0.65	19.65	0.79	0.42	0.45	0.65	0.79	-0.15
2.00	4.00	1.00	25.08	0.65	20.71	0.76	0.42	0.44	0.65	0.76	-0.15
12.00	3.00	1.00	25.08	0.65	23.21	0.70	0.42	0.46	0.65	0.70	-0.15

Tableau 25 : Performances du réseau de neurones validé par station (80% calibration, 20% validation)

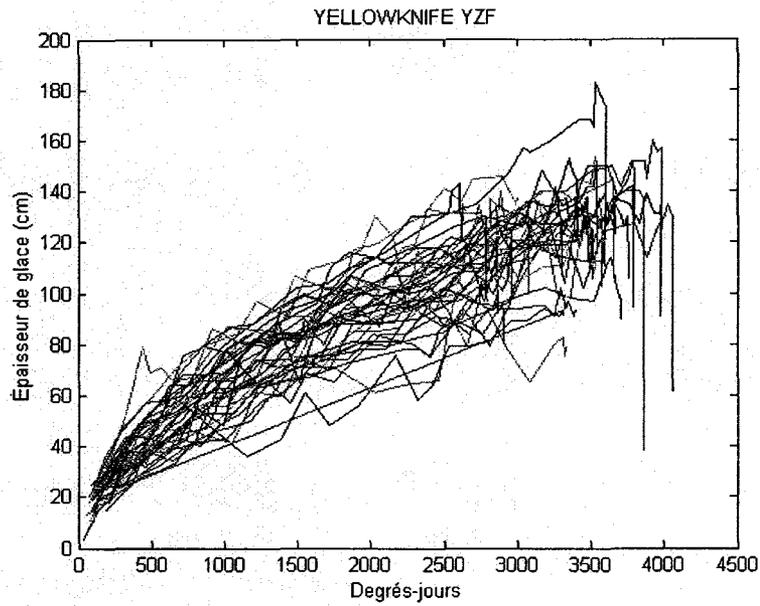
Station	Rmse (Stefan)	Rmse (RNA)	r2 (Stefan)	r2(RNA)	Rrmse (Stefan)	Rrmse (RNA)	Nash (Stefan)	Nash (RNA)	Biais (Stefan)	Biais (RNA)	Rbiais (Stefan)	Rbiais (RNA)
HA1	10.1135	4.9979	0.9839	0.9931	0.1105	0.0546	0.9073	0.9761	-8.4486	-3.6483	0.1105	0.0546
WFN	7.8401	7.7589	0.8485	0.8489	0.1295	0.1281	0.8313	0.8356	1.5515	2.1025	0.1295	0.1281
WLH	5.3041	4.7123	0.9329	0.9615	0.1072	0.0952	0.9037	0.9237	3.0257	-2.8182	0.1072	0.0952
WTL	8.85	7.3621	0.928	0.9349	0.1296	0.1078	0.9015	0.9302	4.5401	1.3273	0.1296	0.1078
YAH	7.3532	6.9929	0.9265	0.9265	0.1416	0.1347	0.8659	0.8773	4.6292	4.1199	0.1416	0.1347
YBK	7.5914	7.2796	0.9834	0.9852	0.0626	0.06	0.9834	0.9847	0.2778	0.2109	0.0626	0.06
YBT	8.3098	7.3846	0.8815	0.8859	0.1372	0.122	0.8475	0.8786	-1.9323	0.2638	0.1372	0.122
YBX	11.8228	9.6343	0.7611	0.8289	0.2437	0.1986	0.7147	0.808	4.1966	3.3193	0.2437	0.1986
YEI	14.5112	11.7684	0.883	0.9306	0.1623	0.1316	0.8709	0.9149	3.7222	3.2069	0.1623	0.1316
YGM	14.4215	6.1392	0.6375	0.9328	0.1831	0.0779	0.629	0.9327	0.8303	0.1833	0.1831	0.0779
YIV	8.3276	7.3366	0.8814	0.8955	0.1513	0.1333	0.8427	0.8747	3.7885	1.7971	0.1513	0.1333
YKL	10.1805	9.6596	0.9178	0.9181	0.1357	0.1287	0.9035	0.9124	3.8266	2.4665	0.1357	0.1287
YPY	18.1144	17.5735	0.6875	0.6987	0.3129	0.3036	0.6675	0.6884	0.3189	-2.043	0.3129	0.3036
YVP	10.7969	7.402	0.9392	0.9566	0.1331	0.0913	0.8996	0.9516	-5.4472	1.3003	0.1331	0.0913
YYR	9.6357	9.1542	0.7731	0.8081	0.1449	0.1376	0.7679	0.7939	-0.5751	2.6108	0.1449	0.1376
YZF	9.501	8.0008	0.9336	0.9444	0.13	0.1095	0.916	0.9397	-4.25	-2.1935	0.13	0.1095

Tableau 26 : Performances du réseau de neurones global validé par station (80% calibration, 20% validation)

Rmse (Stefan)	Rmse (RNA)	r2 (Stefan)	r2 (RNA)	Rrmse (Stefan)	Rrmse (RNA)	Nash (Stefan)	Nash (RNA)	Biais (Stefan)	Biais (RNA)	Rbiais (Stefan)	Rbiais (RNA)
22.3876	0.7294	14.048	0.8944	0.2922	0.1834	0.7276	0.8929	-0.3192	-1.6821	-0.0736	-0.0955
22.3293	0.7272	14.17	0.8902	0.2911	0.1847	0.7254	0.8895	-0.0199	-1.1267	-0.068	-0.0837
22.1795	0.7282	14.3056	0.887	0.2897	0.1869	0.7259	0.8861	-0.5569	-1.3545	-0.0779	-0.0886
22.1145	0.7273	14.2394	0.8874	0.2903	0.1869	0.7251	0.8861	-0.9013	-1.5463	-0.0813	-0.09
22.1519	0.728	14.21	0.8885	0.291	0.1867	0.7256	0.8872	-0.8591	-1.6129	-0.0802	-0.0914
22.116	0.728	14.2447	0.8876	0.2909	0.1873	0.7256	0.8863	-0.9819	-1.6275	-0.0832	-0.0927
22.1026	0.728	14.2608	0.8872	0.2914	0.188	0.7255	0.8858	-1.0438	-1.616	-0.0848	-0.0931
22.0092	0.7284	14.2269	0.8868	0.2901	0.1875	0.7259	0.8855	-1.0856	-1.5754	-0.0864	-0.0943
22.0736	0.7266	14.2491	0.8864	0.2912	0.1879	0.7241	0.8851	-1.1133	-1.5446	-0.0864	-0.094
22.1746	0.727	14.2743	0.8871	0.2921	0.1881	0.7242	0.8858	-1.0203	-1.5368	-0.086	-0.0945
22.1785	0.7278	14.2868	0.8873	0.2923	0.1883	0.725	0.886	-1.0175	-1.5723	-0.0875	-0.0959
22.272	0.728	14.3246	0.8874	0.2932	0.1885	0.7243	0.886	-1.066	-1.5636	-0.0942	-0.0964
22.2728	0.7279	14.3114	0.8876	0.2933	0.1885	0.7243	0.8862	-1.1056	-1.5748	-0.0945	-0.0967
22.2819	0.7273	14.3458	0.887	0.2938	0.1891	0.7239	0.8856	-1.142	-1.5625	-0.0947	-0.0979
22.2553	0.7269	14.3201	0.887	0.2936	0.1889	0.7236	0.8856	-1.1999	-1.5904	-0.0949	-0.098
22.2274	0.7265	14.3238	0.8866	0.2935	0.1891	0.7234	0.8852	-1.2331	-1.5953	-0.0948	-0.0978
22.2869	0.7258	14.3397	0.8867	0.2938	0.189	0.7227	0.8853	-1.2311	-1.6297	-0.0945	-0.098
22.3101	0.7254	14.3748	0.8862	0.2943	0.1896	0.7224	0.8848	-1.2233	-1.5978	-0.0939	-0.0977
22.3097	0.726	14.3572	0.8867	0.2944	0.1895	0.723	0.8853	-1.1796	-1.5701	-0.0932	-0.0978
22.303	0.7257	14.3514	0.8866	0.2945	0.1895	0.7228	0.8853	-1.1444	-1.5297	-0.0921	-0.0967

Note : Chaque ligne de ce tableau correspond à une répartition aléatoire des données en un ensemble de validation et un ensemble de calibration.

