

**VALIDATION À MOYEN TERME DE  
L'APPROCHE EQEAU**

*Rapport de recherche No R-618-f1*

*Septembre 2003*

**Validation à moyen terme de l'approche EQeau**

**Rapport final préparé pour**

**Pierre Ducharme**

**Hydro-Québec**

**Par**

**Monique Bernier**

**Yves Gauthier**

**Karem Chokmani**

**Institut national de la recherche scientifique, INRS-ETE**

**2800, rue Einstein, Case postale 7500, Sainte-Foy (Québec), G1V 4C7**

**Rapport de recherche No 618-f1**

**18 septembre 2003**

© INRS-ETE, 2003

ISBN: 2-89146-506-7

# TABLE DES MATIÈRES

<b>TABLE DES MATIÈRES.....</b>	<b>iii</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>v</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>vii</b>
<b>SOMMAIRE.....</b>	<b>ix</b>
<b>1. INTRODUCTION ET OBJECTIFS .....</b>	<b>1</b>
<b>2. SOMMAIRE DES RÉSULTATS DE L'HIVER 2001-2002.....</b>	<b>5</b>
2.1 DONNÉES ACQUISES .....	5
2.2 LES PARAMÈTRES D'ENTRÉE D' <i>EQEAU</i> .....	7
2.3 L'APPLICATION D' <i>EQEAU</i> .....	9
2.4 CONCLUSION SUITE À L'ANALYSE DES IMAGES DE L'HIVER 2002 .....	13
<b>3. VALIDITÉ DU MODÈLE EQEAU SELON LES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES .....</b>	<b>15</b>
3.1 INTRODUCTION.....	15
3.2 QUANTITÉ DE NEIGE MAXIMALE .....	15
3.3 CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES PARTICULIÈRES : LE CAS DES BRÛLIS.....	16
<b>4. ANALYSE DE L'INCERTITUDE DU MODÈLE EQEAU .....</b>	<b>21</b>
4.1 INTRODUCTION.....	21
4.2 PERFORMANCE DU MODÈLE <i>EQEAU</i> .....	21
4.3 ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ.....	24
4.4 PROPAGATION DE L'INCERTITUDE (ERREUR TOTALE) .....	29
4.5 CONCLUSION SUITE À L'ANALYSE DE L'INCERTITUDE.....	40
<b>5. REPRÉSENTATIVITÉ CARTOGRAPHIQUE.....</b>	<b>43</b>
5.1 CONTEXTE .....	43
5.2 RÉPARTITION DES DENSITÉS PAR BASSIN.....	43
5.3 PROBLÈME DES PLANS D'EAU.....	48

<b>6. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS .....</b>	<b>49</b>
6.1 BILAN DE LA PHASE DE VALIDATION EN MODE OPÉRATIONNEL .....	49
6.2 RECOMMANDATIONS .....	51
<b>RÉFÉRENCES.....</b>	<b>53</b>
<b>ANNEXE 1.....</b>	<b>55</b>

## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 :	IMAGES RADARSAT SCANSAR NARROW (SCN) ACQUISES POUR LA SAISON 2001-2002.....	5
TABLEAU 2 :	IMAGES RADARSAT SCANSAR NARROW (SCN) ACQUISES POUR LA SAISON 2001-2002.....	6
TABLEAU 3 :	PARAMÈTRES D'ENTRÉE SÉLECTIONNÉS POUR L'APPLICATION D'E <sub>QEAU</sub> EN 2002.....	7
TABLEAU 4 :	CONVERSION DES RÉSISTANCES THERMIQUES EN ÉQUIVALENTS EN EAU.....	16
TABLEAU 5 :	PROPORTION DE LA SUPERFICIE DES BRÛLIS PAR SOUS-BASSIN (%).....	17
TABLEAU 6 :	STATISTIQUES* DE COMPARAISON DES ÉQUIVALENTS EN EAU ESTIMÉS.....	24
TABLEAU 7 :	INCERTITUDES SUR LES VALEURS DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES DU MODÈLE <i>E<sub>QEAU</sub></i> .....	30
TABLEAU 8 :	INCERTITUDE PARTIELLE SUR L'ESTIMATION DE L'ÉQUIVALENT EN EAU INDUITE PAR L'INCERTITUDE SUR LES VALEURS DES PARAMÈTRES D' <i>E<sub>QEAU</sub></i> .....	36
TABLEAU 9 :	RÉPARTITION DES SITES DE MESURES AU SOL PAR CLASSES D'ALTITUDES ET PAR CLASSES DE LATITUDES.....	45
TABLEAU 10 :	CALCUL DES DENSITÉS (KG/M) PAR CLASSES D'ALTITUDES ET DE LATITUDES POUR 2001.....	46
TABLEAU 11 :	POURCENTAGE DE DENSITÉ PAR RAPPORT À LA CLASSE LA MIEUX REPRÉSENTÉE (2001).....	47
TABLEAU 12 :	POURCENTAGE DE DENSITÉ PAR RAPPORT À LA CLASSE LA MIEUX REPRÉSENTÉE (2002).....	47



## LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 :	MOSAÏQUE DES ÉQUIVALENTS EN EAU ESTIMÉS DE JANVIER 2002 .....	11
FIGURE 2 :	MOSAÏQUE DES ÉQUIVALENTS EN EAU ESTIMÉS DE MARS 2002.....	11
FIGURE 3 :	VALIDATION DES ÉQUIVALENTS EN EAU ESTIMÉS À L'ÉCHELLE DU BASSIN, .....	12
FIGURE 4 :	VALIDATION DES ÉQUIVALENTS EN EAU ESTIMÉS ET MESURÉS, AUX SITES D'ÉCHANTILLONNAGE, .....	12
FIGURE 5 :	VARIATION TEMPORELLE DE LA RÉTODIFFUSION POUR CERTAINES OCCUPATIONS DU SOL .....	19
FIGURE 6 :	VALEURS D'ÉQUIVALENT D'EAU ESTIMÉES À L'EQUEAU EN FONCTION DES VALEURS MESURÉES.....	23
FIGURE 7 :	SENSIBILITÉ RELATIVE DU MODÈLE EQUEAU AUX VARIATIONS DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES : A) PENTE DE LA RELATION LINÉAIRE ENTRE RAPPORT DE RÉTODIFFUSION ET RÉSISTANCE THERMIQUE; B) ORDONNÉE À L'ORIGINE DE LA RELATION LINÉAIRE ENTRE RAPPORT DE RÉTODIFFUSION ET RÉSISTANCE THERMIQUE; C) RAPPORT DE RÉTODIFFUSION; D) DENSITÉ DU COUVERT DE NEIGE .....	28
FIGURE 8 :	VARIOGRAMMES EXPÉRIMENTAUX (POINTS CARRÉS) ET THÉORIQUES (LIGNES CONTINUES) DES SOUS-IMAGES DE RAPPORT DE RÉTODIFFUSION DE 250X250 PIXELS (LINGE POINTILLÉE : VARIANCE DE TOTALE DE LA SOUS-IMAGE) .....	34
FIGURE 9 :	ERREUR GLOBALE SUR L'ESTIMATION DE L'ÉQUIVALENT EN EAU INDUITE PAR L'INCERTITUDE SUR LES VALEURS DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES DU MODÈLE EQUEAU ET DANS LE CAS D'UNE BAISSSE DE L'INCERTITUDE DE LA DENSITÉ DE LA NEIGE À UNE VALEUR 25,10 KG/M <sup>3</sup> .....	35
FIGURE 10 :	ERREURS PARTIELLES SUR L'ESTIMATION DE L'ÉQUIVALENT EN EAU INDUITES PAR L'INCERTITUDE SUR LES VALEURS DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES DU MODÈLE EQUEAU : A) PENTE DE LA RELATION LINÉAIRE ENTRE RAPPORT DE RÉTODIFFUSION ET RÉSISTANCE THERMIQUE; B) ORDONNÉE À L'ORIGINE DE LA RELATION LINÉAIRE ENTRE RAPPORT DE RÉTODIFFUSION ET RÉSISTANCE THERMIQUE; C) RAPPORT DE RÉTODIFFUSION; D) DENSITÉ DU COUVERT DE NEIGE. ....	37



FIGURE 11 : ERREURS PARTIELLES SUR L'ESTIMATION DE L'ÉQUIVALENT EN EAU INDUITES PAR DEUX NIVEAUX D'INCERTITUDES SUR LES VALEURS DE LA DENSITÉ DE LA NEIGE. ....	39
FIGURE 12 : ERREUR PARTIELLE SUR L'ESTIMATION DE L'ÉQUIVALENT EN EAU INDUITE UN NIVEAU D'INCERTITUDE SUR LES VALEURS DU RAPPORT DE RÉTRODIFFUSION DE 2,58 DB CORRESPONDANT AU CAS DE FIGURE EXTRÊME. ....	39
FIGURE 13 : ERREUR GLOBALE SUR L'ESTIMATION DE L'ÉQUIVALENT EN EAU INDUITE PAR L'INCERTITUDE SUR LES VALEURS DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES DU MODÈLE EQEAU DONT CELLE DU RAPP EST DE 2,58 DB CORRESPONDANT AU CAS DE FIGURE EXTRÊME.....	40
FIGURE 14 : MATRICE DES ALTITUDES REGROUPÉES PAR CLASSES (BASSIN DE LA GRANDE RIVIÈRE) ET SITES DE RELEVÉS DE NEIGE D'HYDRO-QUÉBEC.....	44
FIGURE 15 : EXEMPLE D'UNE CARTE OÙ LES PLANS D'EAU SONT DE COULEURS DIFFÉRENTES.....	48

## SOMMAIRE

Rappelons d'abord que les images ScanSAR Narrow (350 km X 350 km, 2 faisceaux) s'étant montrées radiométriquement fiables en 2001, suite à une comparaison avec des images en mode Wide (un faisceau), le même type d'images a été commandé pour 2002. Deux séries d'images hivernales, en orbite ascendante, ont été programmées et acquises entre la mi-janvier et la mi-mars 2002 afin de cartographier l'équivalent en eau sur l'ensemble du bassin de la rivière La Grande. Les images déjà acquises les 17, 20 et 23 novembre 2000 doivent, à priori, être utilisées comme images de référence dans le logiciel EQeau (Version MapX). Toutefois, une seconde série automnale a été acquise en 2001 pour valider la fiabilité des images de référence. Les conditions environnementales et les images de l'automne 2000 et de l'automne 2001 ont donc été comparées. Très visible en 2000, la baisse prononcée du signal observée à la limite des deux faisceaux qui composent le mode ScanSAR Narrow (vers 31°), n'est plus présente en 2001. Cela signifie que le fournisseur des images (*RSI*) a modifié le pré-traitement des données au cours de la dernière année, afin de diminuer la variation entre les deux faisceaux et de s'ajuster aux fluctuations inhérentes au vieillissement des instruments du satellite. Ces modifications sont apportées au moyen de ce que *RSI* appelle le « *payload file* ». Les trois images de l'automne 2000 ont donc été retraitées gracieusement par *RSI*, à partir du nouveau « *payload file* », afin que l'on puisse les comparer aux images de 2001-2002. Sur les images retraitées et les images de 2001-2002, le signal est maintenant moins sensible à l'angle d'incidence et plus homogène d'un faisceau à l'autre (meilleure qualité). On constate également que sauf pour l'orbite du centre (neige humide et pluie), la moyenne de rétrodiffusion des images de novembre 2000 est assez similaire à celle du novembre 2001 et que les deux séries d'images pourraient éventuellement servir d'image de référence.

D'autre part, nous avons aussi comparé le signal entre deux images RADARSAT d'orbites légèrement décalées l'une par rapport à l'autre (12 novembre 2001 et 30 janvier 2002) et ce avant et après la correction de l'angle d'incidence local. Nous avons constaté qu'il n'y a pas de différence significative entre les deux combinaisons, sauf dans l'extrême sud de l'image. Cela implique que nous avons pu appliquer EQeau avec l'image originale du 30 janvier 2002 et l'image de référence du 17 novembre 2000, même si elles sont sur deux orbites légèrement

décalées. Toutefois, dans le futur, pour des cas de décalage d'orbite plus significatif entre deux images, le logiciel de correction pour les angles d'incidence locaux développés par VIASAT avec l'appui de l'Agence spatiale canadienne pourrait être appliqué car il s'avère performant pour des pentes inférieures à 30 degrés.

Concernant les images hivernales, les rétrodiffusions moyennes pour l'hiver 2002 sont de 1 à 2 dB plus élevées que celles de l'hiver 2001. Si on regarde la répartition spatiale de cette augmentation, on remarque que c'est dans le centre des images qu'elle est la plus forte (teintes bleu). Il faut donc s'attendre à ce que la carte des équivalents en eau présente de fortes valeurs pour ces régions. D'ailleurs, les cartes d'équivalents en eau montrent bien qu'il y a un phénomène affectant les résultats dans tout l'axe des réservoirs pour l'ensemble du bassin La Grande et ce tant en janvier qu'en mars 2002. La cause de cette répartition est environnementale. Un réchauffement des températures de l'air jumelé à des précipitations liquides a causé la fonte de la neige et le dégel du sol sur les secteurs de basse altitude, après la mi-novembre 2001. En effet, les fortes valeurs de rétrodiffusion ne sont pas présentes sur les images d'automne 2001 et elles sont concentrées dans les zones inférieures à la limite des 500 m d'altitude. Ainsi, là où le sol est dégelé et humide, les rétrodiffusions sont fortes et par conséquent, les équivalents en eau surestimés. On observe d'ailleurs une diminution des équivalents en eau estimés avec l'augmentation de l'altitude qui seraient dû à une diminution progressive de l'humidité du sol avec l'altitude. **Cela démontre la sensibilité du signal des images RADARSAT à l'état du sol (humide ou gelé) et que le modèle EQeau doit être utilisé que pour des sols gelés.**

**En 2002, les cartes obtenues des images RADARSAT-1 illustrent donc, la distribution de l'humidité du sol (pas de gel) et non l'équivalent en eau de la neige.**

Parallèlement, nous avons évalué les performances du modèle EQeau et la qualité de ses estimations. Nous avons comparé les valeurs de l'équivalent en eau de la neige estimées par le modèle aux valeurs observées correspondantes qui ont été mesurées (lignes de neige) au cours des campagnes de terrain de 1997, 1998, 1999 et 2001. Les données des campagnes 2000 et 2002 n'ont pas pu être prises en compte vu l'impossibilité d'utiliser les images correspondantes. **Il s'avère que les valeurs d'équivalent d'eau ont été estimées avec un coefficient de**

détermination de 0,51. Ce qui représente une performance assez moyenne car le modèle n'expliquerait que 50% de la variation dans les observations. Par ailleurs, aucune des sept images ne couvre à elle seule la gamme de variation de l'équivalent en eau dans cette région. **L'emploi pour l'étalonnage d'E<sub>Qeau</sub> d'une longue série d'observations est donc nécessaire afin qu'il puisse reproduire avec plus de précision les conditions observables de la neige au sol.** En écartant les données de deux images (une Wide1 et une Standard 7) qui surestiment l'équivalent en eau, le **RMSE total tombe à 25 mm** (18% en terme relatif) et **le biais d'estimation devient nul.** Cette valeur correspond à ce que nous avons déjà mentionnée dans le rapport E<sub>Qeau</sub> remis à l'Agence spatiale canadienne en mars 2000 pour les images Standard 1 (24 mm).

L'analyse des effets de l'incertitude du modèle *E<sub>Qeau</sub>* sur ses sorties a montré que **ce dernier est particulièrement sensible aux fluctuations de la densité de la neige et dans un moindre degré aux fluctuations du rapport de rétrodiffusion.** De plus, la sensibilité aiguë d'*E<sub>Qeau</sub>* à cette densité jumelée à la grande incertitude avec laquelle elle est estimée, la place à la tête des sources d'erreur dans les estimations de l'équivalent en eau. Ces dernières sont produites avec un niveau d'incertitude assez élevé (entre 40 et 50% de la valeur de l'estimation).

Afin d'améliorer la performance de l'algorithme d'E<sub>Qeau</sub> et d'arriver à des niveaux acceptables pour les utilisateurs, il faudra réduire les incertitudes sur la densité de la neige. Pour se faire, **il les densités devront être spatialisées en tenant compte de leur variation en fonction de la latitude et de l'altitude.** Par ailleurs, le rapport de rétrodiffusion est aussi une source potentiellement élevée d'incertitude dans l'estimation de l'équivalent en eau si les images ne sont pas adéquatement traitées et le chatouement pas assez réduit. **Des modifications sont donc aussi envisagées dans la chaîne de pré-traitement.**

# 1. Introduction et objectifs

---

Dès 1999, le projet pilote EQeau avait démontré l'efficacité de l'approche sur la moitié amont du bassin de la Rivière La Grande à partir d'images RADARSAT-1 en mode unifaisceau Standard (100 X 100 km) et Wide (150 X 150 km). Pour l'hiver 2000, Hydro-Québec avait acheté neuf images ScanSAR Wide (500 X 500 km) pour cartographier l'équivalent en eau de la neige sur l'ensemble du bassin de la rivière La Grande. Ces images provenaient de deux orbites différentes afin de couvrir l'ensemble du bassin de rivière La Grande (800 km X 300 km) et des bassins avoisinants. Cet hiver-là, l'application d'EQeau avait été marquée par quatre nouveautés :

- Pour la première fois, l'analyse des images RADARSAT par le logiciel EQeau se faisait dans un contexte opérationnel.
- Plusieurs images ScanSAR ont été acquises au cours du même hiver, ce qui nous a permis d'évaluer la stabilité du signal et la qualité radiométrique de ces images.
- Le secteur cartographié était quatre fois plus étendu que celui des années passées, donc plus diversifié du point de vue de l'occupation du sol et de la densité de la neige.
- Les données au sol étaient disponibles que pour trois des sept images hivernales.

Toutefois, on a constaté que les images ScanSAR surestimaient de façon systématique l'équivalent en eau au sol. Ces résultats ont été discutés, en détails, dans le rapport d'étape transmis à Hydro-Québec le 30 juin 2000. La principale cause de ce biais systématique étant la faible qualité radiométrique (difficulté d'étalonnage, nombreux artefacts, étendu des angles d'incidence) des images multifaisceaux ScanSAR Wide.

Pour l'hiver 2001, une quinzaine d'images en mode ScanSAR Narrow (350 X 350 km, 2 faisceaux) ont donc été achetées par Hydro-Québec au lieu des images ScanSAR Wide (500 X

500 km, 4 faisceaux). De plus, afin de valider leur qualité radiométrique, cinq images unifaisceau (Wide) ont aussi été acquises dans le cadre du projet CRYSYS d'Environnement Canada. Cette année-là, les équivalents en eau moyens estimés par sous-bassin sont comparables aux moyennes calculées par interpolation des relevés de neige d'Hydro-Québec. Toutefois, en raison de la variation importante des valeurs de densités mesurées sur le bassin de La Grande et de leur incertitude, le choix de densités représentatives pour chacun des sous-bassins a été difficile d'où la nécessité d'examiner les moyens d'obtenir des mesures de densité plus fiables (projet SNOWPOWER, par exemple). Aussi, les valeurs de densités mesurées étant fort différentes entre certains sous-bassins cela a entraîné une segmentation des cartes par sous-bassins.

Pour l'hiver 2002, le même type d'images que l'année précédente a été commandé. Comme le principal problème rencontré à l'hiver 2001, était la fiabilité des densités mesurées (lignes de neige), particulièrement pour les sous-bassins moins enneigés, les campagnes de terrain conjointes INRS-HQ ont été menées plus à l'ouest jusqu'à la centrale de LG3 afin de couvrir un plus grand territoire.

Ce rapport se veut un bilan final des activités de R&D réalisées à l'INRS-Eau, Terre et Environnement, dans le cadre du projet EQeau en 2002. Ces activités se voulaient la poursuite d'une phase de validation de l'approche EQeau dans un contexte opérationnel, afin de mieux comprendre les limites d'application et de modifier, si besoin, les paramètres de l'algorithme pour le rendre à la fois plus sensible et plus robuste.

Dans ce cadre, les objectifs de l'année 2002 étaient les suivants:

1. Analyser deux séries d'images d'automne (novembre 2000 et 2001) et sélectionner la meilleure série d'images de référence pour l'hiver 2002;
2. Vérifier la qualité radiométrique des images ScanSAR Narrow de l'hiver 2002;
3. Appuyer le personnel d'Hydro-Québec dans la production des cartes d'équivalents en eau de la neige au sol sur l'ensemble du bassin de la Rivière La Grande à partir de trois séries d'images ScanSAR Narrow;

4. Tester une méthode de correction radiométrique des images tenant compte de l'angle d'incidence, des pentes locales et de l'orientation de ces pentes, dans le but d'évaluer l'impact de la topographie et du changement d'orbite sur le calcul des équivalents en eau;
5. Améliorer l'apparence de la représentation cartographique et la fiabilité de l'algorithme;
6. Établir l'incertitude des résultats (cartes et moyennes);
7. Poursuivre l'amélioration continue du logiciel EQeau (version MapX) : convivialité, fonctionnalités (production de diverses statistiques), correction des erreurs.

En date du 31 mai 2002, les quatre premiers objectifs avaient été atteints, alors que les objectifs 5 et 7 avaient été partiellement réalisés. Le présent rapport fait d'abord un bref retour sur les principales actions et les principaux résultats à cette période (chapitre 2). Il décrit, par la suite, les travaux réalisés dans le cadre des objectifs 5 et 6. Les activités effectuées portent sur la fiabilité de l'algorithme selon les conditions environnementales (chapitre 3), sur l'évaluation de la performance du modèle EQeau, l'établissement de l'incertitude du modèle et la propagation de l'erreur dans les résultats (chapitre 4), ainsi que la représentativité des cartes (chapitre 5). Le chapitre 6 présente nos recommandations pour le futur.





## 2. Sommaire des résultats de l'hiver 2001-2002

---

### 2.1 Données acquises

Les images ScanSAR Narrow (350 km X 350 km, 2 faisceaux) s'étant montrées radiométriquement fiables en 2001, le même type d'images a été recommandé pour 2002. Le tableau 1 présente les images acquises pour la saison 2001-2002. Le traitement des images est effectué par VIASAT Geo-Technologies selon la procédure opérationnelle établie en 1999, qui comprend la correction radiométrique et géométrique des images et la création des matrices d'entrée pour EQeau. Les images du 11 novembre 2001 et du 30 janvier 2002 sont sur des orbites légèrement décalées par rapport aux autres images et ont nécessité un traitement spécifique pour corriger les différences d'angles d'incidence locaux (dus aux pente).

**Tableau 1 : Images RADARSAT ScanSAR Narrow (SCN) acquises pour la saison 2001-2002**

Série	Image ouest (LG2)	Image centre (LG4)	Image est (Caniapiscou)
1	11 nov	15 nov	12 nov
2	29 jan	26 jan	30 jan
3	18 mrs	15 mrs	12 mrs

De plus, le fournisseur ayant modifié en 2001 le « payload file » utilisé pour le pré-traitement des données brutes, nous avons dû faire retraiter les images de l'automne 2000 pour qu'elles soient comparables aux images de l'automne 2001.

Les données de terrain, utilisées pour l'étalonnage des algorithmes d'EQeau, la détermination des densités de neige moyennes et la validation des cartes et statistiques résultantes, ont été

acquises lors de relevés conjoints (INRS-HQ) et lors des relevés réguliers d'Hydro-Québec (tableau 2).

**Tableau 2 : Images RADARSAT ScanSAR Narrow (SCN) acquises pour la saison 2001-2002**

Dates	Relevés	Exécutants	EEN moyen	Densité moyenne
21 au 25 janvier	Carottage et profils	INRS-HQ	194mm	242 kg/m <sup>3</sup>
18 au 27 janvier	Carottage	HQ	150 mm	209 kg/m <sup>3</sup>
11 au 15 mars	Carottage et profils	INRS-HQ	250 mm	254 kg/m <sup>3</sup>
16 au 23 mars	Carottage	HQ	200 mm	211 kg/m <sup>3</sup>

Les relevés INRS-HQ donnent des valeurs moyennes systématiquement supérieures aux relevés HQ mais ces derniers sont dispersés sur l'ensemble du bassin alors que les premiers sont plutôt étalés le long de la route sur un axe ouest-est. Toutefois, les relevés INRS-HQ montrent une certaine homogénéité sur cet axe, alors que les relevés HQ montrent une forte disparité des densités mesurées entre l'ouest et l'est. Hydro-Québec entretient d'ailleurs certains doutes quant à la fiabilité de ses mesures dans l'ouest du bassin de la Grande rivière. Les profils de neige réalisés par l'INRS ne présentent pas d'anomalies et sont près des moyennes de la décennie, avec une résistance thermique calculée qui varie entre 4 et 6 °Cm<sup>2</sup>/J.

Selon les données des observateurs, aucune présence de neige humide et aucune précipitation, solide ou liquide, n'ont été rapportée lors des différents passages du satellite. On déclare le sol gelé dans les secteurs dégagés.

## 2.2 Les paramètres d'entrée d'EQueau

Le choix des paramètres d'entrée (tableau 3) est basé sur l'analyse des images et des données de terrain.

**Tableau 3 : Paramètres d'entrée sélectionnés pour l'application d'EQueau en 2002**

Paramètre	Janvier	Mars
Densité moyenne du couvert de neige	240 kg/m <sup>3</sup>	250 kg/m <sup>3</sup>
Algorithme	$y = 1.1 x + 4.8$ (sol gelé à l'automne)	$y = 1.1 x + 4.8$ (sol gelé à l'automne)
Images de référence	17, 20, 23 nov. 2000	17, 20, 23 nov. 2000
Images d'hiver	26, 29, 30 janvier 2002	11, 12, 15 mars 2002

- Les densités utilisées sont jugées représentatives de l'ensemble du bassin;
- Le choix des images de référence est basé sur une analyse détaillée dont les grandes lignes sont décrites ci-dessous.
- Les six images acquises en janvier et mars 2002 sont utilisées puisque les mesures de terrain et observations disponibles confirment la présence de neige sèche pour toutes les acquisitions de l'hiver et une augmentation de l'équivalent en eau entre janvier et mars.
- Les images ont toutes été traitées par RSI avec le plus récent « payload file » et un algorithme de correction des rétrodiffusions en fonction de l'angle d'incidence local a été appliqué par VIASAT (Bernier et al, 2002) sur les images dont l'orbite était légèrement décalée (30 janvier, 11 mars 2002).

À l'exception du 15 novembre 2001 dans le secteur de LG4, les observateurs ont relevé des conditions environnementales comparables lors des deux années (température de l'air sous zéro et sol gelé en zone découverte). D'autres données seraient toutefois nécessaires pour confirmer que cette hypothèse est valable partout. Pour l'orbite de l'ouest (LG2), le signal de

rétrodiffusion moyen est similaire en novembre 2000 et 2001. Par contre, on remarque des différences notables lorsqu'on compare pixel à pixel. Par conséquent, l'utilisation comme référence de l'une ou l'autre de ces images peut donner des résultats différents. Dans le cas de l'orbite centrale (LG4), les conditions environnementales du 15 novembre 2001 étaient particulières et inadéquates dans l'ensemble puisque la portion nord est sous l'effet d'un couvert de neige humide au sol, tel qu'observé à LG4, alors que la portion sud est probablement sous l'effet de la pluie. Il est donc clair que l'image retraitée du 20 novembre 2000 doit être utilisée. Finalement, sur l'orbite de l'est (Caniapiscau) les rétrodiffusions moyennes de novembre 2001 sont plus faibles qu'en novembre 2000 mais au niveau du pixel, on remarque encore une grande variabilité entre les deux images.

En résumé, bien que nous visions une série d'images de référence optimales, l'étendue du territoire, l'hétérogénéité des conditions environnementales et la précision de l'étalonnage des images imposent certains compromis. L'objectif initial étant de réutiliser, si possible, les mêmes images de référence que lors de la saison 2001 (images de novembre 2000), cela demeure l'option priorisée. Suite aux hypothèses de départ, aux observations de terrain disponibles et à l'analyse des images, nous concluons qu'il s'agit d'une option valide bien que non optimale. L'algorithme « sol gelé » est donc choisi en raison des conditions observées en novembre 2000.

Comme pour les images d'automne, une analyse détaillée du signal de rétrodiffusion a été effectuée pour les images hivernales. Sur l'orbite de l'ouest, les valeurs moyennes de l'hiver 2002 sont de 1 à 2 dB plus élevées que celles de l'hiver 2001, même si les conditions de neige sont normales dans les deux cas. C'est dans le centre de l'image (autour des réservoirs) que l'augmentation est la plus forte. **Une hypothèse plausible serait un réchauffement des températures de l'air jumelé à des précipitations liquides ayant causé la fonte de la neige et le dégel du sol sur les secteurs de basse altitude en particulier, après la mi-novembre.** Ainsi, le sol de l'hiver 2002 serait très humide et dégelé puisque le couvert de neige a dû s'installer rapidement par la suite et agir comme isolant. Dans un pareil cas, les fortes rétrodiffusions et par conséquent, les équivalents en eau surestimés seraient concentrés dans des zones de moindre altitude. Pour l'orbite du centre, les valeurs de l'hiver 2002 sont à nouveau plus élevées de 2 dB, surtout dans l'axe des réservoirs (nord de l'image). Il semble bien qu'il s'agisse d'une variation

des conditions de sol d'ouest en est. Par contre, les valeurs semblent aussi plus dépendantes de l'angle d'incidence, particulièrement pour le premier faisceau (jusqu'à 31°). Finalement, dans le cas de l'orbite de l'est, on note une différence de signal beaucoup plus faible entre l'hiver 2001 et l'hiver 2002, de même qu'entre novembre 2000 et l'hiver 2002. Spatialement, la plus forte augmentation du signal à l'hiver provient encore de l'axe des réservoirs. Par contre, toute la portion sud du bassin de Caniapiscou montre une tendance à la baisse. Il se peut que cette région n'ait pas été affectée par un réchauffement du sol en raison de son altitude plus élevée.