(a)



(b)

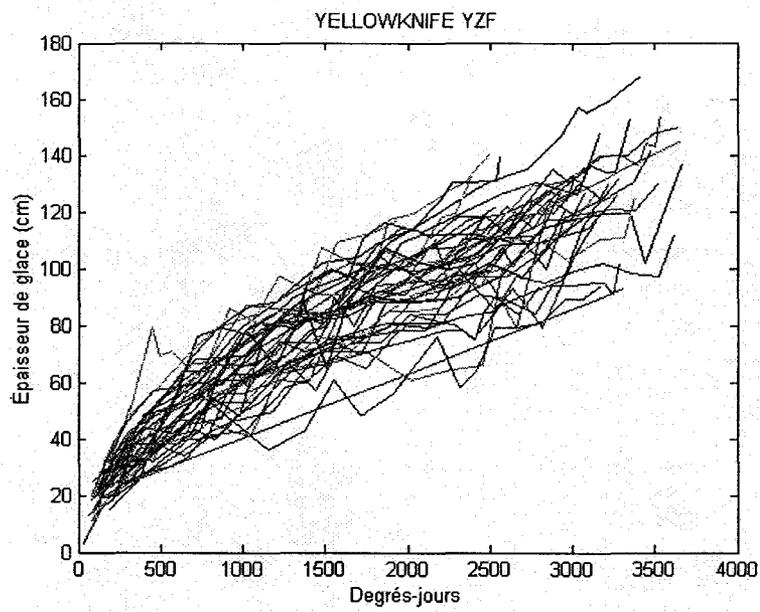


Figure 3: Identification de la phase de croissance de la glace à la station YZF :a) toutes les observations b) phase de croissance.

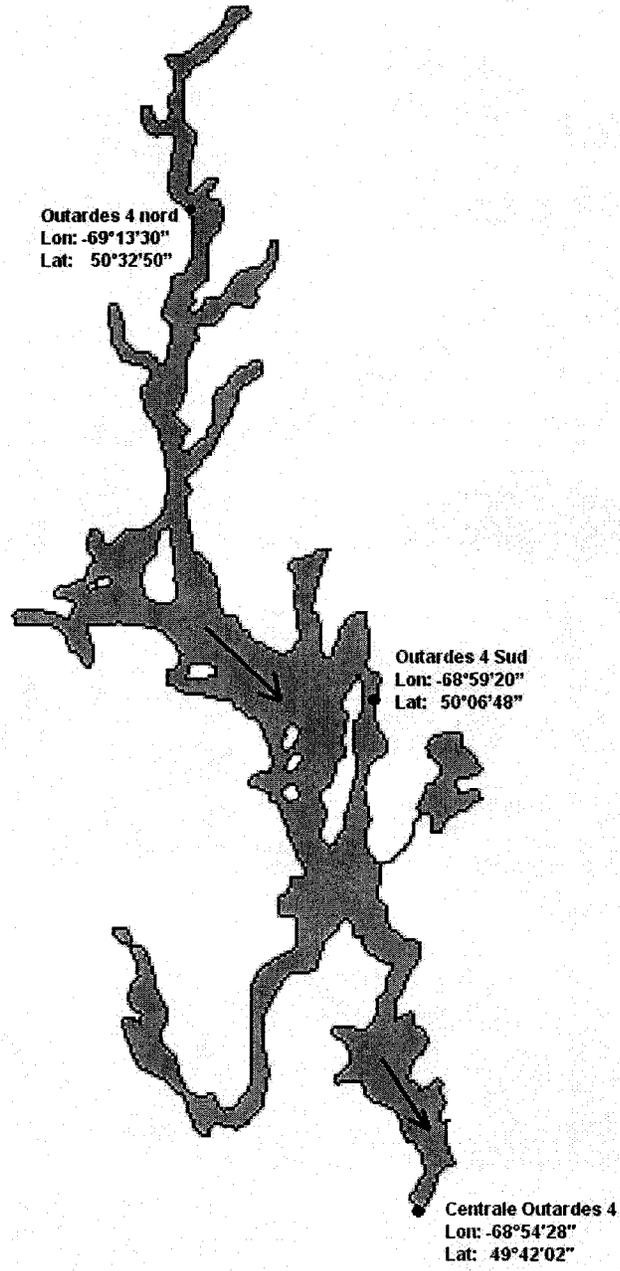


Figure 4: Réservoir Outardes 4

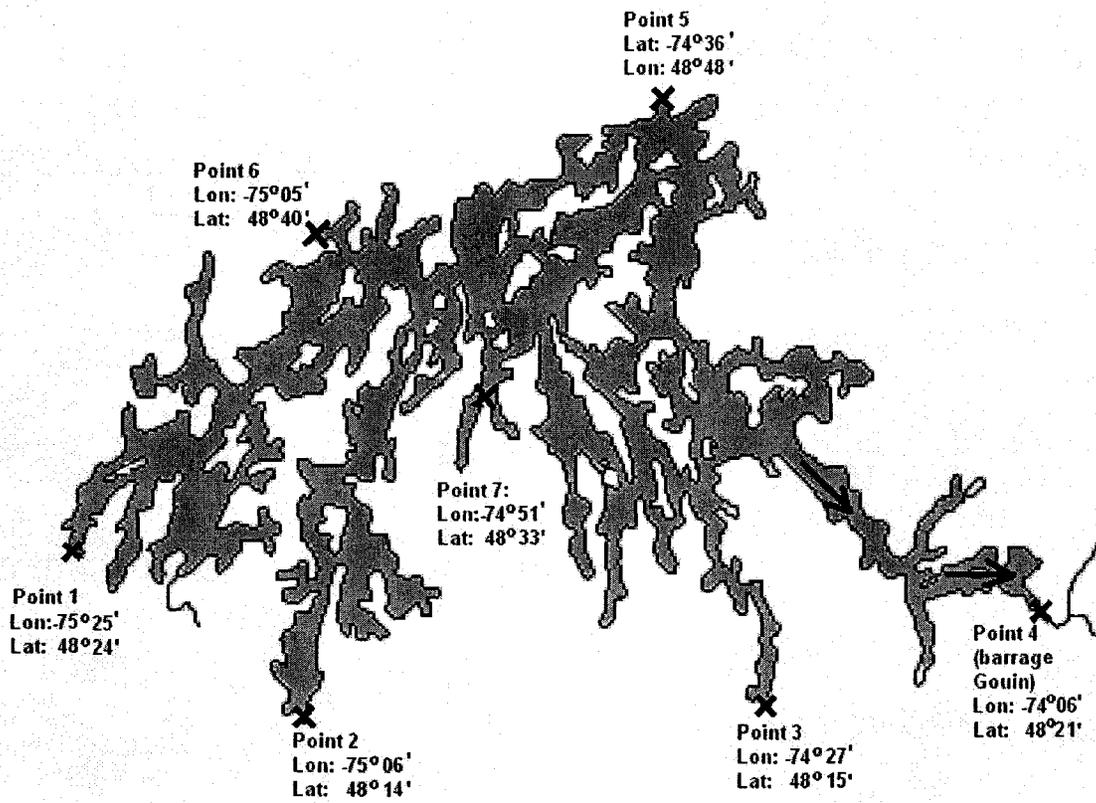


Figure 5: Réservoir Gouin

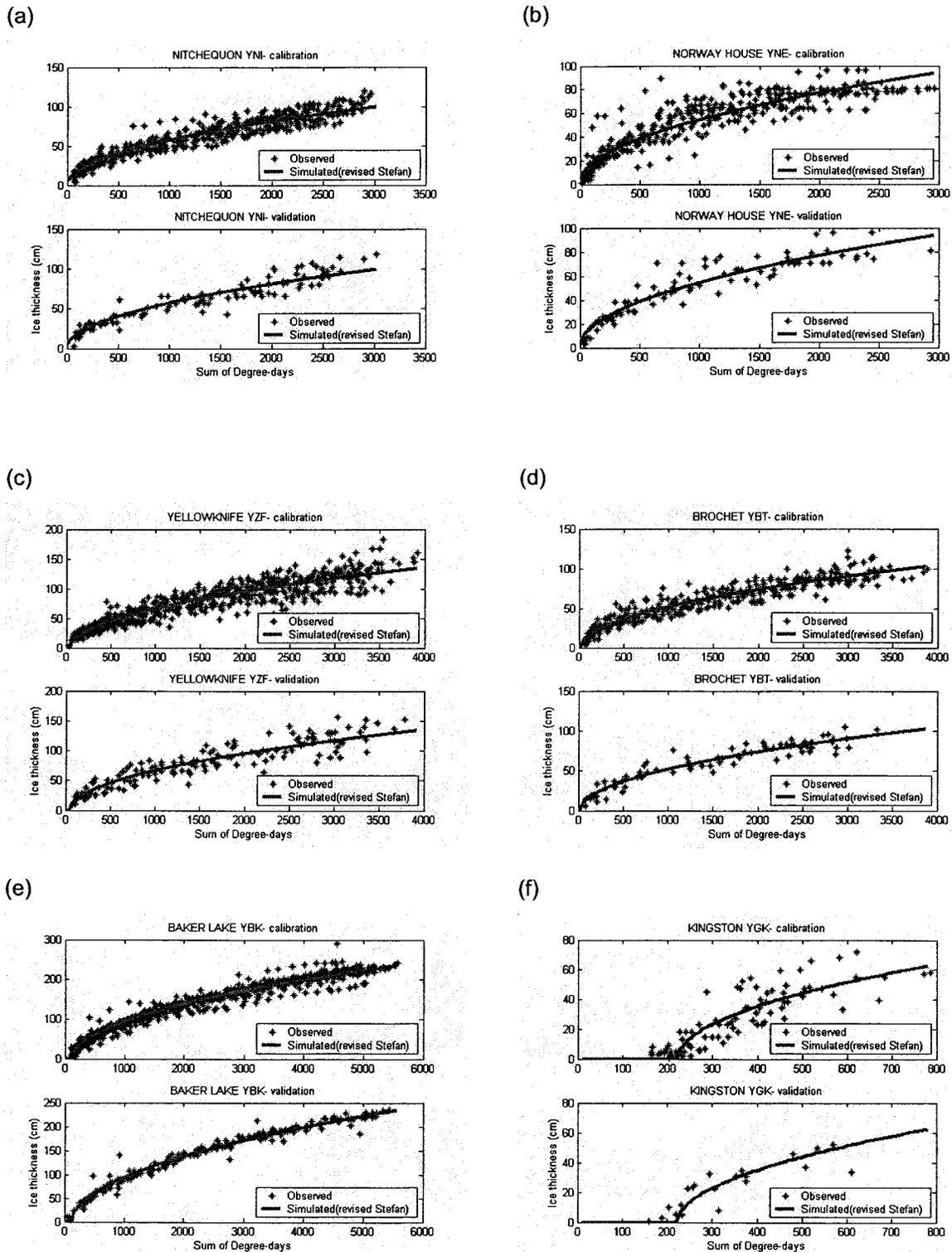
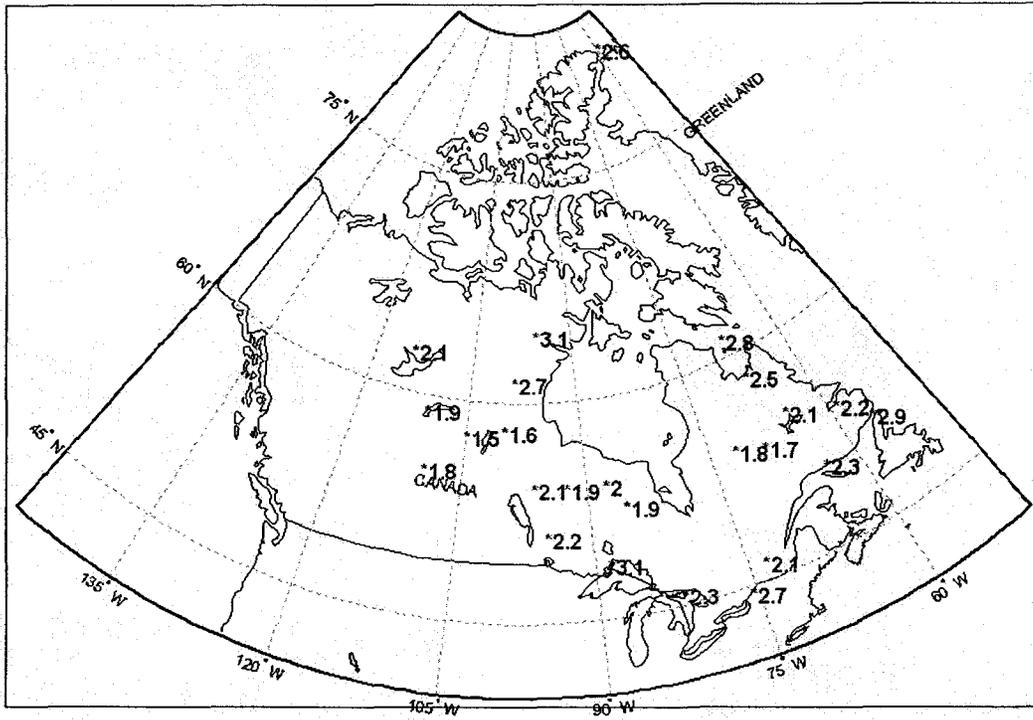


Figure 6: Épaisseur de glace vs cumul des degrés jours à quelques stations de mesure de glace

(a)



(b)