Dans un dernier temps, nous avons regardé la différence de rétrodiffusion entre les images de janvier et de mars 2002. Dans un cas normal, où le sol est gelé et froid à l'automne et où il se réchauffe graduellement en hiver sous la protection du couvert de neige, on devrait avoir partout, une légère augmentation du signal entre janvier et mars. Nous avons plutôt constaté, tant sur les moyennes que sur l'analyse pixel à pixel, une tendance à la baisse de l'est vers le centre et une tendance à la hausse du centre vers l'ouest. La limite de ce changement de comportement semble correspondre à la limite des 500m d'altitude. La limite correspond aussi, dans une moindre mesure, à l'orbite de l'est. Toutefois, que la cause soit environnementale ou qu'il s'agisse d'une instabilité radiométrique sur une image en particulier, les conditions d'application d'EQueau s'en trouvent affectées puisque les prémisses de base ne sont plus respectées sur l'ensemble du territoire.

### **2.3 L'application d'EQueau**

L'équivalent en eau a été calculé à l'aide de la version 4.0 du logiciel EQueau (MapX) pour les images déjà spécifiées au tableau 3. Une carte des équivalents en eau (maille de 50m) a été produite pour chaque orbite et une mosaïque des trois orbites est réalisée. Les statistiques par bassin sont calculées sur cette mosaïque, qui est ensuite ré-échantillonnée à une maille de 500m pour affichage.

Tel que prévu, les incohérences détaillées lors de l'analyse des coefficients de rétrodiffusion se répercutent dans les cartes d'équivalents en eau produites (figures 1 et 2). Les fortes rétrodiffusion de l'hiver 2001 se traduit par des équivalents en eau surestimés (figure 3) dans tout

l'ouest du bassin et particulièrement dans l'axe des réservoirs. Rappelons que les valeurs moyennes mesurées sur le terrain sont plutôt de 150mm à 250mm. On retrouve d'ailleurs ces valeurs sur les cartes, pour la partie sud du sous-bassin de Caniapiscau (plus en altitude). Le rôle de l'altitude est d'ailleurs démontré lorsque les équivalents en eau mesurés et estimés des sites d'échantillonnage (Sites HQ et Sites INRS) sont mis en relation avec l'altitude du site en question. Normalement, et comme le confirment les données terrain, les équivalents en eau mesurés augmentent avec l'altitude. Dans le cas des équivalents en eau estimés à partir des images RADARSAT de l'hiver 2002, la relation est totalement inversée.

Les incohérences observées sur le signal entre janvier 2002 et mars 2002 se retrouvent aussi dans les cartes, puisque que l'augmentation moyenne de l'équivalent en eau pour la partie ouest et centre du bassin atteint presque 50 mm alors qu'on note plutôt une baisse de 30mm pour Caniapiscau. Il est toutefois important de noter que selon les données de terrain (tableau 2), la hausse moyenne de l'équivalent en eau pour tout le bassin est effectivement de 50 mm entre janvier et mars. Pour l'orbite de l'ouest et du centre, la variation de rétrodiffusion entre janvier et mars serait donc celle attendue.

Toutes ces observations confirment deux hypothèses :

- Les changements environnementaux (réchauffement) survenus entre novembre 2001 et janvier 2002 seraient responsables des fortes valeurs de rétrodiffusion sur les images de l'hiver 2002 et entraîneraient des équivalents en eau surestimés dans les zones affectées (partout sauf dans le sud du bassin de Caniapiscau).
- Il y aurait un problème avec la stabilité radiométrique de l'image du 12 mars puisque c'est la seule pour laquelle on note une baisse de la rétrodiffusion depuis janvier.

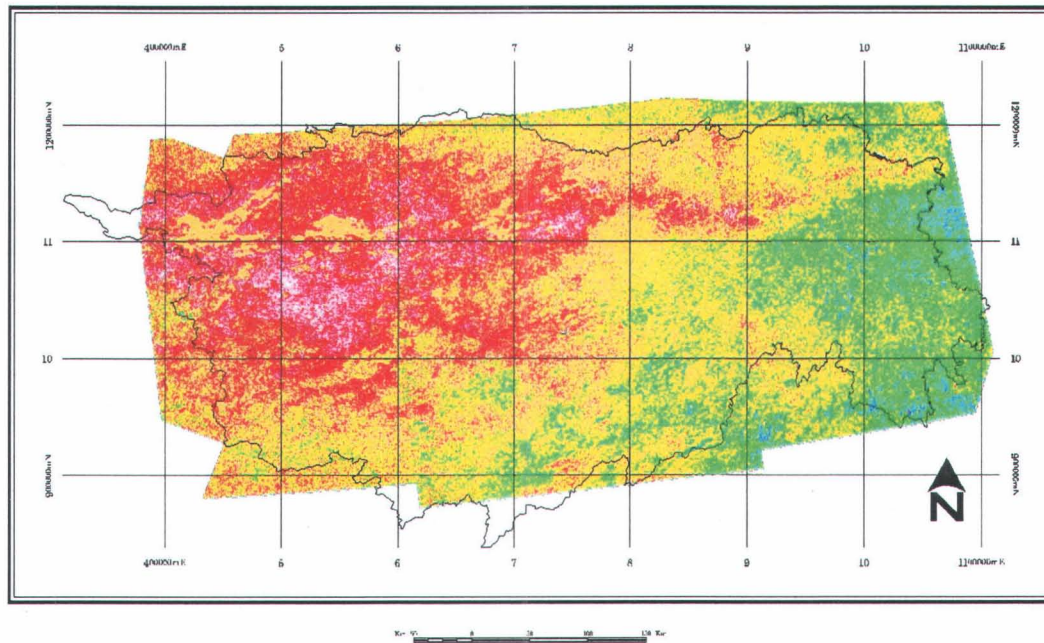


Figure 1 : Mosaïque des équivalents en eau estimés de janvier 2002

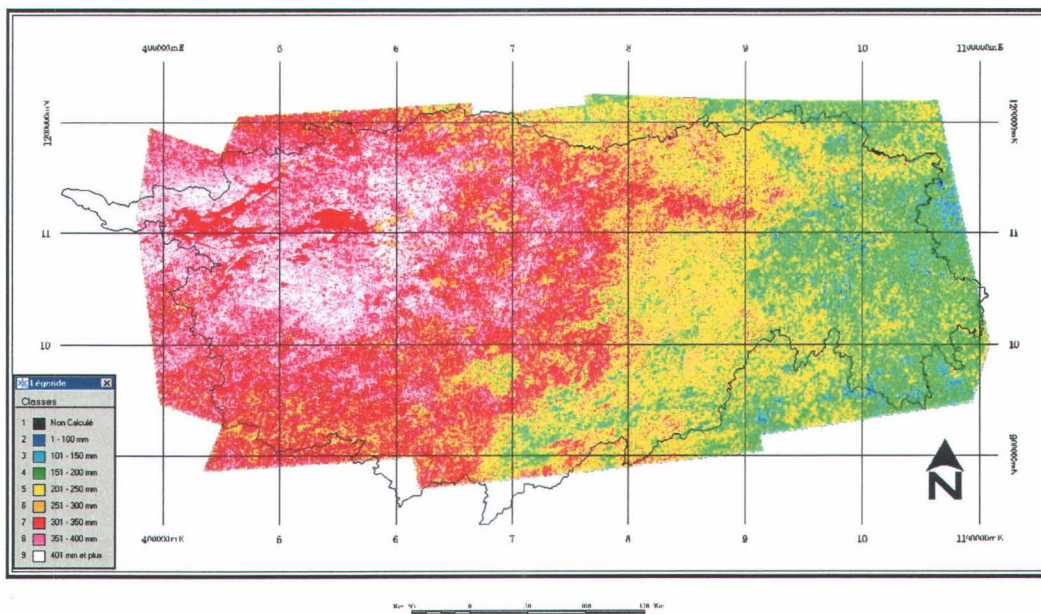


Figure 2 : Mosaïque des équivalents en eau estimés de mars 2002

Validation des équivalents en eau 2002

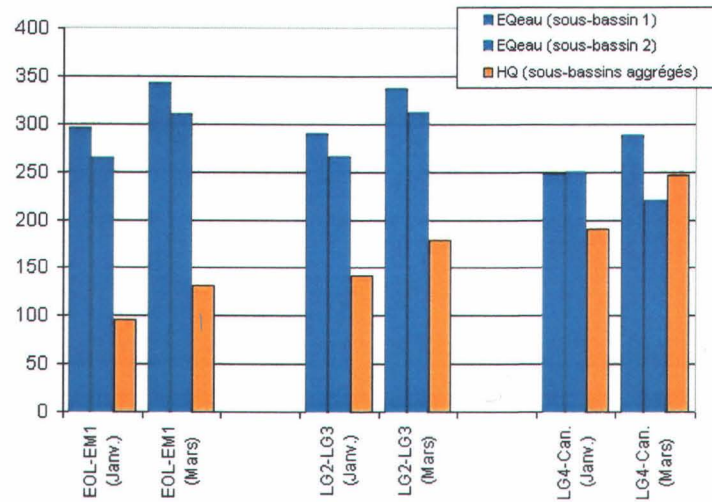


Figure 3 : Validation des équivalents en eau estimés à l'échelle du bassin, pour janvier et mars 2002

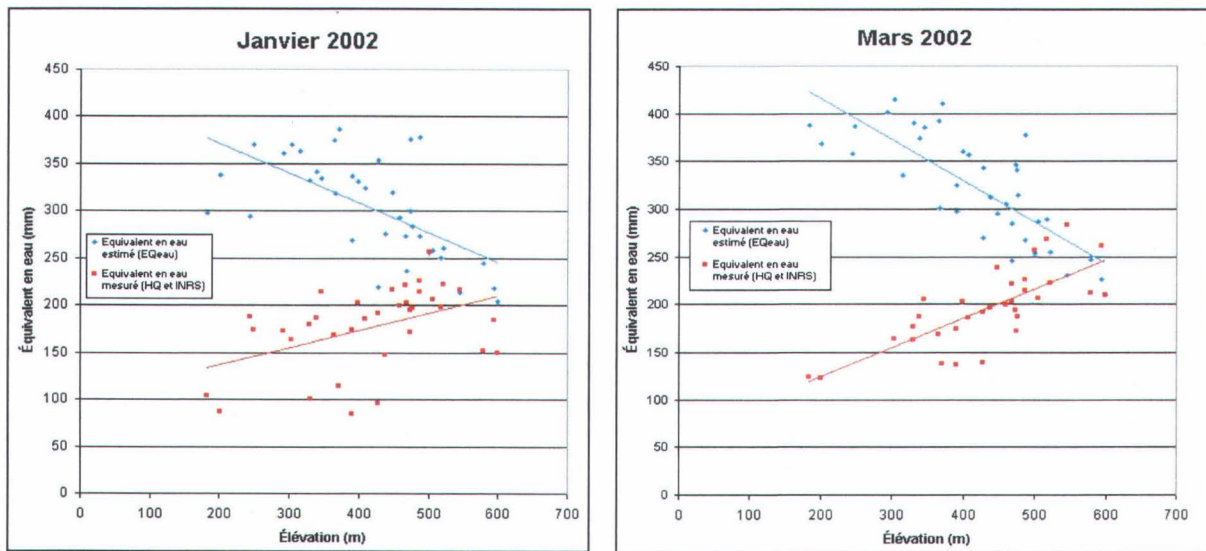


Figure 4 : Validation des équivalents en eau estimés et mesurés, aux sites d'échantillonnage, en fonction de l'altitude



## 2.4 Conclusion suite à l'analyse des images de l'hiver 2002

À l'hiver 2002, nous observons que là où le sol est dégelé et humide, les rétrodiffusions sont fortes et par conséquent, les équivalents en eau surestimés. On observe aussi une diminution des équivalents en eau estimées avec l'augmentation de l'altitude qui seraient dû à une diminution progressive de l'humidité du sol avec l'altitude. Cela démontre la sensibilité du signal des images RADARSAT à l'état du sol (humide ou gelé) et que le modèle EQeau doit être utilisé que pour des sols gelés.

Les cartes obtenues des images RADARSAT-1 acquises en 2002 illustrent donc, malencontreusement, la distribution de l'humidité du sol (pas de gel) et non l'équivalent en eau de la neige. Les résultats d'EQeau n'ont donc pas été utilisés par le service des prévisions d'Hydro-Québec.



## 3. Validité du modèle EQeau selon les conditions environnementales

---

### 3.1 Introduction

Ce sous objectif visait à mieux déterminer les limites de validité de l'algorithme *EQeau* en précisant la quantité de neige au sol maximale détectable et les conditions environnementales rendant l'algorithme inapplicable.

### 3.2 Quantité de neige maximale

L'algorithme d'EQeau est basé sur un réchauffement progressif du sol avec l'accumulation de neige. Lorsque le couvert de neige est suffisamment important, la température du sol se stabilise et n'est plus influencée par l'accumulation subséquente de neige. Ce point de saturation est calculé à partir de l'algorithme exponentiel proposé dans le rapport de décembre 2001 (Bernier et Gauthier, 2001) et correspond à une résistance thermique de 7.0 à 7.5 °Cm<sup>2</sup>/J. Entre 1996 et 2002, la résistance thermique calculée pour les profils de la Baie James est toujours restée en deçà de 8 °Cm<sup>2</sup>/J. Le tableau 6 donne les équivalents en eau maximum pour différentes densité du couvert de neige.

**Cette résistance thermique de 7.5 °Cm<sup>2</sup>/J se traduit au sol par un couvert de neige d'1 m d'épaisseur en janvier à 1,8 m d'épaisseur à la fin mars. Ces valeurs étant égales ou même supérieures au maximum d'enneigement dans le bassin de la rivière La Grande, l'épaisseur du couvert de neige n'est pas un facteur limitant dans cette région pour EQeau.**

Toutefois, l'algorithme ne peut être appliqué si la surface du sol est dégelé et saturé sous le couvert nival comme à l'hiver 2002.