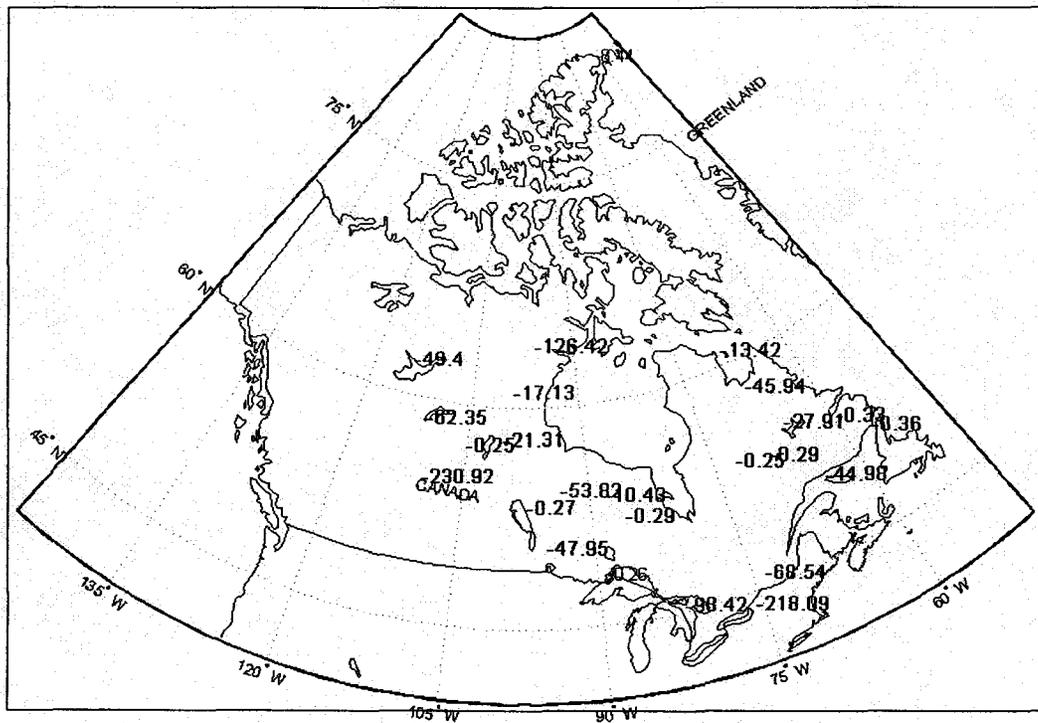


Figure 7: Variabilité dans l'espace des paramètres de la loi de Stefan Modifiée

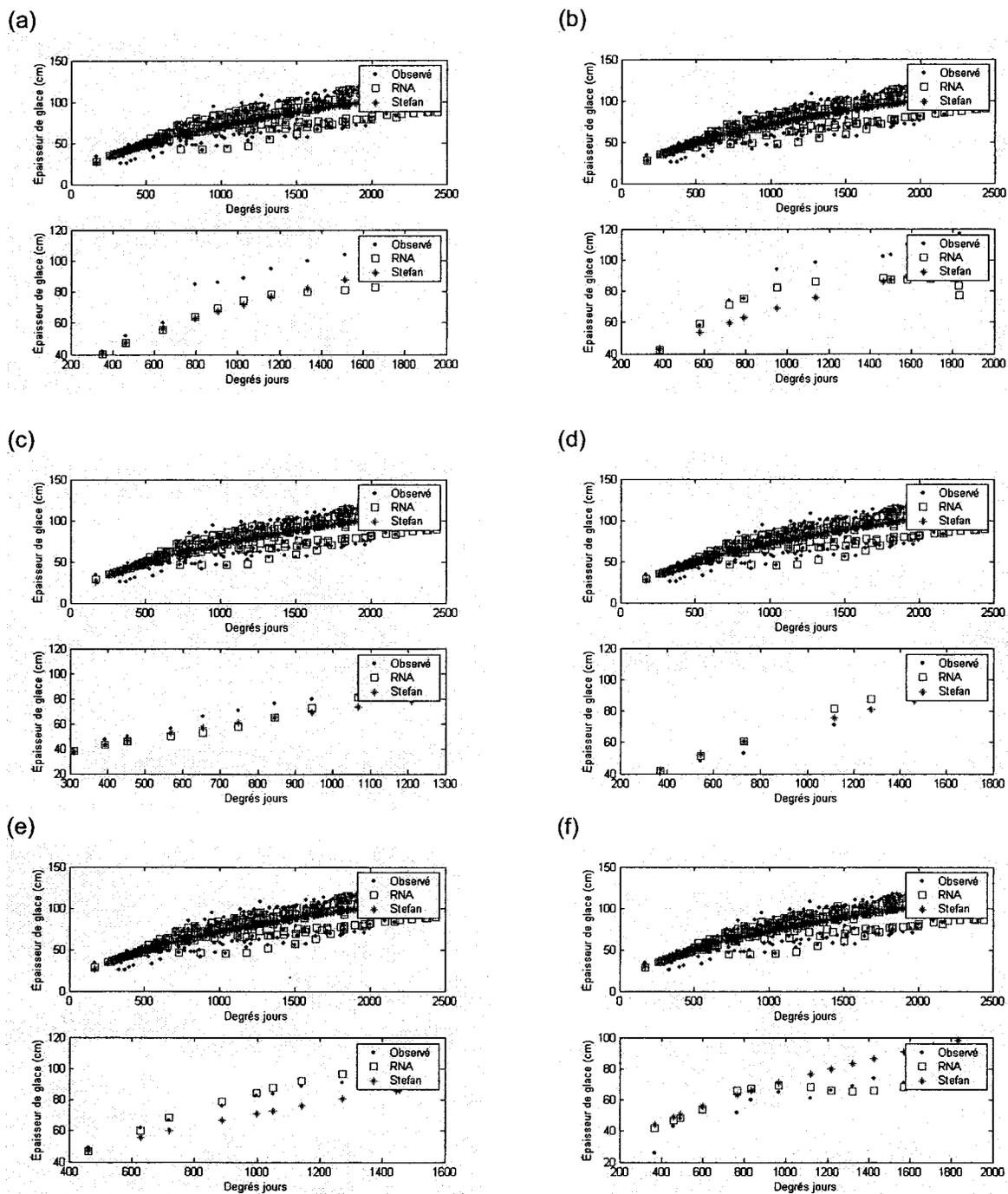
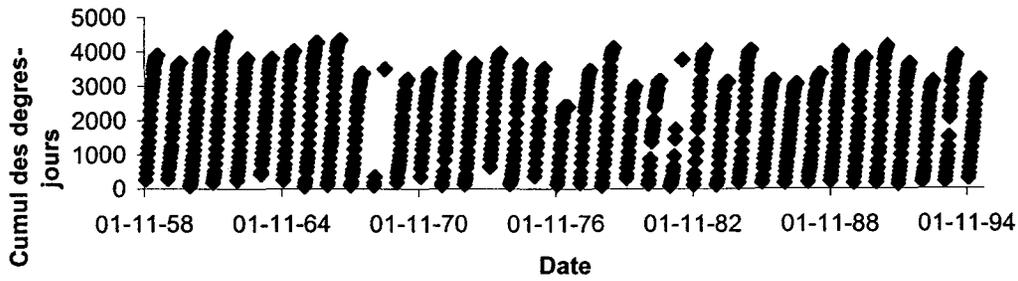
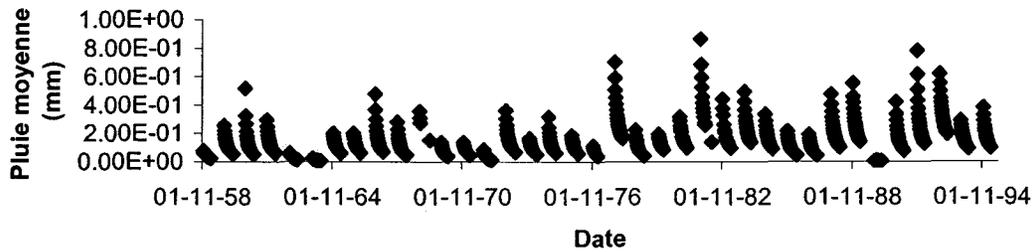


Figure 8: Application du modèle Neuronal et de la loi de Stefan à la station YGM (*leave one out*).

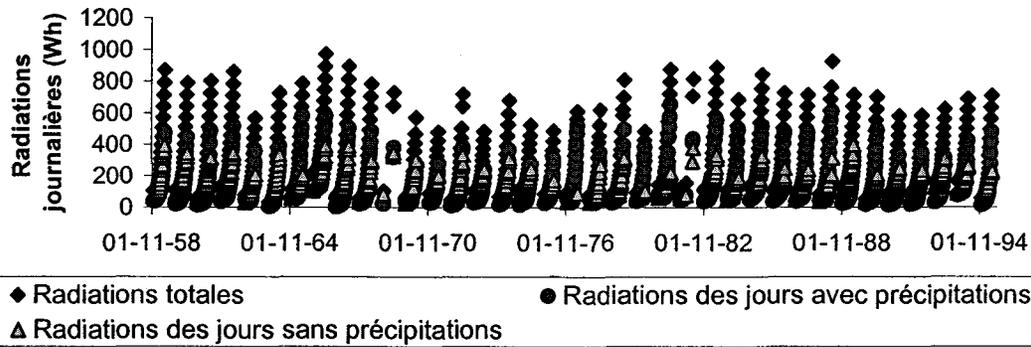
(a)



(b)



(c)



(d)

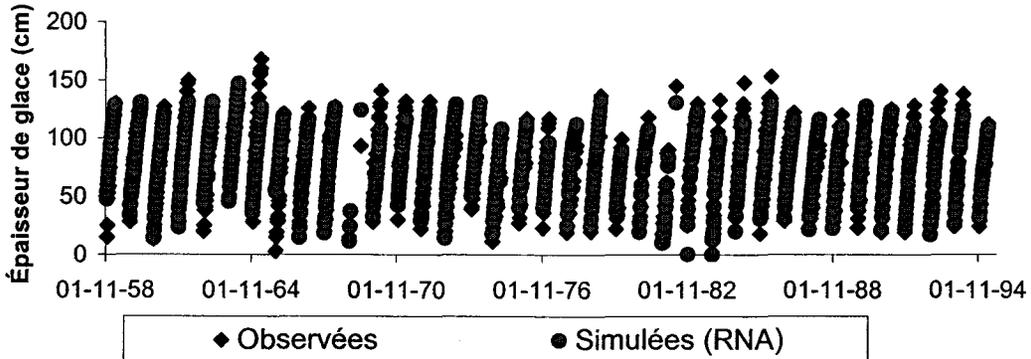


Figure 9: Paramètres météorologiques et épaisseurs de glace simulées et observées à la station YZF : a) cumul des degrés-jours; b) pluie moyenne pendant la phase de croissance de la glace; c) radiations journalières; d) épaisseur de glace observées et simulés (RNA)

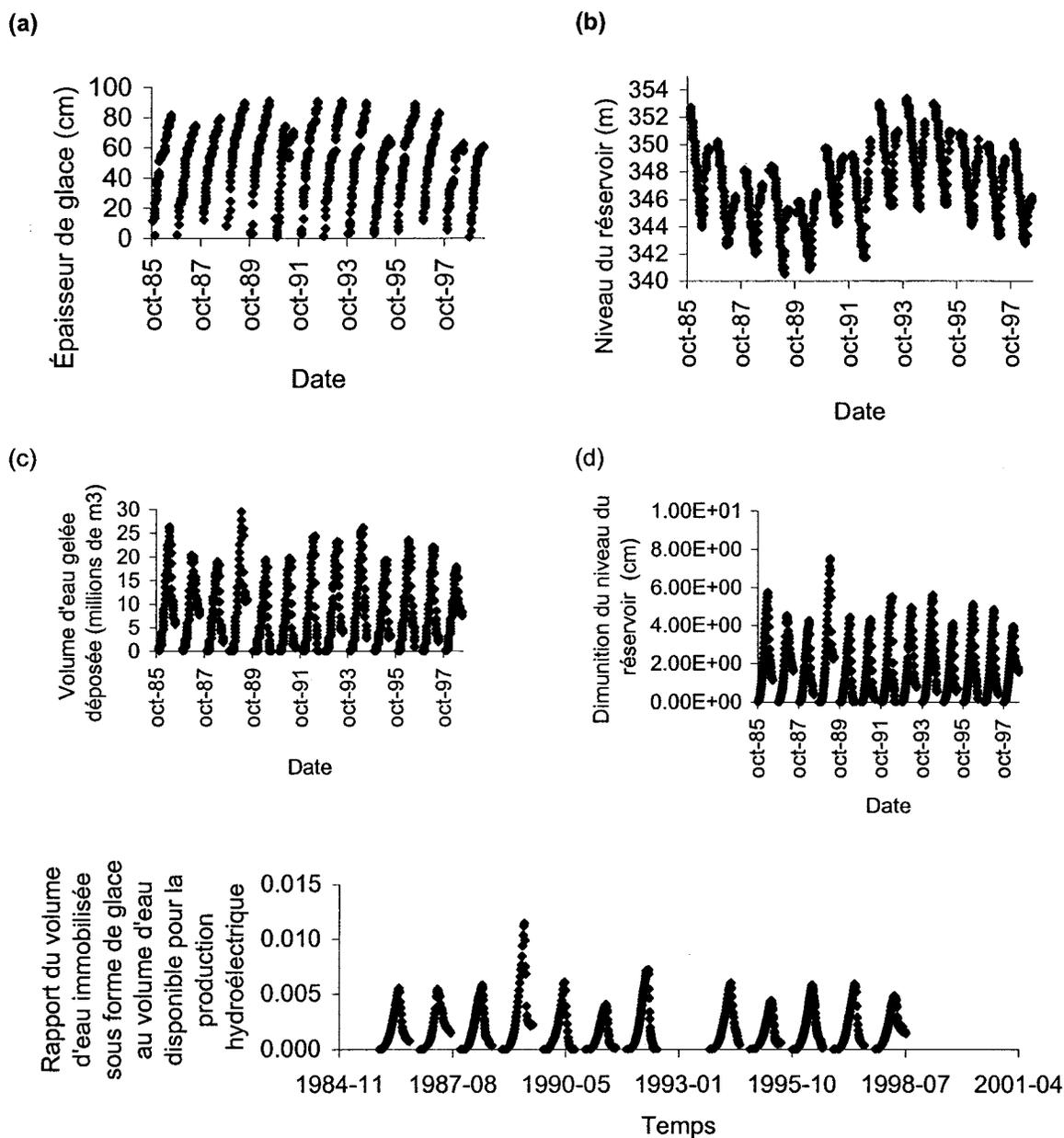


Figure 10: Calcul du volume d'eau immobilisé par gel sur les berges au réservoir Outardes 4: a) épaisseur de glace simulée; b) niveau dans le réservoir; c) volume de glace abandonnée sur les berges; d) diminution du niveau du réservoir.

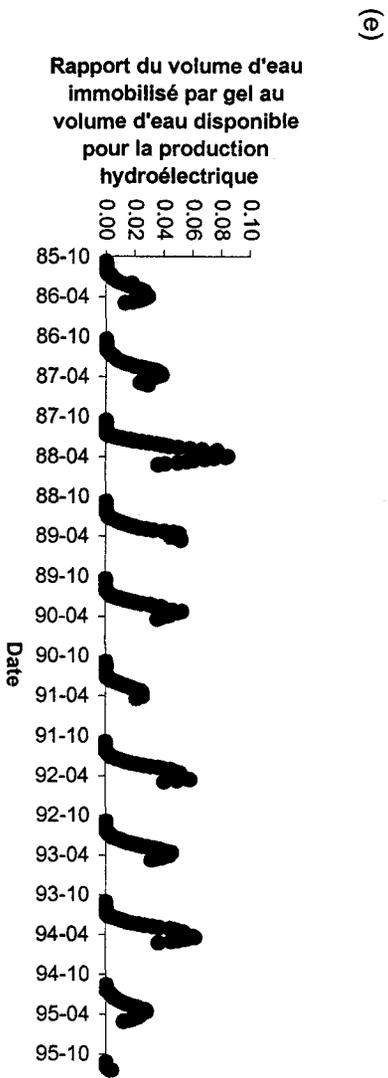
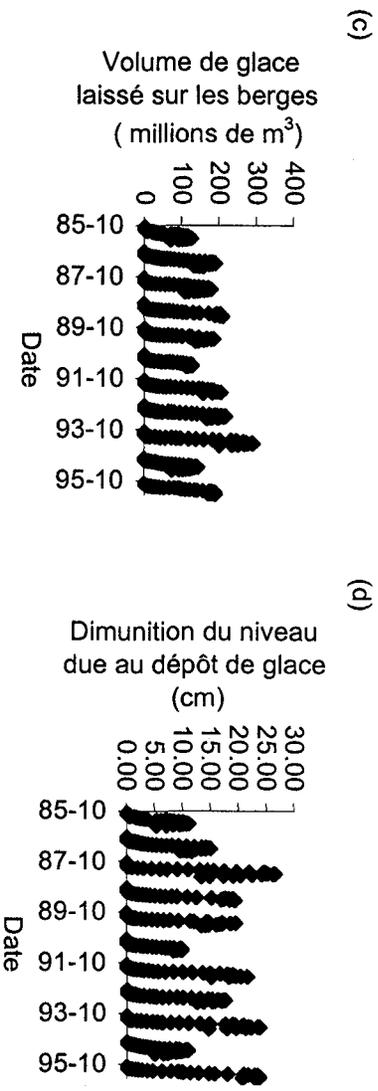
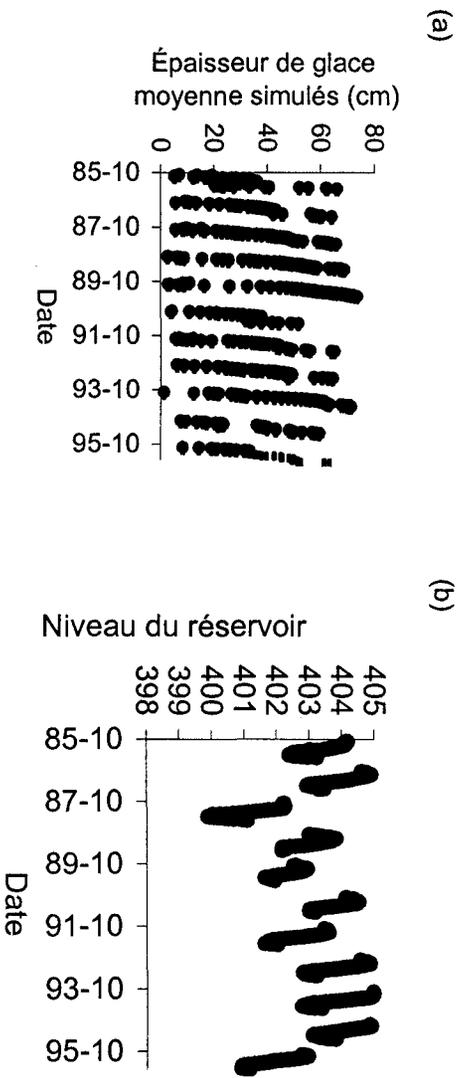


Figure 11: Calcul du volume d'eau immobilisé par gel sur les berges au réservoir Gouin: a) épaisseur de glace simulée; b) niveau dans le réservoir; c) volume d'eau gelée abandonnée sur les berges; d) diminution du niveau du réservoir.