**Tableau 4 : Conversion des résistances thermiques en équivalents en eau**

Résistance thermique maximale	Si la densité est de :	L'équivalent en eau maximal estimable serait de :	Équivalents en eau moyen habituellement mesurés pour ces densités *
7.5 °Cm <sup>2</sup> /J	200 kg/m <sup>3</sup>	190 mm	100-200 mm
7.5 °Cm <sup>2</sup> /J	225 kg/m <sup>3</sup>	261 mm	150-250 mm
7.5 °Cm <sup>2</sup> /J	250 kg/m <sup>3</sup>	349 mm	175-275 mm
7.5 °Cm <sup>2</sup> /J	275 kg/m <sup>3</sup>	456 mm	250-350 mm

\* Les équivalents en eau habituellement mesurés pour ces densités sont issues des mesures d'Hydro-Québec de 1999 à 2002).

### 3.3 Conditions environnementales particulières : le cas des brûlis

Nous avons déjà discuté de l'importance d'obtenir des images de référence aux conditions homogènes (sol gelé partout), des températures de l'air froides et des conditions d'enneigement normales. Même si ces conditions sont regroupées, il existe aussi certaines interrogations par rapport au territoire lui-même, à la couverture végétale et à l'occupation du sol. L'une de ces incertitudes est le comportement du signal dans les brûlis et l'applicabilité de l'algorithme dans ces secteurs.

Les brûlis sont des zones naturelles ayant subies l'impact plus ou moins fort et plus ou moins récent d'un incendie. Sur le bassin de la Grande rivière, les brûlis représentent au total entre 10 et 15% du territoire. Le tableau 9 montre la répartition des brûlis par sous-bassin, selon la classification réalisée en 2000 à l'INRS à partir d'images Landsat-TM.

L'impact de l'incendie peut se faire sentir pendant de nombreuses années, particulièrement dans les régions nordiques comme celles de la Baie James. Selon le site, l'intensité et l'âge de l'incendie, l'occupation du sol d'un brûlis dans cette région peut varier du sol nu à la lande boisée. En effet, le feu peut avoir uniquement affecté la végétation basse, comme il peut aussi avoir partiellement ou complètement détruit les arbres.

**Tableau 5 : Proportion de la superficie des brûlis par sous-bassin (%)**

Sous-bassin	Proportion de brûlis
Caniapiscau	5%
Laforge	4%
LG4	9%
LG3	14%
LG2	20%
LG1	23%
EOL	23%
Eastmain	19%

La réponse du radar sur un brûlis sera donc complexe et dépendante de la nature de la forêt, de l'intensité du feu et du sol sous-jacent. Selon les quelques études disponibles (eg. Bourgeau-Chavez *et al.*, 1997 ; Ranson *et al.*, 2001), on remarque généralement une augmentation du signal sur un secteur brûlé (surtout avec ERS-1), par rapport aux secteurs non brûlés. Deux facteurs sont alors considérés pour tenter d'expliquer le phénomène :

**1) La végétation**

- Les branches et les aiguilles ayant disparues, il y a moins d'atténuation du signal;
- Il y a possibilité de fort double bond du signal entre le sol et les troncs toujours debout, pouvant causer une rétrodiffusion plus élevée que pour les forêts non brûlées ;
- Par contre, il a été mesuré que la teneur en eau des troncs brûlés était réduite de moitié et que le phénomène du double bond, bien que possiblement présent, ne pouvait être aussi important;
- L'augmentation du signal a aussi été notée dans des brûlis de type toundra, où aucun arbre n'est présent, confirmant que le double bond n'est pas le principal facteur;

## 2) L'humidité du sol

- Les études montrent qu'en zone de brûlis, le signal radar est fortement relié à l'humidité du sol ;
- L'humidité du sol et la rugosité seraient supérieures en zone de brûlis;
- La végétation basse atténue la sensibilité du signal à l'humidité et à la rugosité du sol . Lorsque le sol est exposé suite à un feu, le signal est plus sensible à ces facteurs;
- Les repousses n'influencent pas le signal avant que la biomasse n'atteigne au moins 1.0 kg/m<sup>2</sup> (4-5 ans);

Dans le cas des images du bassin de la Grande rivière, nous avons analysé le signal sur les brûlis à partir des images RADARSAT disponibles (1997-2002), afin de vérifier le comportement de la rétrodiffusion sur ce type d'occupation du sol. Dans un premier temps, nous avons extrait la rétrodiffusion de la classe brûlis sur l'ensemble du bassin. Toutefois, comme on englobe alors une grande variété de brûlis (âge, type) et comme on couvre une large bande d'angles d'incidence, les rétrodiffusions ne s'avèrent pas nécessairement comparables. Nous avons donc repris l'extraction, mais seulement sur deux grands brûlis du secteur de LG4-LA1. Nous avons également extrait la rétrodiffusion sur un site représentatif des autres classes d'occupation du sol dans le même secteur. Les résultats sont variables et peu concluants (figure 8). Avec le mode Standard (1997-1998), l'un des brûlis présente à la fin de l'automne, une rétrodiffusion significativement plus élevée que les autres occupations du sol, tel qu'observé dans la littérature. À l'hiver, sa rétrodiffusion se compare à celle des forêts plus denses. Dans ce cas, on peut faire l'hypothèse que lorsque le sol gel, la différence entre les deux environnements s'atténue. Dans ce cas, si le sol n'est pas gelé sur l'image de référence, le rapport de rétrodiffusion à l'hiver sera plus négatif pour les brûlis et l'algorithme pourrait y sous-estimer l'équivalent en eau. Sur les images en mode Wide (1998-1999), l'écart de rétrodiffusion entre le même brûlis et la forêt est aussi plus grand à l'automne qu'à l'hiver. Par contre, sur les images en mode ScanSAR Wide (1998-1999), rien ne différencie les deux environnements. Sur les images en mode ScanSAR Narrow, les brûlis ont même une rétrodiffusion plus faible que la forêt. Ils ont toutefois un écart

qui s'atténue avec les autres occupations du sol. En bref, il semble que certains brûlis présentent un comportement type, où la rétrodiffusion est forte à l'automne et normale à l'hiver. Par contre, ce n'est pas le cas sur toutes les séries d'images dont nous disposons. **La seule conclusion que nous pouvons en tirer est que le signal des brûlis à l'hiver est constant et que si le sol est bien gelé sur l'image de référence, l'algorithme est applicable.**

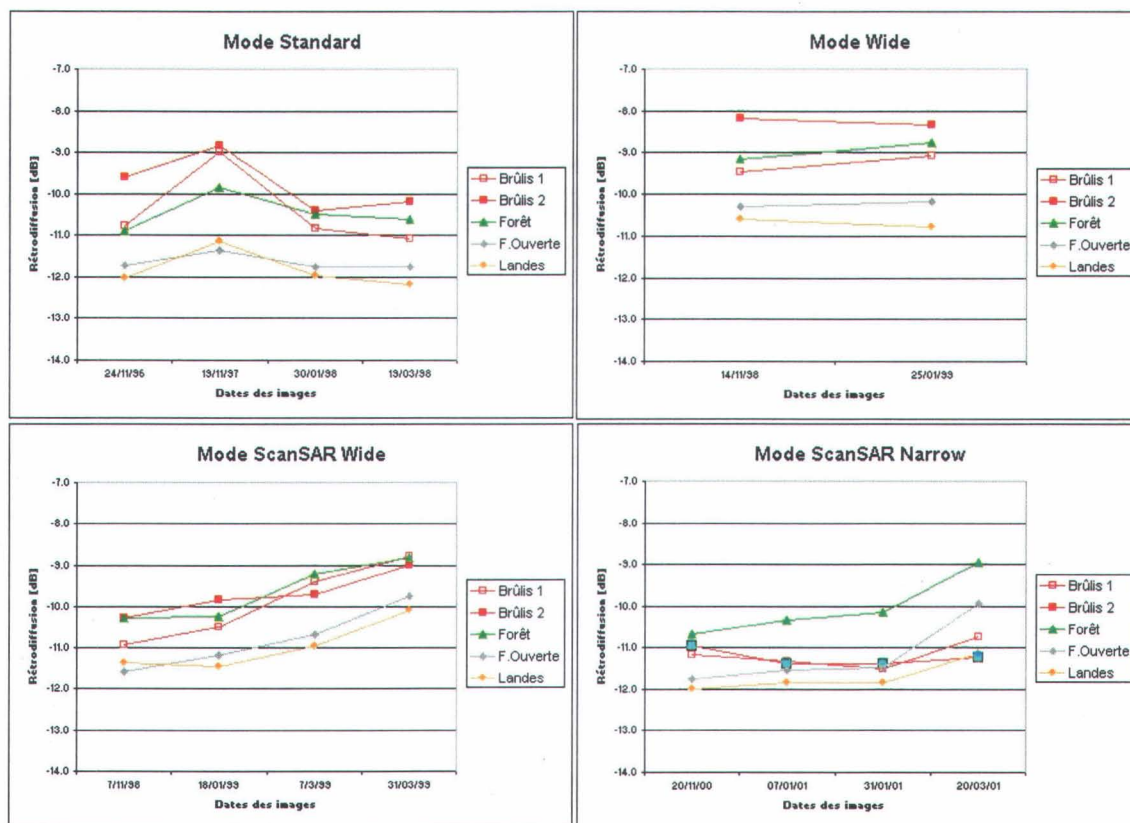


Figure 5 : Variation temporelle de la rétrodiffusion pour certaines occupations du sol





## 4. Analyse de l'incertitude du modèle EQeau

---

### 4.1 Introduction

Un processus modélisation ne doit pas fournir uniquement des réponses techniques à un problème, mais il doit fournir également les implications et les limitations de son application et ce, en déterminant le niveau de l'incertitude sur les sorties. Le modèle *EQeau* ne fait pas l'exception et ses sorties sont entachées d'un niveau plus ou moins élevé d'incertitude ou d'erreur qui affecte la qualité de ses prédictions. Cette incertitude est souvent due au manque de connaissances au sujet du phénomène étudié.

L'incertitude dans un modèle provient de plusieurs sources soit au niveau de sa structure mathématique, des données qui ont servi à le bâtir et à le calibrer ainsi que des paramètres et des données d'entrée qui sont utilisées. Il est important par conséquent de qualifier et de quantifier l'effet des erreurs et incertitudes sur les sorties des modèles.

Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour l'étude des effets de l'incertitude sur les sorties d'un modèle. Ces techniques peuvent être regroupées selon deux approches distinctes en raison de leurs objectifs respectifs, néanmoins complémentaires, à savoir l'analyse de sensibilité et la propagation de l'incertitude. Ces deux approches ont été utilisées pour analyser l'incertitude du modèle *EQeau*.

### 4.2 Performance du modèle *EQeau*

Avant de conduire l'analyse de l'incertitude du modèle, il est intéressant de juger des ses performances et de mesurer la qualité de ses estimations. Pour se faire, nous avons comparé les valeurs de l'équivalent en eau de la neige estimées par le modèle aux valeurs observées

correspondantes qui ont été mesurées (lignes de neige) au cours des campagnes de terrain de 1997, 1998, 1999 et 2001. Les données des campagnes 2000 et 2002 n'ont pas pu être prises en compte vu l'impossibilité d'utiliser les images correspondantes.

Nous nous sommes basés, dans cette comparaison, sur différents critères statistiques :

- le coefficient de détermination entre les valeurs observées et les valeurs estimées,
- l'erreur quadratique moyenne (RMSE);
- l'erreur quadratique relative moyenne qui représente la racine carrée de la moyenne des écarts au carré entre les valeurs observées et les estimées rapportée aux valeurs observées;
- le biais moyen qui représente la moyenne des écarts (valeurs observées moins estimées),
- et le biais relatif moyen qui est le biais relativisé par rapport aux valeurs observées. (Quand le biais est négatif, ceci signifie que les valeurs produites par EQeau sont surestimées par rapport aux valeurs mesurées).

La Figure 6 présente les valeurs de l'équivalent en eau estimées par EQeau en fonction des valeurs mesurées in situ. Chaque groupe de valeurs issues d'une campagne de terrain y est représenté par un symbole de couleur différente. Il s'avère que les valeurs d'équivalent d'eau ont été estimées avec un coefficient de détermination de 0,51. Cela représente une performance assez moyenne. Ainsi, le modèle n'explique que légèrement plus de 50% de la variation dans les observations. Par ailleurs, il est à remarquer qu'aucune des dates ne couvre à elle seule la gamme de variation de l'équivalent en eau dans cette région. Pour cette raison, **l'emploi pour l'étalonnage d'EQeau d'une longue série d'observations est nécessaire afin qu'il puisse reproduire avec plus de précision les conditions observables de la neige.** Il semble que pour deux dates (25 janvier 1999 et 30 mars 1997) parmi sept), EQeau surestime les valeurs de l'équivalent en eau. Pour ces deux dates, les données radar utilisées ont été acquises en mode Wide 1 et Standard 7, respectivement.

L'examen des résultats statistiques de comparaison entre valeurs estimées et mesurées (Tableau 6) confirme ces constats. En effet, pour les deux dates problématiques, l'erreur quadratique d'estimation dépasse les 50 mm et le biais moyen les 30 mm. Cela représente en moyenne plus de 30% de la valeur estimée de l'équivalent en eau et un biais relatif de l'ordre de 20%. En revanche, pour les autres dates, la surestimation est inférieure à 8 mm et l'erreur quadratique moyenne est inférieure à 28 mm. Ainsi, l'erreur totale (pour toutes les dates) est de l'ordre 39 mm (24%) et la surestimation est de -11 mm (-7%). En écartant les données de ces deux dates, les performances du modèle s'améliore grandement quoique la corrélation entre les valeurs estimées et mesurées demeure au même niveau ( $R^2=0,50$ ). Le RMSE total tombe à 25 mm (18% en terme relatif) et le biais d'estimation devient nul.