ANNEXE I. CALCUL DES RADIATIONS SOLAIRES AU DESSUS DE L'ATMOSPHERE

Ces relations sont tirées de Solar Radiations Monitoring Laboratory (2004). On sait que l'intensité des radiations solaires dans l'espace est 1367 W/m^2 . Cette valeur varie de $\pm 3\%$ en fonction de la distance de la terre au soleil. On a

$$I = 1.367 \left(\frac{R_{av}}{R_v} \right)^2 * \cos(Z) \text{ KW/m}^2$$

où R_{av} est la distance moyenne de la terre au soleil, R la distance de la terre au soleil et Z le zénith (angle entre le soleil et la normale à sa surface irradiée). Z dépend de la déclinaison d de l'axe de la terre, de la latitude et de l'heure solaire. Si on note n le jour julien, Eqt (Equation of time) la variation en minutes de l'heure solaire (T_{solar}) par rapport à l'heure locale (T_{local}) au cours de l'année, w l'heure solaire angulaire (en radians), $Long_{local}$ la longitude du méridien central du fuseau horaire et $Long_{sm}$ la longitude du point de calcul, on a les approximations suivantes.

$$\begin{aligned} \left(\frac{R_a}{R_v} \right)^2 &= 1.00011 + 0.034221 * \cos\left(2\pi \frac{n}{365}\right) + 0.001280 * \sin\left(2\pi \frac{n}{365}\right) \\ &+ 0.000719 * \cos\left(4\pi \frac{n}{365}\right) + 0.000077 * \sin\left(4\pi \frac{n}{365}\right) \\ d &= 23.45 * \sin\left(2\pi \frac{284 + n}{365}\right) \end{aligned}$$

$$Eq_t = \begin{cases} -14.2 \sin\left(\pi \frac{n+7}{111}\right) & 1 \leq n < 106 \\ 4.0 \sin\left(\pi \frac{n-106}{59}\right) & 107 \leq n < 166 \\ -6.5 \sin\left(\pi \frac{n-166}{80}\right) & 167 \leq n < 246 \\ 16.4 \sin\left(\pi \frac{n-247}{113}\right) & 247 \leq n \leq 365 \end{cases}$$

$$T_{solar} = T_{local} + \frac{Eq_t}{60} + (Long_{sm} - Long_{local})/15$$

ANNEXE II. DESCRIPTION DE LA BASE DE DONNÉES SUR LA GLACE

De telles bases de données sont utiles entre autres pour la validation et l'amélioration des modèles numériques de glace et le suivi des changements climatiques. La base de donnée développée ici permet de générer (par interpolation en utilisant les archives d'Environnement-Canada) les séries de températures journalières moyennes aux sites de mesure de glace. Ces séries pourront ensuite être utilisées pour tester différents modèles de croissance de glace.

AII.1 MESURES IN SITU

Les données d'épaisseur de glace et de neige en provenance de 195 sites sont disponibles sur le site Web du Service canadien des glaces (<http://ice-glaces.ec.gc.ca>). Elles proviennent de deux programmes consécutifs de mesures d'épaisseur de glace : *le programme initial* porte sur 195 sites comprend les mesures d'épaisseur de glace et de la neige prises depuis l'installation des premières stations de l'arctique en 1947. Le nombre de relevés varie considérablement selon le nombre d'années d'activité des stations. Certaines stations sont en opération depuis plus de 50 années. Un certain nombre de stations font également des observations météorologiques et des mesures de radiation. Les relevés postérieurs à 1992 contiennent de l'information supplémentaire dont la topographie de la glace, les ouvertures dans la glace ainsi que méthode d'observation. Par le début de 2002, la plupart des stations du programme initial ne prenaient plus de mesures en raison des compressions budgétaires au début des années 90. Un *nouveau programme* a été instauré à l'automne 2002 pour répondre à un intérêt croissant de mise à jour de ces données historiques en vue de leur utilisation dans les études de changements climatiques. Les données en provenance des deux programmes ont été téléchargées et mises sous format Ms. Access pour en faciliter la manipulation.

AII.2 TÉLÉDÉTECTION

Le Service Canadien des Glaces dispose également d'une base de données contenant l'information sur la couverture de glace pour 156 lacs répartis sur le territoire

canadien; Ces données, qui vont de 1995 à 2003, sont obtenues sur une base hebdomadaire à partir d'analyse satellitaire et sont ensuite utilisées dans les modèles de prévision du CMC (centre météorologique canadien). On remarque cependant que l'épaisseur de glace obtenue par cette méthode est pratiquement constante tout au long de l'année, probablement à cause d'un manque de prévision. Par contre, les estimations obtenues par télédétection permettent d'estimer les dates de gel et de dégel, contrairement aux mesures in situ qui sont plus rares et plus espacées.

AII.3 DONNÉES CLIMATIQUES

Comme il est également nécessaire de connaître certaines données météorologiques pour modéliser la formation de la glace, la liste des stations météorologiques du Canada (<http://ftp.cmc.ec.gc.ca/metstat/metstatl.txt>) a été également ajoutée à la base de données.

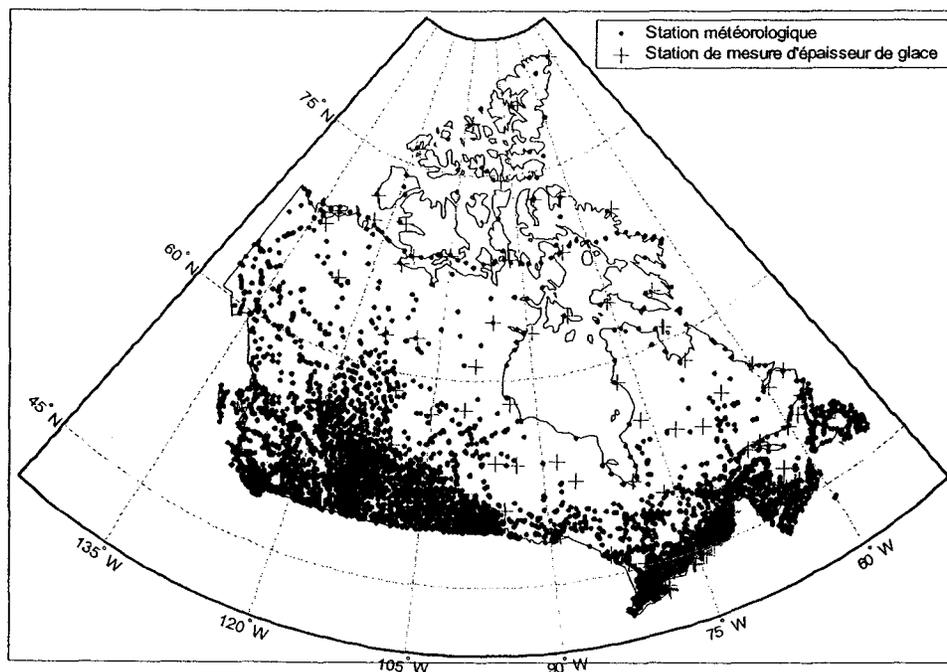


Figure 12: Emplacement des stations de mesure de glace par rapport aux stations météorologiques

Cette liste permet de trouver automatiquement les stations météorologiques les plus proches d'un site de mesure d'épaisseur de glace. L'ensemble des mesures de température, de précipitation et de neige au sol des 755 stations météorologiques est également disponible sur le site d'Environnement Canada (<http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/>). Ces mesures ont été converties et intégrées à la base de données. On peut voir à la Figure 12 la localisation des stations météorologiques par rapport aux stations de mesure d'épaisseur de glace.

AII.4 CONSTRUCTION DE LA SÉRIE DE DONNÉES

Comme les stations de mesure de glace ne coïncident pas avec les stations météorologiques, la température à une date donnée est obtenues par la méthode des quatre quadrants : le programme recherche la station météorologique la plus proche successivement au nord-est, au nord-ouest, au sud ouest et au sud-est. La température au site de mesure de glace est considérée comme la moyenne pondérée des températures aux stations météorologique. Les facteurs de pondération sont inversement proportionnels aux distances du site de mesure aux stations météorologiques. On n'a pas corrigé la température en fonction de l'altitude parce qu'elle n'est pas actuellement disponible.

Interface de la base de données

La fenêtre principale donne accès à la liste des stations de mesure in situ (à gauche) et à la liste des lacs dont la couverture de glace est estimée par télédétection. En choisissant une station dans le tableau de gauche, l'utilisateur peut procéder à une analyse de l'épaisseur de glace en fonction des données climatiques (pour le moment, seuls le cumul des degrés-jours négatifs est considéré). Le tableau de droite permet de procéder à la même analyse, mais sur les dates de formation de gel.

(a)

STATIONS DE MESURE DIRECTE				LITES DE MESURE PAR TELEDETECTION (LACZ DE LAC)			
STATION	NOM	LONGITUDE	LATITUDE	STATION	NOM	LONGITUDE	LATITUDE
1	ALBERTVILLE	48.11	11.11	1	ALBERTVILLE	48.11	11.11
2	ALBERTVILLE	48.11	11.11	2	ALBERTVILLE	48.11	11.11
3	ALBERTVILLE	48.11	11.11	3	ALBERTVILLE	48.11	11.11
4	ALBERTVILLE	48.11	11.11	4	ALBERTVILLE	48.11	11.11
5	ALBERTVILLE	48.11	11.11	5	ALBERTVILLE	48.11	11.11
6	ALBERTVILLE	48.11	11.11	6	ALBERTVILLE	48.11	11.11
7	ALBERTVILLE	48.11	11.11	7	ALBERTVILLE	48.11	11.11
8	ALBERTVILLE	48.11	11.11	8	ALBERTVILLE	48.11	11.11
9	ALBERTVILLE	48.11	11.11	9	ALBERTVILLE	48.11	11.11
10	ALBERTVILLE	48.11	11.11	10	ALBERTVILLE	48.11	11.11
11	ALBERTVILLE	48.11	11.11	11	ALBERTVILLE	48.11	11.11
12	ALBERTVILLE	48.11	11.11	12	ALBERTVILLE	48.11	11.11
13	ALBERTVILLE	48.11	11.11	13	ALBERTVILLE	48.11	11.11
14	ALBERTVILLE	48.11	11.11	14	ALBERTVILLE	48.11	11.11
15	ALBERTVILLE	48.11	11.11	15	ALBERTVILLE	48.11	11.11
16	ALBERTVILLE	48.11	11.11	16	ALBERTVILLE	48.11	11.11
17	ALBERTVILLE	48.11	11.11	17	ALBERTVILLE	48.11	11.11
18	ALBERTVILLE	48.11	11.11	18	ALBERTVILLE	48.11	11.11
19	ALBERTVILLE	48.11	11.11	19	ALBERTVILLE	48.11	11.11
20	ALBERTVILLE	48.11	11.11	20	ALBERTVILLE	48.11	11.11
21	ALBERTVILLE	48.11	11.11	21	ALBERTVILLE	48.11	11.11
22	ALBERTVILLE	48.11	11.11	22	ALBERTVILLE	48.11	11.11
23	ALBERTVILLE	48.11	11.11	23	ALBERTVILLE	48.11	11.11
24	ALBERTVILLE	48.11	11.11	24	ALBERTVILLE	48.11	11.11
25	ALBERTVILLE	48.11	11.11	25	ALBERTVILLE	48.11	11.11
26	ALBERTVILLE	48.11	11.11	26	ALBERTVILLE	48.11	11.11
27	ALBERTVILLE	48.11	11.11	27	ALBERTVILLE	48.11	11.11
28	ALBERTVILLE	48.11	11.11	28	ALBERTVILLE	48.11	11.11
29	ALBERTVILLE	48.11	11.11	29	ALBERTVILLE	48.11	11.11
30	ALBERTVILLE	48.11	11.11	30	ALBERTVILLE	48.11	11.11

(b)

Date	Lac	Long	Lat	Elev	Temp	Humid	Press	Wind	Dir	Dir2	Dir3	Dir4	Dir5	Dir6	Dir7	Dir8	Dir9	Dir10
15/01/2000	ALBERTVILLE	48.11	11.11	1111	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
16/01/2000	ALBERTVILLE	48.11	11.11	1111	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
17/01/2000	ALBERTVILLE	48.11	11.11	1111	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
18/01/2000	ALBERTVILLE	48.11	11.11	1111	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
19/01/2000	ALBERTVILLE	48.11	11.11	1111	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
20/01/2000	ALBERTVILLE	48.11	11.11	1111	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
21/01/2000	ALBERTVILLE	48.11	11.11	1111	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
22/01/2000	ALBERTVILLE	48.11	11.11	1111	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
23/01/2000	ALBERTVILLE	48.11	11.11	1111	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
24/01/2000	ALBERTVILLE	48.11	11.11	1111	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
25/01/2000	ALBERTVILLE	48.11	11.11	1111	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
26/01/2000	ALBERTVILLE	48.11	11.11	1111	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
27/01/2000	ALBERTVILLE	48.11	11.11	1111	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
28/01/2000	ALBERTVILLE	48.11	11.11	1111	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
29/01/2000	ALBERTVILLE	48.11	11.11	1111	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
30/01/2000	ALBERTVILLE	48.11	11.11	1111	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

Figure 13: Interface de la base de données

ANNEXE III. INTERFACE ET MODE D'EMPLOI DU PROGRAMME D'IDENTIFICATION DU VOLUME DE GLACE ABANDONNÉE SUR LES BERGES EN HIVER

AIII.1 INTRODUCTION

Un programme informatique basé sur l'article "*Modélisation de la croissance du couvert de glace sur les lacs canadiens par réseau de neurones artificiels*" a été développé. Il permet de simuler l'épaisseur de glace sur un lac quelconque et éventuellement de calculer le volume d'eau gelée abandonnée sur les berges si on dispose de l'historique des niveaux. Ce programme prend comme entrée un fichier de données météorologiques produit avec la base de données développée dans le projet, la courbe d'emmagasinement du réservoir ainsi qu'un historique des niveaux. Il donne année après année l'épaisseur de glace simulée par réseau de neurones artificiels, le volume de glace déposé sur les berges ainsi que la perte de hauteur de chute due au dépôt de glace. Il est écrit avec Visual Basic et est distribuable sous forme d'exécutable. Les calculs utilisant le réseau de neurones sont faits avec un script Matlab compilé et ne nécessitent pas que Matlab soit installé sur la machine de l'utilisateur.

AIII.2 PRÉPARATION DES DONNÉES

Le fichier de données météorologiques (en format texte) est préparé avec l'interface de la base de données développée au cours du projet (figure 14). L'utilisateur n'aura qu'à spécifier les coordonnées géographiques du lac. Il comprend le nom du lac (première ligne), la longitude et la latitude (deuxième ligne). Le reste du fichier contient sous forme tabulaire le jour, le mois, l'année, la pluie (mm/j), la neige moyenne (cm), le cumul des radiations des jours avec précipitations ($W \cdot \text{jours}/\text{m}^2$), le cumul des radiations des jours sans précipitations ($W \cdot \text{jours}/\text{m}^2$), le cumul des degrés-jours, l'épaisseur de glace observée (-9999 si manquant). Les autres données facultatives sont le fichier contenant la courbe d'emmagasinement (altitude-surface en m^2), et celui contenant l'historique des niveaux journaliers (jour, mois, année, niveau en m) sous forme tabulaire.

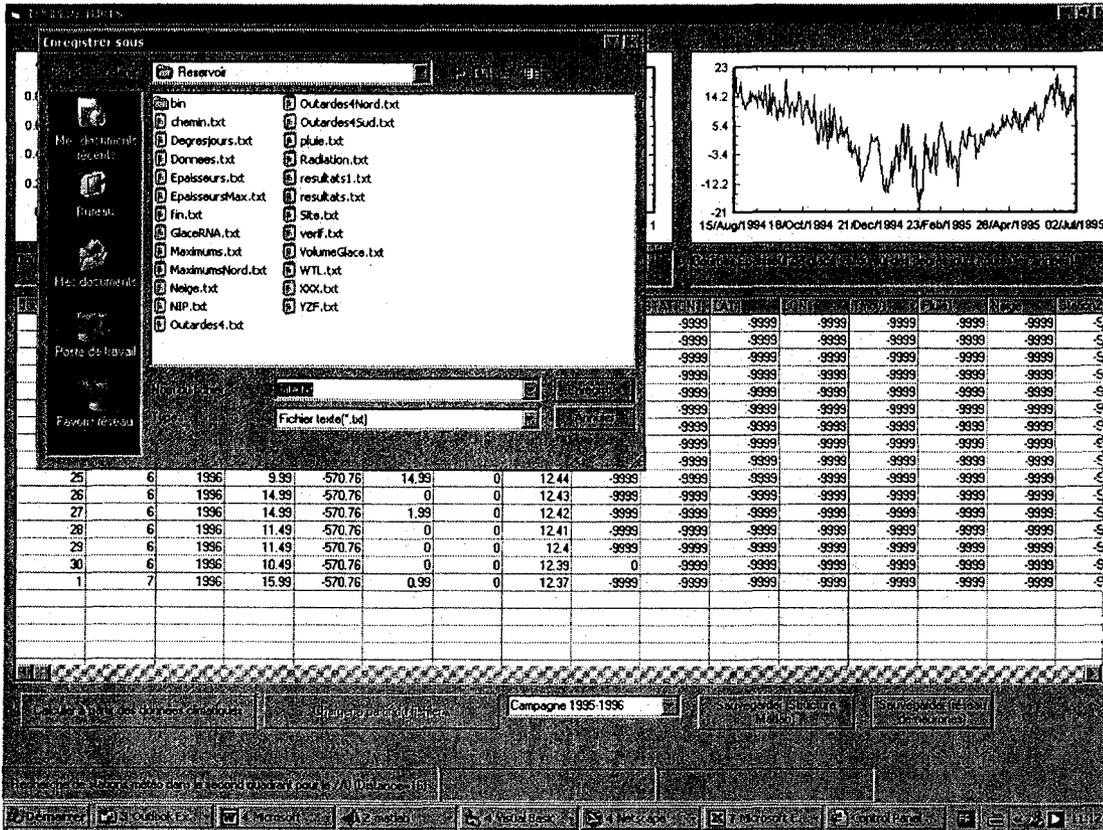


Figure 14: Préparation des données météorologiques d'entrée

AIII.3 SIMULATION DE L'ÉPAISSEUR DE GLACE

L'utilisateur charge les données météorologiques en cliquant sur le bouton "charger les données d'entrée". Il a alors la possibilité de les passer en revue sous diverses formes (année par année, années superposées ou de façon séquentielle). En cliquant sur le bouton «simuler la hauteur de glace » il pourra également visualiser les hauteurs de glace simulées et observées (éventuellement) avec les mêmes options (figure 15).