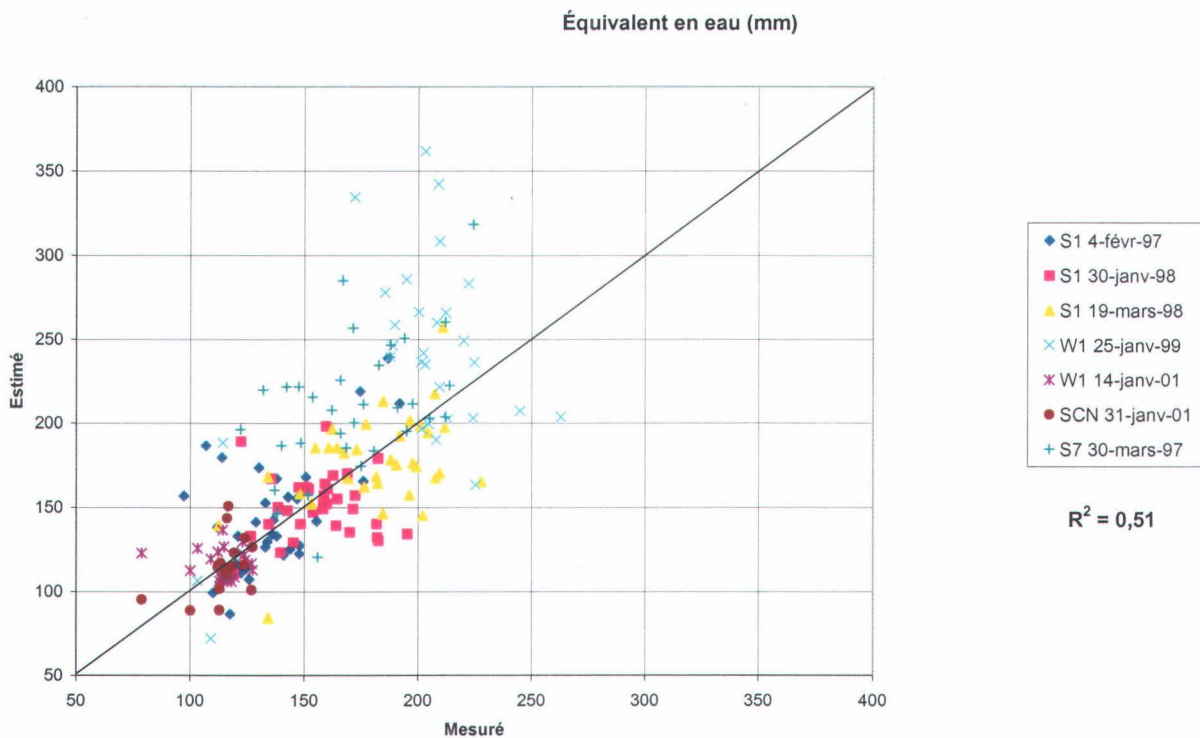


Figure 6 : Valeurs d'équivalent d'eau estimées à l'EQueau en fonction des valeurs mesurées



**Tableau 6 : Statistiques\* de comparaison des équivalents en eau estimés par rapport aux valeurs mesurés**

Mode	Date	Biais (mm)	Biais relatif (%)	RMSE (mm)	RMSE relative (%)
Standard 1	04-02-97	-8	-6	28	23
Standard 1	30-01-98	5	2	26	16
Standard 1	19-03-98	5	2	28	16
Standard 7	30-03-97	-38	-23	51	32
ScanSAR Narrow	31-01-01	0	0	16	14
Wide 1	25-01-99	-35	-18	66	35
Wide 1	14-01-01	-2	-3	15	16
<b>Moyenne</b>		<b>-11</b>	<b>-7</b>	<b>39</b>	<b>24</b>

\* Statistiques calculées à l'aide de 205 paires de valeurs.

D'après ces résultats, il est évident que les images en mode Standard 1 donnent des résultats plus précis que le mode S7 avec un RMSE absolu de l'ordre de 26-28 mm d'équivalent en eau. Ces valeurs correspondent à ce que nous avons déjà mentionnées dans le rapport EQeau remis à l'Agence spatiale canadienne en mars 2000 (24 mm). Pour les autres modes, il est difficile de conclure avec une seule image, en particulier dans le cas des modes Standard 7 et ScanSAR Narrow. En ce qui concerne les images en mode Wide 1, les résultats sont mitigés. Les résultats correspondants sont contradictoires et d'autres investigations sont également nécessaires.

### 4.3 Analyse de la sensibilité

L'analyse de sensibilité est une approche utilisée pour analyser les effets des variations des valeurs des paramètres du modèle (variables d'entrée, valeurs d'initialisation, paramètres internes, structure du modèle) sur les sorties de celui-ci. Elle consiste à faire varier ces paramètres dans un intervalle donné et observer les effets sur les sorties correspondantes.

Considérons un modèle dont la sortie  $f$  est fonction des paramètres  $V_i$  ( $i=1, \dots, n$ ). Définissons aussi un scénario nominal  $f(V_i^0)$  qui est la sortie du modèle à la valeur nominale  $V_i^0$  de  $V_i$ . Vu qu'elle représente le taux de variation de  $f$  résultant de la variation de  $V_i$ , la sensibilité ( $S$ ) peut être définie comme étant la dérivée partielle de  $f$ , évaluée au scénario nominal, par rapport à  $V_i$ :

$$S(V_i) = \left[ \frac{\partial f}{\partial V_i} \right]_{V_i^0} \quad (1)$$

$S$  est une mesure absolue de la sensibilité. Elle est fonction de l'échelle ou de l'unité de mesure de  $f$  et de  $V_i$ , ce qui ne permet pas de comparer des variables entre elles. On définit alors la sensibilité relative ( $Sr$ ) ou normalisée comme étant le produit de la sensibilité absolue par le rapport entre le paramètre nominal et la sortie du modèle correspondante.  $Sr$  exprime le pourcentage de changement dans les sorties d'un modèle par unité de changement du paramètre du modèle. Cette sensibilité n'est pas affectée par l'échelle ni par l'unité dans laquelle les paramètres et les sorties sont exprimées :

$$Sr(V_i) = \left[ \frac{\partial f}{\partial V_i} \right]_{V_i^0} \times \frac{V_i^0}{f(V_i^0)} \quad (2)$$

Rappelons-le, l'estimation de l'équivalent en eau de la neige ( $E_{est}$ ) par la procédure EQeau est basée sur les énoncés suivants :

$$E_{est} = R_{est} \times \alpha \quad (3)$$

Où  $R_{est}$  est la résistance thermique estimée du couvert de neige et provient de la relation suivante :

$$R_{est} = m \times R_{app} + b \quad (4)$$

Où  $R_{app}$  est le rapport de rétrodiffusion entre une image d'hiver et une image de référence, alors que  $m$  et  $b$  sont la pente et l'ordonnée à l'origine de la relation linéaire entre les deux paramètres, établie empiriquement.

Pour sa part,  $\alpha$  est relié à la conductivité thermique du couvert de neige et est fonction de la densité de la neige :

$$\alpha = \rho(A\rho^2 + B\rho + C) \quad (5)$$

Où  $\rho$  est la densité de la neige en  $\text{kg/m}^3$  alors que  $A$ ,  $B$  et  $C$  sont des constantes du système dont les valeurs sont respectivement,  $2,83056 \times 10^{-6}$ ;  $-9,09947 \times 10^{-5}$  et  $0,0319739$ .

En appliquant l'équation (2), il est possible alors de calculer la sensibilité relative de EQeau aux variations des différents paramètres du modèle à savoir :  $Rapp$ ,  $m$ ,  $b$  et  $\rho$ . Ainsi, les sensibilités relatives de ces derniers peuvent être estimées par les équations suivantes :

$$Sr(Rapp) = \frac{\partial E_{est}}{\partial R_{app}} \times \frac{Rapp}{E_{est}} = m \times \alpha \times \frac{Rapp}{E_{est}} \quad (6)$$

$$Sr(m) = \frac{\partial E_{est}}{\partial m} \times \frac{m}{E_{est}} = Rapp \times \alpha \times \frac{m}{E_{est}} \quad (7)$$

$$Sr(b) = \frac{\partial E_{est}}{\partial n} \times \frac{b}{E_{est}} = \alpha \times \frac{b}{E_{est}} \quad (8)$$

$$Sr(\rho) = \frac{\partial E_{est}}{\partial \rho} \times \frac{\rho}{E_{est}} = (m \times Rapp + b) \times (3A\rho^2 + 2B\rho + C) \times \frac{\rho}{E_{est}} \quad (9)$$

Les sensibilités relatives de chacun des paramètres ont été estimées en appliquant les équations 6, 7, 8 et 9 à l'aide des valeurs nominales des différents paramètres. Pour les paramètres  $m$  et  $b$ , les valeurs nominales sont celles obtenues par la régression linéaire entre  $Rapp$  et  $Rest$ . Quant à  $Rapp$  et  $\rho$ , une série de valeurs nominales ont été utilisées. Ces valeurs ont été choisies dans le domaine de variation des deux paramètres soit dans les intervalles de variations  $[-5 \text{ dB}; 5 \text{ dB}]$  et  $[80 \text{ kg/m}^3; 500 \text{ kg/m}^3]$ , respectivement.

La Figure 7 présente les résultats de l'analyse de sensibilité d'E<sub>Q</sub>eau aux fluctuations des quatre paramètres étudiés. La sensibilité relative  $y$  est exprimée en pourcentage. Celle-ci exprime le pourcentage de fluctuation dans l'équivalent en eau estimé résultant d'une variation de 1% du paramètre en question.

D'abord, la sensibilité aux paramètres  $Rapp$ ,  $m$  et  $b$  ne dépendent que de la valeur du rapport de rétrodiffusion. Tandis que la sensibilité à la densité est indépendante des valeurs que pourrait prendre le rapport de rétrodiffusion et ne varie qu'en fonction de la valeur de la densité elle-même. Il est à noter aussi que E<sub>Q</sub>eau affiche une sensibilité aux fluctuations du rapport de rétrodiffusion égale à celle vis-à-vis de la pente  $m$ . Ceci est attribuable au fait que ces deux paramètres occupent la même place dans l'équation du modèle (Éqs. : 6 et 7) conduisant ainsi à des sensibilités égales.

Par ailleurs, E<sub>Q</sub>eau exhibe une sensibilité relative aux paramètres  $Rapp$ ,  $m$  et  $b$  décroissante en fonction du rapport de la rétrodiffusion. Les plus fortes valeurs de sensibilité apparaissent à des valeurs du rapport inférieures à  $-3$  ( ce que nous rencontrons que sporadiquement lorsque le sol de l'image de référence est gelé). Pour ces cas, E<sub>Q</sub>eau est très sensible aux fluctuations de ces trois paramètres. Celle-ci peut atteindre les 6-7% pour des valeurs de rapport de rétrodiffusion de  $-5$ . Ainsi, dans les régions de l'image affichant des fortes valeurs négatives du rapport de rétrodiffusion, vu la sensibilité du modèle, la variation spatiale de ce dernier se traduit par une grande variabilité spatiale de l'équivalent en eau estimé (jusqu'à 6 fois).

Par contre, pour des valeurs de rapport supérieures à  $-3$ , la sensibilité des trois paramètres est relativement faible (<1% pour la pente et le rapport) et la variabilité spatiale de l'équivalent en eau est plus faible. Toutefois le modèle est légèrement plus sensible à l'ordonnée à l'origine (<2%).

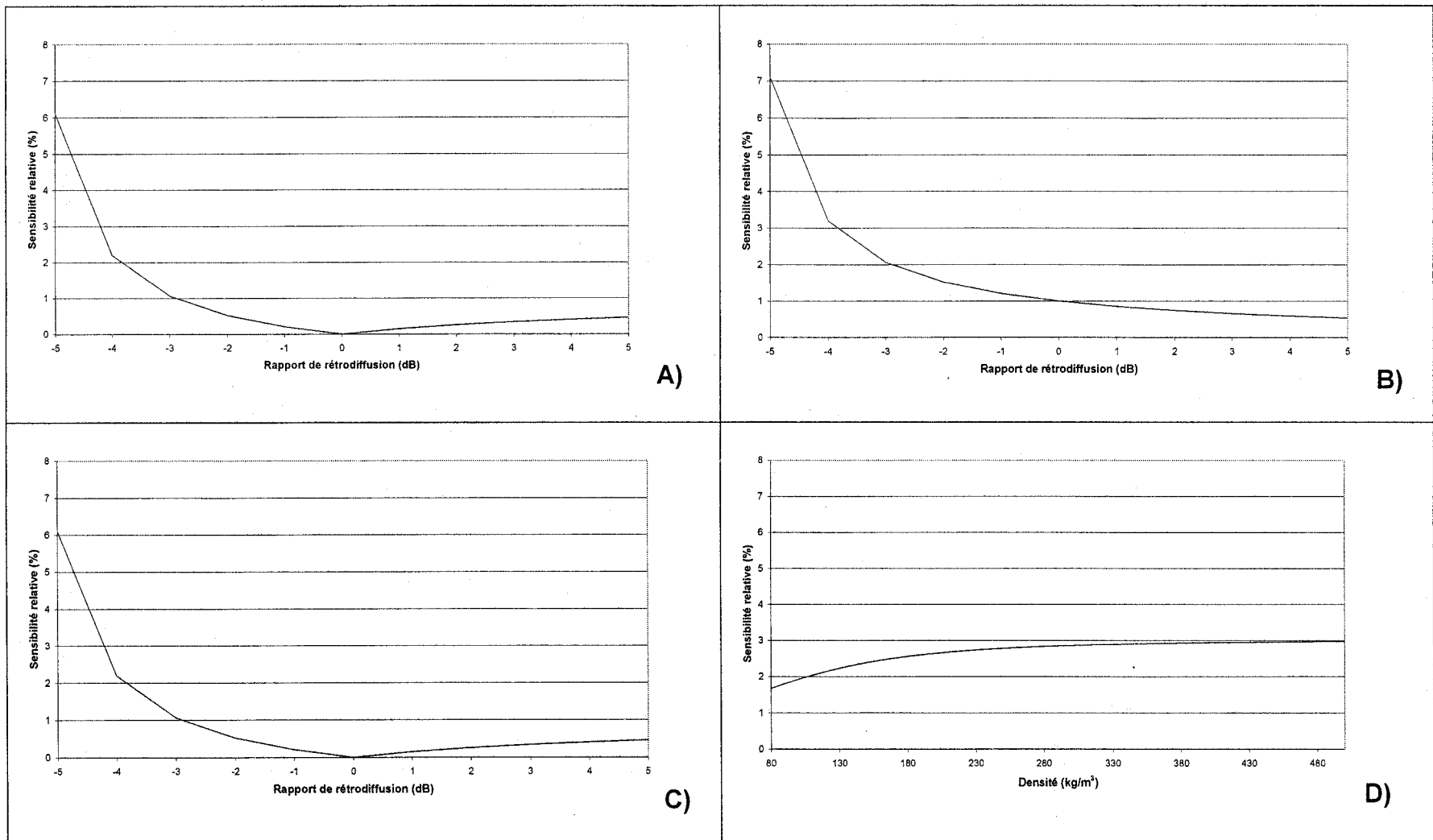


Figure 7 : Sensibilité relative du modèle EQeau aux variations des différents paramètres : A) Pente de la relation linéaire entre rapport de rétrodiffusion et résistance thermique; B) Ordonnée à l'origine de la relation linéaire entre rapport de rétrodiffusion et résistance thermique; C) Rapport de rétrodiffusion; D) Densité du couvert de neige



Quant à la densité, il apparaît que le modèle EQeau est généralement plus sensible aux variations de ce paramètre qu'à celles des trois autres (Figure 7 : D). Toutefois, la sensibilité à la densité est plus faible pour des conditions de neige fraîche (des densités inférieures à  $200 \text{ kg/m}^3$ ) qu'elle l'est pour de la neige métamorphosée et plus dense. Pour ce type de neige, la sensibilité du modèle aux fluctuations de la densité est stable autour de 3%.