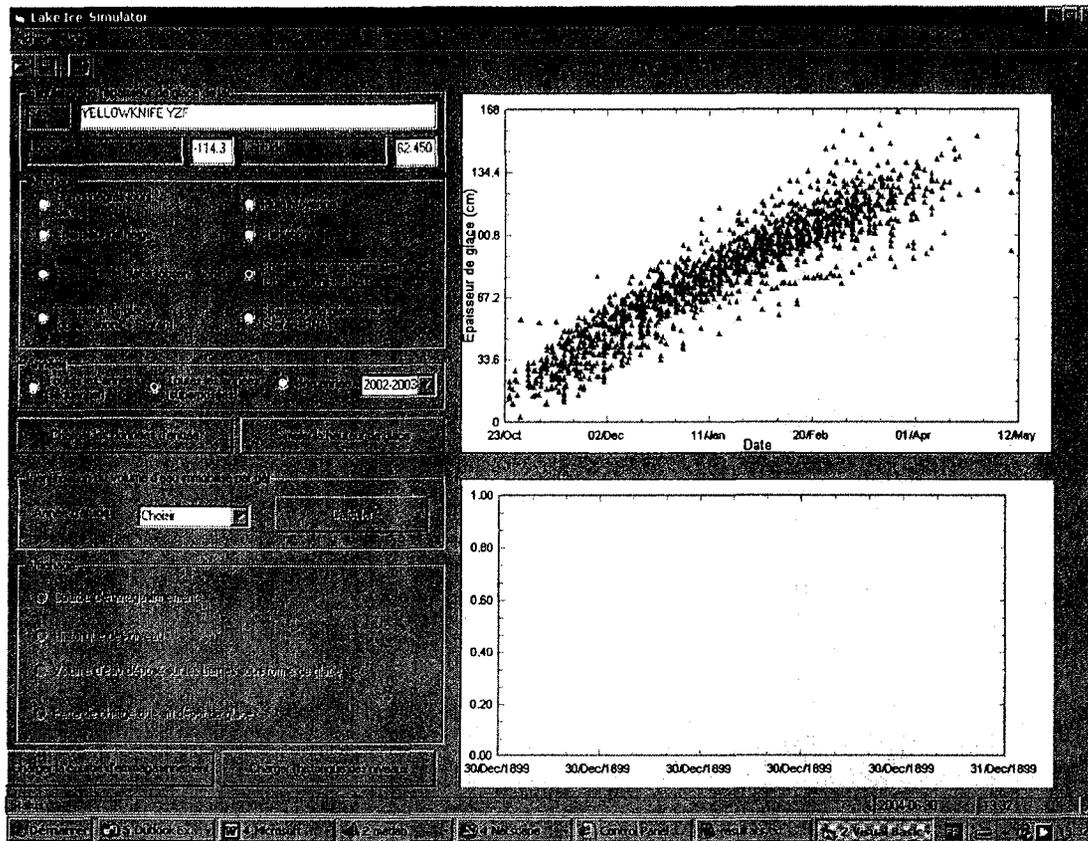


Figure 15: Simulation de l'épaisseur de glace

AIII.4 SIMULATION DU VOLUME D'EAU GELÉE DÉPOSÉE SUR LES BERGES

L'utilisateur charge la courbe d'emmagasinement et l'historique des niveaux en cliquant sur les boutons correspondant (en bas à droite de l'écran). Lorsque ces deux données sont disponibles, le programme calcule le volume d'eau gelée abandonnée sur les berges pour chaque année ainsi que son impact sur le niveau du réservoir. Les graphiques du niveau historique, du volume d'eau gelée sur les berges et de la perte de charge peuvent être visualisés année par année (figure 16).

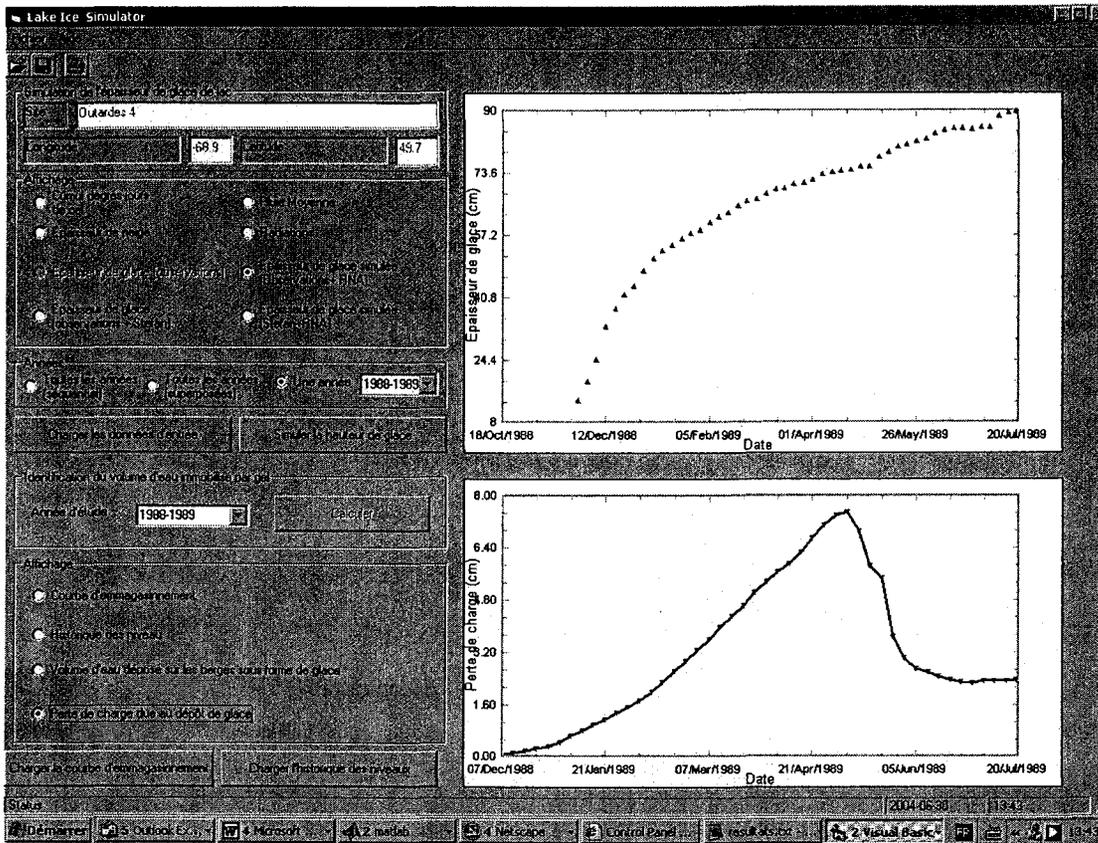


Figure 16: Visualisation de la perte de hauteur de chute due au dépôt de glace

AIII.5 ORGANISATION DU PROGRAMME

Les calculs relatifs à la simulation de l'épaisseur de glace ont été écrits avec matlab et compilés sous forme d'exécutable (simuler.exe). Le programme VB écrit les données d'entrées de simuler.exe (Donnees.txt), l'exécute et récupère les résultats (Resultats.txt) pour faire les traitements complémentaires. On obtient une interface relativement conviviale écrite avec VB, tandis que les traitements complexes (simulation par réseaux de neurones artificiels) sont faits avec Matlab.