#### 4.4 Propagation de l'incertitude (erreur totale)

La propagation l'incertitude est en fait le calcul de l'erreur totale induite dans les sorties du modèle par les incertitudes rattachées au niveau des données d'entrées, des paramètres ainsi qu'au niveau de la structure du modèle, tout en estimant l'importance relative de la contribution de chacune des entrées à cette incertitude.

L'erreur sur les sorties ainsi que les différentes contributions sont souvent décrites par leurs moments statistiques (moyenne, variance, coefficient d'asymétrie, etc.). Les méthodes fréquemment utilisées pour les estimer sont la méthode analytique et les techniques probabilistes dites d'échantillonnage. La méthode analytique consiste à dériver au deuxième ordre les équations du modèle par rapport aux variables visées afin d'estimer la variance des sorties induite par l'incertitude sur les entrées. Cependant, la complexité de l'analyse algébrique augmente considérablement avec la complexité du modèle. De plus, c'est une approche locale, elle n'est pas assez précise quand les incertitudes sont grandes.

Les techniques probabilistes, quant à elles, regroupent une panoplie de méthodes. Celles-ci considèrent les sorties du modèle et l'erreur qui s'y rattache comme étant des variables aléatoires, discrètes ou continues, telle que la méthode Monte Carlo. Cette dernière, que nous avons adoptée dans la présente étude, consiste à attribuer à l'erreur de chaque variable ou paramètre une fonction de distribution de probabilité puis à générer des échantillons représentatifs à partir de chaque distribution pour former un ensemble de scénarios de simulations aléatoires. Les résultats ainsi obtenus constituent une population de variables aléatoires décrivant la distribution de l'erreur sur les sorties dont les différents moments statistiques peuvent être directement estimés. Cette technique d'échantillonnage est une approche assez précise qui convient aux modèles

complexes puisqu'elles ne requièrent pas de développement algébrique ardu. Toutefois, ces techniques requièrent un nombre élevé de simulations afin d'atteindre un niveau de précision acceptable.

Afin de pouvoir conduire la simulation Monte Carlo, il est nécessaire de déterminer d'abord le niveau d'incertitude rattaché à chacun des paramètres étudiés (Tableau 7). Ainsi, l'incertitude sur les deux paramètres,  $m$  et  $b$ , est obtenue par leurs écarts-types donnés par la régression linéaire entre le rapport de rétrodiffusion et la résistance thermique. Subséquemment, l'incertitude sur l'estimation du paramètre  $m$  est de 0,0963 et celle de  $b$  est 0,1193. Ces valeurs représentent, respectivement, 8,75% et 1,86% de leurs valeurs nominales.

**Tableau 7 : Incertitudes sur les valeurs des différents paramètres du modèle EQeau**

Paramètres	Sensibilité relative	Incertitude sur la valeur des paramètres	
		Valeur absolue	Valeur relative
$M$	<1%	0,0963	8,7%*
$B$	<2%	0,1193	1,9%*
$Rapp$ (optimal)	<2%	0,1 dB	3,3%-10%*
$Rapp$ (extrême)		2,58 dB	86%-258%*
$P$	≈3%	41,09 kg/m <sup>3</sup>	20,5%-13,7%**

\* pour des valeurs de  $Rapp$  comprises entre -3 et 1 dB

\*\* pour des valeurs de  $\rho$  comprises entre 200 et 300 kg/m<sup>3</sup>

Quant à l'incertitude sur la densité de la neige, son origine est double. En effet, la densité utilisée dans EQeau est estimée en tout point du territoire à l'aide d'une procédure de spatialisation des valeurs mesurées localement. Ainsi, l'erreur de spatialisation vient s'ajouter à l'erreur d'estimation locale. Cette dernière s'élève à 16,67 kg/m<sup>3</sup>. Elle a été déterminée à l'aide d'une simulation Monte Carlo à partir des erreurs de mesure de l'équivalent en eau de la colonne de neige et de sa hauteur qui sont de l'ordre 12,7 mm et 6,4 mm, respectivement<sup>1</sup>. L'erreur de

<sup>1</sup> Densité moyenne = Équivalent en eau moyen / Hauteur moyenne.

spatialisation, quant à elle, a été calculée en comparant les valeurs estimées et mesurées à des sites indépendants auxquels nous disposons des deux types de valeurs. Cette erreur de spatialisation s'élève donc à  $37,55 \text{ kg/m}^3$ . L'incertitude globale sur les valeurs de densité est obtenues alors en calculant la racine carré de la somme des carrés des deux types d'erreurs soit  $41,09 \text{ kg/m}^3$ . Pour des valeurs de densité allant de 200 à  $300 \text{ kg/m}^3$ , le niveau d'incertitude varierait alors entre 20,5% et 13,7%.

En ce qui concerne le rapport de rétrodiffusion, l'estimation de l'incertitude qui lui est rattaché s'avère complexe. En effet, en plus des erreurs reliées leur acquisition, les images utilisées subissent une série de traitement (étalonnage, correction géométrique, ré-échantillonnage et filtrage) susceptibles d'introduire des erreurs non négligeables dans les valeurs de rétrodiffusion. Tenter de les estimer directement serait une tâche ardue et très complexe. Par conséquent, nous avons opté à employer une méthode indirecte pour l'estimation de l'incertitude sur les valeurs du rapport de rétrodiffusion. Il s'agit du variogramme. Celui-ci est un outil géostatistique qui permet de quantifier l'autocorrélation spatiale d'une variable aléatoire régionalisée en l'occurrence ici le rapport de rétrodiffusion. Cet outil donne la variance de la variable en fonction de la distance séparant les points d'échantillonnage. Normalement, la variance est nulle à l'origine du variogramme (à très courte distance) et elle croît ensuite en fonction de la distance pour atteindre un palier à une distance connue sous le nom de portée au delà de laquelle il n'y a plus d'autocorrélation spatiale. Toutefois, dans certains cas, la variance à l'origine est non nulle. Cette discontinuité à l'origine est connue sous le nom de l'effet pépite. Elle exprime l'erreur locale de la variable étudiée. Nous avons ainsi calculé les variogrammes expérimentaux avec un pas de distance d'un pixel sur deux sous-sections de  $250 \times 250$  pixels chacune (zone1 et zone2)<sup>2</sup>, extraites d'une image de rapport de rétrodiffusion. L'analyse a porté sur quatre images : 25 janvier 1999 (image en mode « Wide1 »), 14 janvier 2001 (mode « Wide1 »), 20 mars 2001 (mode ScanSAR) et 31 janvier 2001 (mode ScanSAR).

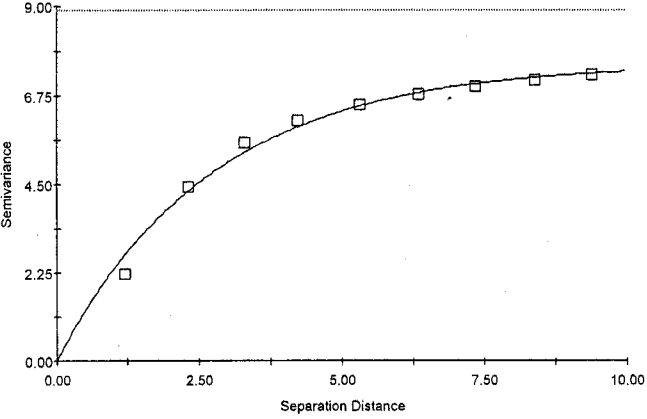
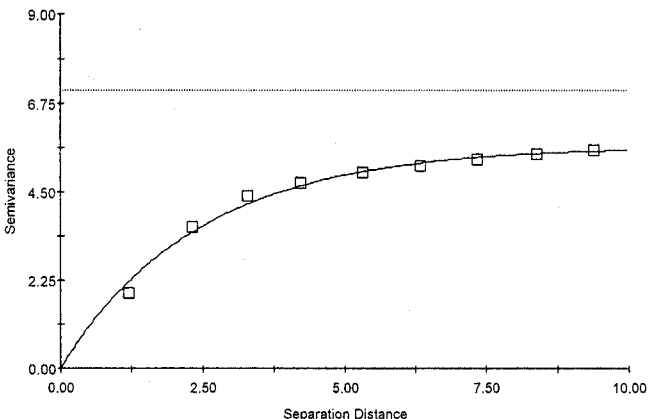
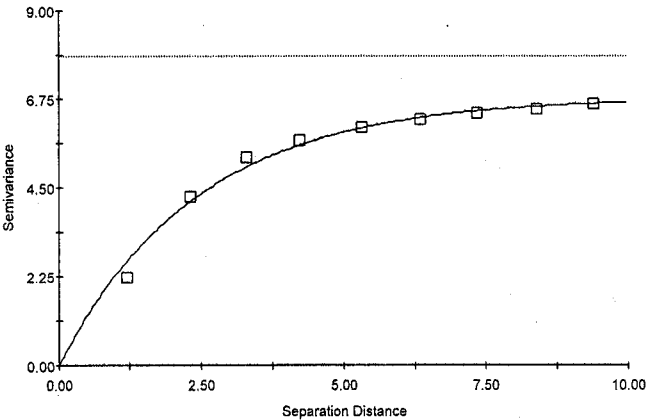
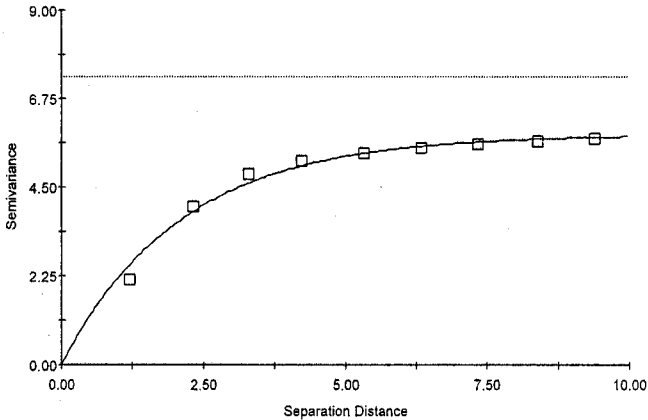
---

<sup>2</sup> Les coordonnées du coin supérieur gauche : zone1 ( $-72^{\circ}37'43.4$ ;  $54^{\circ}03'34.2$ ), zone2 ( $-73^{\circ}27'38.98$ ;  $53^{\circ}45'45.05$ )

La Figure 8 présente les variogrammes expérimentaux calculés à partir des huit sous-images ainsi que les modèles de variogrammes théoriques qui lui ont été ajustés. Les caractéristiques d'ajustement des modèles théoriques y sont également affichées. Le terme  $C_0$  représente la variance à l'origine ou l'effet pépité. Il en ressort que les images en mode ScanSAR présentent une variance à l'origine de l'ordre de  $0,01 \text{ dB}^2$ , ce qui représenterait une incertitude d'environ  $0,1 \text{ dB}$ , très inférieure à celles observées dans les images en mode Wide. En effet, ces dernières affichent des variances à l'origine de l'ordre de  $6,69 \text{ dB}^2$  pour l'une et de  $3,83 \text{ dB}^2$  pour l'autre, ce qui représenterait une erreur sur les valeurs du rapport de rétrodiffusion d'environ  $2,58 \text{ dB}$  et  $1,96 \text{ dB}$ , respectivement.

Afin d'étudier l'impact de l'incertitude sur les valeurs de  $R_{app}$  sur les sorties du modèle EQeau, nous avons donc considéré deux cas de figure : une condition optimale, où les valeurs de  $R_{app}$  auraient une faible incertitude ( $0,1 \text{ dB}$ ) et un cas extrême pour lequel l'erreur sur les valeurs de  $R_{app}$  auraient une valeur de  $2,58 \text{ dB}$ . Pour des valeurs du rapport variant entre  $-3 \text{ dB}$  et  $1 \text{ dB}$ , le niveau d'incertitude correspondant peut varier alors entre  $3,3\%$  et  $10\%$  dans le cas optimal (Tableau 7).

Une fois les incertitudes sur les différents paramètres du modèle ont été quantifiées, nous avons appliqué la procédure de propagation de l'erreur. Chaque simulation Monte Carlo a été réalisée à l'aide de  $5000$  scénarios aléatoires générés en supposant que l'erreur sur les différents paramètres est normalement distribuée autour de leurs valeurs nominales avec un écart-type de l'erreur égal à la valeur de l'incertitude calculée précédemment. En premier lieu, les simulations ont été réalisées en tenant compte simultanément de l'incertitude sur tous les paramètres afin de quantifier l'erreur globale sur l'estimation de l'équivalent en eau induite par les erreurs sur les différents paramètres. La contribution de chacun des paramètres dans l'erreur sur l'estimation de l'équivalent en eau a été mesurée en réalisant des simulations dans lesquelles seul le paramètre en question est considéré comme incertain.

Image	Zone1	Zone2
31-01-01 (SCN)	 <p>Exponential model (<math>C_0 = 0.010</math>; <math>C_0 + C = 7.564</math>; <math>A_0 = 2.73</math>; <math>r^2 = 0.987</math>; RSS = 0.333)</p>	 <p>Exponential model (<math>C_0 = 0.010</math>; <math>C_0 + C = 5.651</math>; <math>A_0 = 2.43</math>; <math>r^2 = 0.987</math>; RSS = 0.157)</p>
30-03-01 (SCN)	 <p>Exponential model (<math>C_0 = 0.010</math>; <math>C_0 + C = 6.776</math>; <math>A_0 = 2.45</math>; <math>r^2 = 0.985</math>; RSS = 0.290)</p>	 <p>Exponential model (<math>C_0 = 0.010</math>; <math>C_0 + C = 5.829</math>; <math>A_0 = 2.12</math>; <math>r^2 = 0.981</math>; RSS = 0.248)</p>

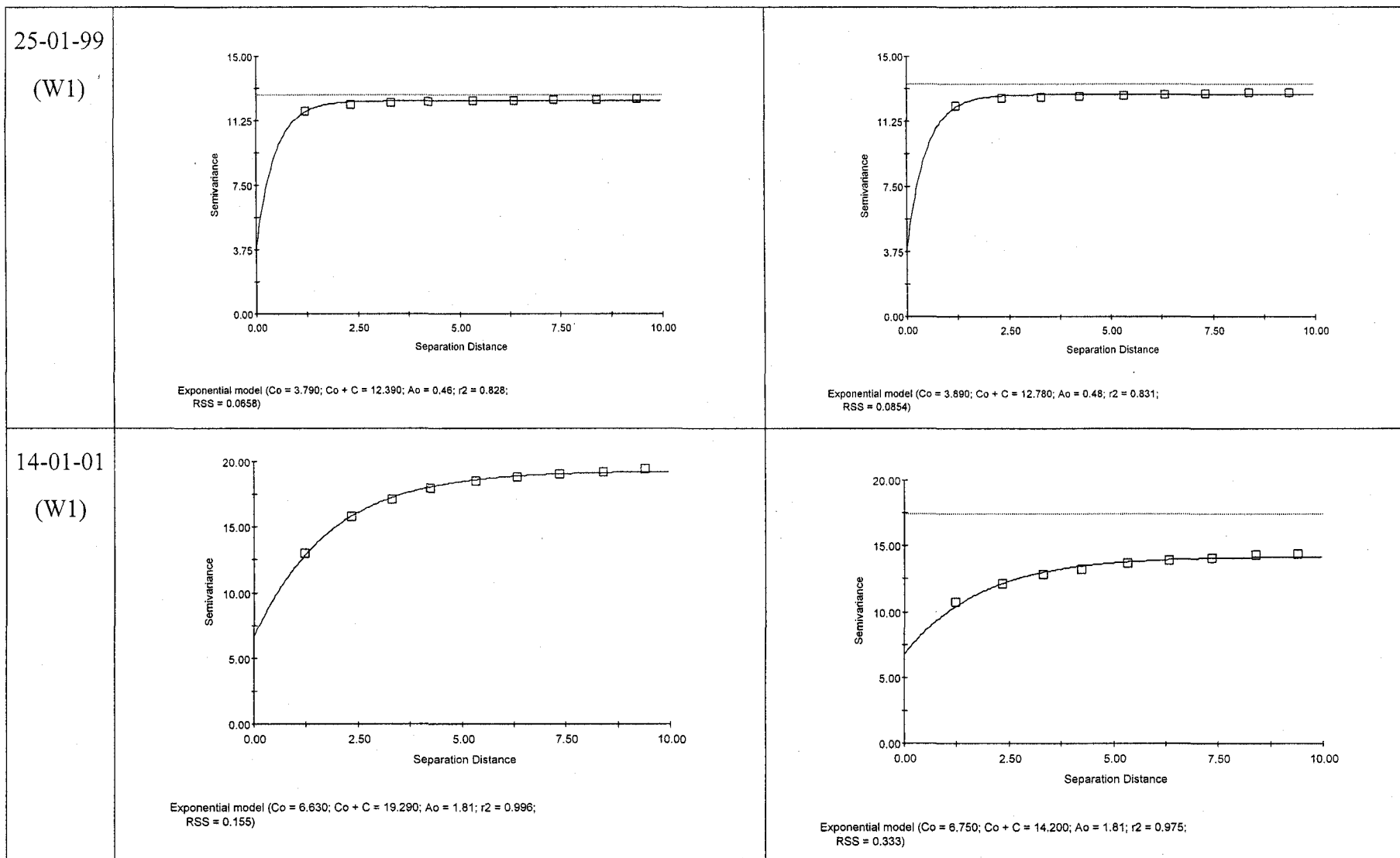
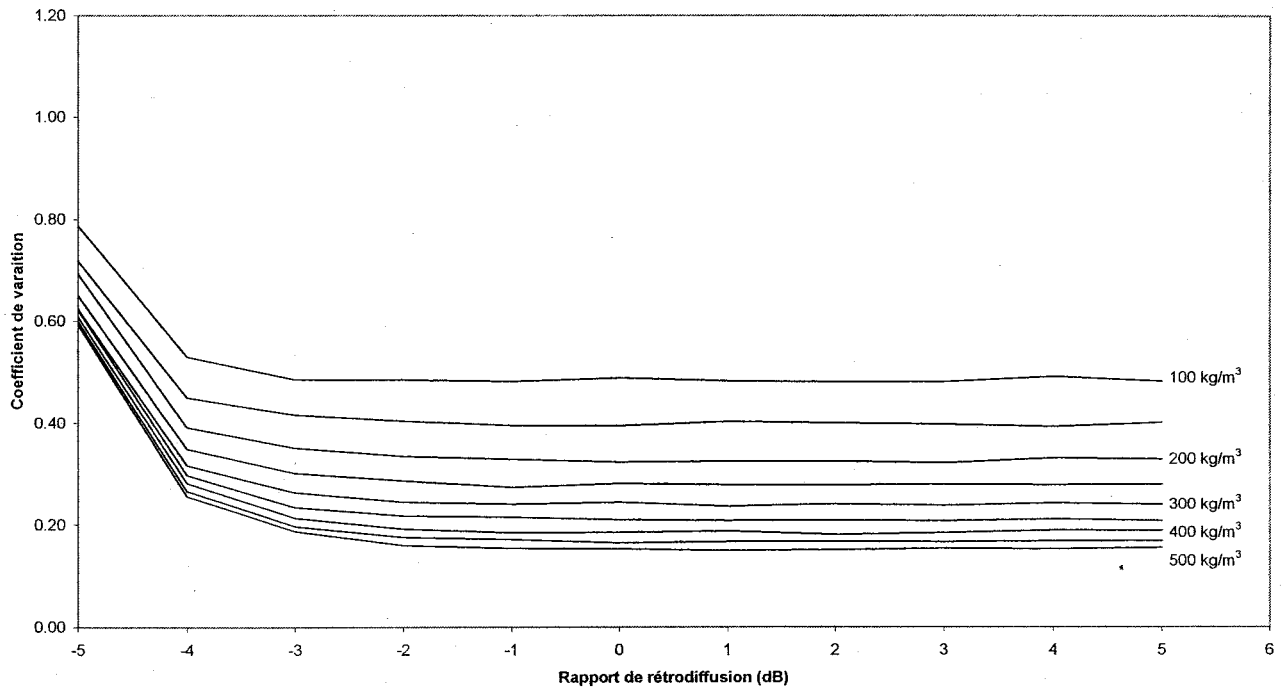


Figure 8 : Variogrammes expérimentaux (points carrés) et théoriques (lignes continues) des sous-images de rapport de rétrodiffusion de 250x250 pixels (linge pointillée : variance de totale de la sous-image)

Les résultats de l'estimation de l'erreur globale dans les sorties du modèle EQeau sont présentés à la Figure 9. La Figure 10, elle, montre les contributions partielles des différentes paramètres à l'erreur dans l'équivalent en eau estimé à l'aide du modèle EQeau. Les résultats de la propagation de l'erreur sont exprimés en terme de coefficient de variation qui est le rapport de l'écart-type par la valeur moyenne de l'équivalent en eau de l'échantillon des 5000 simulations. Il faut noter que ces simulations ont été réalisées dans le cas de figure optimal pour le rapport de rétrodiffusion c'est-à-dire avec une incertitude de 0,1 dB sur les valeurs de *Rapp*.



**Figure 9 : Erreur globale sur l'estimation de l'équivalent en eau induite par l'incertitude sur les valeurs des différents paramètres du modèle EQeau et dans le cas d'une baisse de l'incertitude de la densité de la neige à une valeur 25,10 kg/m<sup>3</sup>.**

L'erreur globale sur l'estimation de l'équivalent en eau est en même temps fonction des valeurs du rapport de rétrodiffusion et de celles de la densité de la neige. L'erreur globale décroît rapidement avec l'accroissement des valeurs du rapport de rétrodiffusion pour demeurer pratiquement constante au delà de -3 dB. De la même manière, l'erreur globale d'estimation varie en sens inverse de la variation de la densité de la neige. Pour des valeurs de densité

habituellement observées sur le terrain, entre 200 et 300 kg/m<sup>3</sup> et des rapports de rétrodiffusion entre -3 et 1 dB, l'erreur globale varie essentiellement en fonction de la densité de la neige et ce, entre des valeurs du coefficient de variation de l'erreur allant de 0,53 à 0,39. En effet, l'erreur globale est quasiment constante en fonction du rapport de rétrodiffusion (Figure 9). Ceci représente des niveaux d'incertitude assez élevés. Ainsi, l'incertitude représenterait entre 40 à 55% de la valeur estimée de l'équivalent en eau du couvert neigeux.

En examinant les contributions partielles de l'incertitude associée à chacun des paramètres sur l'erreur globale de l'estimation (Figure 10, Tableau 8), il s'avère que la densité de la neige est responsable de la majeure partie. En effet, l'incertitude sur les deux paramètres de régression  $m$  et  $b$  ainsi que sur le rapport de rétrodiffusion n'engendre qu'une faible erreur dans l'estimation de l'équivalent en eau, particulièrement, dans la gamme de variation observée sur le terrain. Ainsi, la pente et l'ordonnée à l'origine de la relation de régression induisent une erreur d'estimation partielle du même ordre de grandeur que leurs niveaux d'incertitude avec lesquels ont été estimés à savoir 9% et 2%, respectivement. Cette équivalence s'explique par la place relativement secondaire qu'occupent ces deux paramètres dans les équations du modèle EQeau qui se traduit par une faible sensibilité. Quoique le modèle est moins sensible aux fluctuations de la pente qu'il ne l'est pour l'ordonnée à l'origine (Figure 7 :A,B), l'incertitude relative associée au premier paramètre est plus importante qu'à celle du second (8,75% contre 1,86%). Ceci explique le fait que la pente contribue plus dans l'erreur d'estimation de l'équivalent en eau.

**Tableau 8 : Incertitude partielle sur l'estimation de l'équivalent en eau induite par l'incertitude sur les valeurs des paramètres d'EQeau.**

Paramètres	Coefficient de variation de l'équivalent en eau
$m$	<0,09*
$b$	<0,04*
$Rapp$ (optimal)	<0,04
$Rapp$ (extrême)	0,95-0,38*
$\rho$	0,53-0,39**

\* pour des valeurs de  $Rapp$  comprises entre -3 et 1 dB

\*\* pour des valeurs de  $\rho$  comprises entre 200 et 300 kg/m<sup>3</sup>



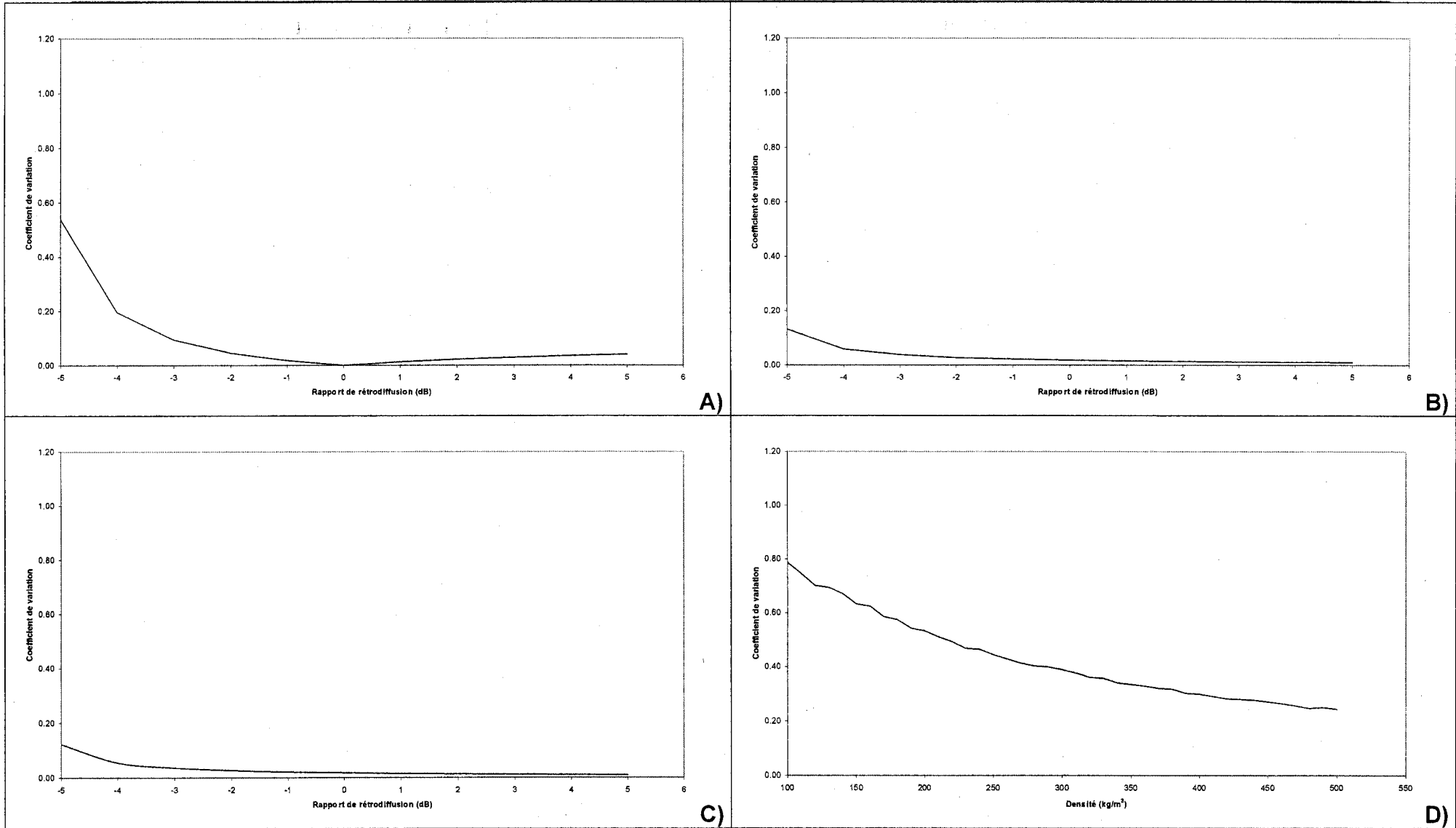


Figure 10 : Erreurs partielles sur l'estimation de l'équivalent en eau induites par l'incertitude sur les valeurs des différents paramètres du modèle *EQeau* : A) Pente de la relation linéaire entre rapport de rétrodiffusion et résistance thermique; B) Ordonnée à l'origine de la relation linéaire entre rapport de rétrodiffusion et résistance thermique; C) Rapport de rétrodiffusion; D) Densité du couvert de neige.

En ce qui concerne la densité de la neige, à cause de l'incertitude importante qui lui est associée (entre 13% et 20%), elle contribue à un niveau très élevée dans l'erreur sur l'estimation de l'équivalent en eau. Ainsi, pour des valeurs de densité allant de 200 à 300 kg/m<sup>3</sup>, l'erreur relative d'estimation induite par l'incertitude qui lui est associée évolue entre 0,53 et 0,39. En plus du niveau élevé d'incertitude sur le calcul des valeurs de la densité de la neige, sa contribution significative dans l'erreur d'estimation de l'équivalent en eau est également attribuable à la place importante qu'elle occupe dans le modèle EQeau (un polynôme d'ordre trois) qui se traduit par une sensibilité relative de l'ordre de 3% (une variation de 1% dans les valeurs de la densité se manifeste par une variation de 3% dans l'équivalent en eau estimé). La source de l'incertitude associée à la densité de la neige réside principalement dans la procédure de spatialisation. Cette dernière est responsable de 80% de l'erreur totale commise sur le calcul de la densité de la neige. Si l'erreur de spatialisation était réduite de 50%, passant de 37,55 à 18,77 kg/m<sup>3</sup>, ce qui fait passer l'incertitude totale sur la densité de la neige de 41,09 à 25,10 kg/m<sup>3</sup> (une baisse de 39%), la contribution de la densité dans l'erreur d'estimation de l'équivalent en eau évoluerait alors entre 33% et 24% au lieu de 53% et 39% (pour des densités allant de 200 et 300 kg/m<sup>3</sup>).

Par ailleurs, la réduction de l'incertitude sur la densité de la neige de l'ordre de 30% contribue à réduire significativement l'erreur global d'estimation de l'équivalent de la neige de presque 33% (Figure 11). L'erreur passe d'un intervalle de variation compris entre 53% et 39% à une gamme de variation allant de 35% à 25%. Toutefois, ces niveaux d'incertitude demeurent toujours élevés. L'idéal serait d'avoir une incertitude inférieure ou égale à 10% de la valeur estimée. Ceci **ne peut être atteint que par la réduction simultanée des erreurs d'estimation locale et de spatialisation de la densité de la neige.**

Nous avons effectué des simulations pour le cas de figure où l'incertitude sur les valeurs du rapport de rétrodiffusion est extrême (2,58 dB). Il s'en dégage que la contribution de ce paramètre dans l'erreur sur l'estimation de l'équivalent en eau de la neige est très importante (Figure 12). Ainsi, les valeurs estimées de l'équivalent en eau auraient une incertitude représentant entre 95% et 38% de la valeur de l'équivalent en eau et ce, pour des *Rapp* variant entre de -3 dB et 1 dB. Quand l'erreur globale est quantifiée pour ce cas de figure, l'incertitude

sur l'équivalent est davantage plus importante (Figure 13). Elle n'est plus alors quasi constante en fonction du rapport de rétrodiffusion pour un niveau de densité donné mais elle représenterait entre 110% et 60% de la valeur de l'équivalent en eau et ce, pour des valeurs de **Rapp** variant entre de -3 dB et 1 dB.

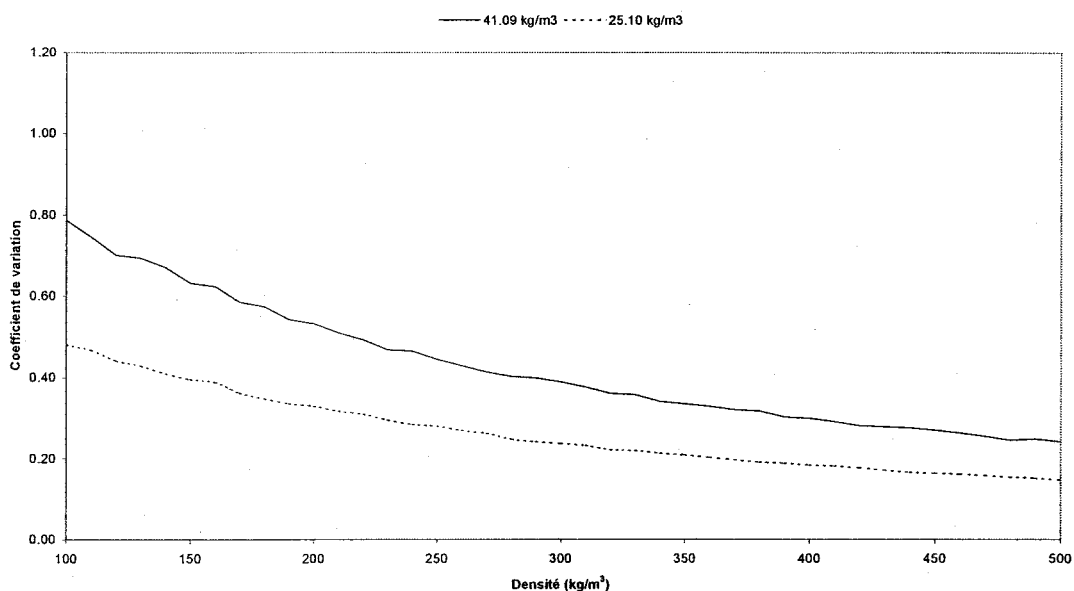


Figure 11 : Erreurs partielles sur l'estimation de l'équivalent en eau induites par deux niveaux d'incertitudes sur les valeurs de la densité de la neige.

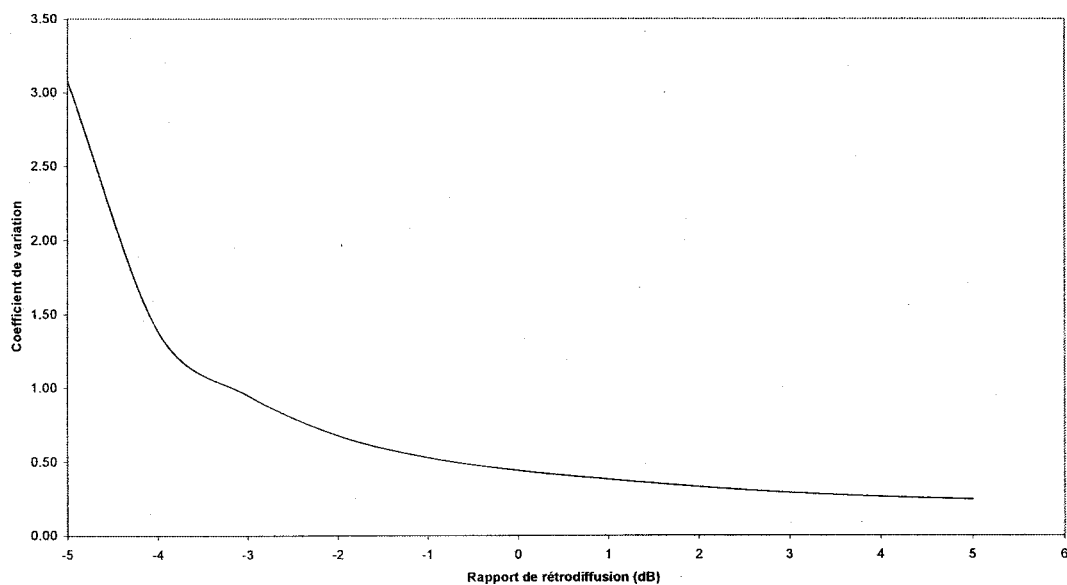
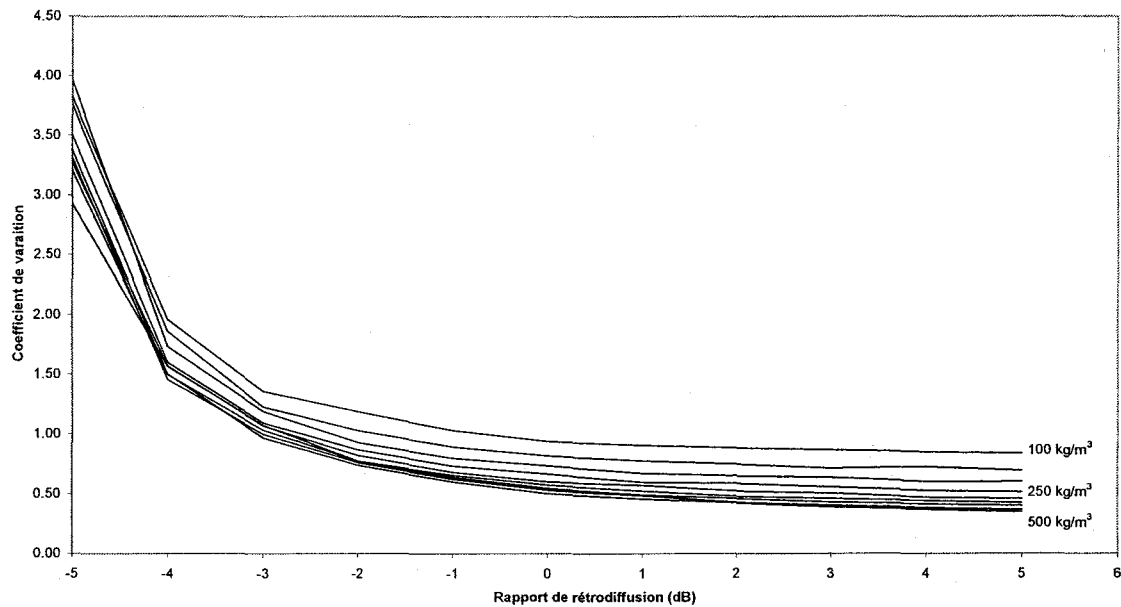


Figure 12 : Erreur partielle sur l'estimation de l'équivalent en eau induite un niveau d'incertitude sur les valeurs du rapport de rétrodiffusion de 2,58 dB correspondant au cas de figure extrême.



**Figure 13 : Erreur globale sur l'estimation de l'équivalent en eau induite par l'incertitude sur les valeurs des différents paramètres du modèle EQeau dont celle du Rapp est de 2,58 dB correspondant au cas de figure extrême.**

## 4.5 Conclusion suite à l'analyse de l'incertitude

Nous avons d'abord évalué les performances du modèle EQeau et la qualité de ses estimations. Il s'avère que les valeurs d'équivalent d'eau ont été estimées avec un coefficient de détermination de 0,51. Cela représente une performance assez moyenne car le modèle n'expliquerait que 50% de la variation dans les observations. Par ailleurs, aucune des sept images ne couvre à elle seule la gamme de variation de l'équivalent en eau dans cette région. **L'emploi pour l'étalonnage d'EQeau d'une longue série d'observations est donc nécessaire afin qu'il puisse reproduire avec plus de précision les conditions observables de la neige au sol.** En écartant les données de deux images (une Wide1 et une Standard 7) qui surestiment l'équivalent en eau, le RMSE total tombe à 25 mm (18% en terme relatif) et le biais d'estimation devient nul. Aussi, l'analyse de l'incertitude dans le modèle EQeau a montré que ce dernier est particulièrement sensible aux fluctuations de la densité de la neige et dans un moindre degré aux fluctuations du rapport de rétrodiffusion. Également, la sensibilité aiguë d'EQeau à la densité, jumelée à la plus grande incertitude avec laquelle elle est estimée par rapport au reste des

paramètres, la place à la tête des sources d'erreur dans les estimations de l'équivalent en eau. Ces dernières sont produites avec un niveau d'incertitude assez élevé (entre 40 et 50% de la valeur de l'estimation). **Un effort de réduction des incertitudes sur la densité de la neige est nécessaire afin d'arriver à des niveaux acceptables pour les utilisateurs.** Par ailleurs, le rapport de rétrodiffusion est une source potentielle d'un niveau élevé d'incertitude dans l'estimation de l'équivalent en eau si les images ne sont pas adéquatement traitées et le chatoiement pas assez réduit. **Des modifications sont donc aussi envisagées dans la chaîne de pré-traitement des images RADARSAT.**



## 5. Représentativité cartographique

---

### 5.1 Contexte

Tel qu'observé en 2001, un des problèmes de fiabilité et d'apparence des cartes produites par EQeau est relié à l'utilisation d'une densité moyenne par sous-bassin, ajustée pour trois classes d'occupation du sol (forêt dense, forêt ouverte, zones dégagées). Le fait de discrétiser la densité par sous-bassin a pour conséquence de segmenter aussi les cartes résultantes, puisque la densité a un impact majeur (30%) sur le calcul des équivalents en eau.

Nous avons alors constaté qu'il y avait peu de différence entre la densité moyenne (240 kg/m<sup>3</sup> en janvier) du couvert nival des secteurs de LG3 et de LG4/Caniaspicau. De plus, en se basant sur l'hypothèse que les densités des secteurs à l'ouest de LG3 étaient aussi peu différentes de celles de LG4 l'hiver précédent, nous avons aussi repris la cartographie du mois de janvier 2001 (annexe 1). Ainsi, au lieu d'appliquer des valeurs moyennes entre 140 à 150 kg/m<sup>3</sup> pour les sous bassins à l'ouest de LG3, nous avons alors appliqué les mêmes densités que LG4 soient 180 à 195 kg/m<sup>3</sup>. Nous pouvons ainsi voir disparaître la coupure nette visible sur les cartes d'équivalents en eau de l'hiver 2001 laquelle mettait en doute la fiabilité des images RADARSAT et de la méthode EQeau mais soulignait effectivement des problèmes dans la représentativité des mesures ponctuelles et dans leur spatialisation.

### 5.2 Répartition des densités par bassin

Bien qu'il y ait eu quelques doutes sur la précision de certaines des valeurs de densité issues des relevés de terrain d'Hydro-Québec (particulièrement dans l'ouest) et bien qu'il soit essentiel de travailler vers une estimation plus juste et plus représentative de la densité de la neige sur le territoire, il demeure que dans la réalité, une disparité géographique des densités existent. Elle



est d'abord reliée aux conditions climatiques, qui elles, sont particulières à la latitude, à l'altitude et à certains facteurs environnementaux (ex : proximité d'une large masse d'eau). La densité de la neige au sol est aussi reliée à l'occupation du sol puisqu'en général, une zone protégée du vent présentera une neige moins dense qu'une zone plus exposée.

Dans sa version actuelle, *EQeau* peut déjà affecter une densité différente pour chaque occupation du sol et ainsi tenir compte de ce dernier facteur. Par contre, il n'y a encore aucun outil pour tenir compte à tout le moins, de la latitude et de l'altitude. Il serait techniquement possible de développer un tel outil pour *EQeau*, basé sur le modèle numérique d'altitudes (déjà utilisé pour le calcul des statistiques) et sur la position géographique du pixel. Toutefois, afin de pouvoir déterminer pour une date donnée, la variabilité de la densité de la neige en fonction de ces éléments, il est essentiel de disposer d'un réseau de mesures au sol très représentatif des classes d'altitudes et de latitudes.

Sur l'ensemble du bassin de la Grande rivière, les altitudes varient globalement de 100m à 1100m. La figure 5 présente la matrice des altitudes regroupées par classes et la position des sites de mesures au sol d'Hydro-Québec.

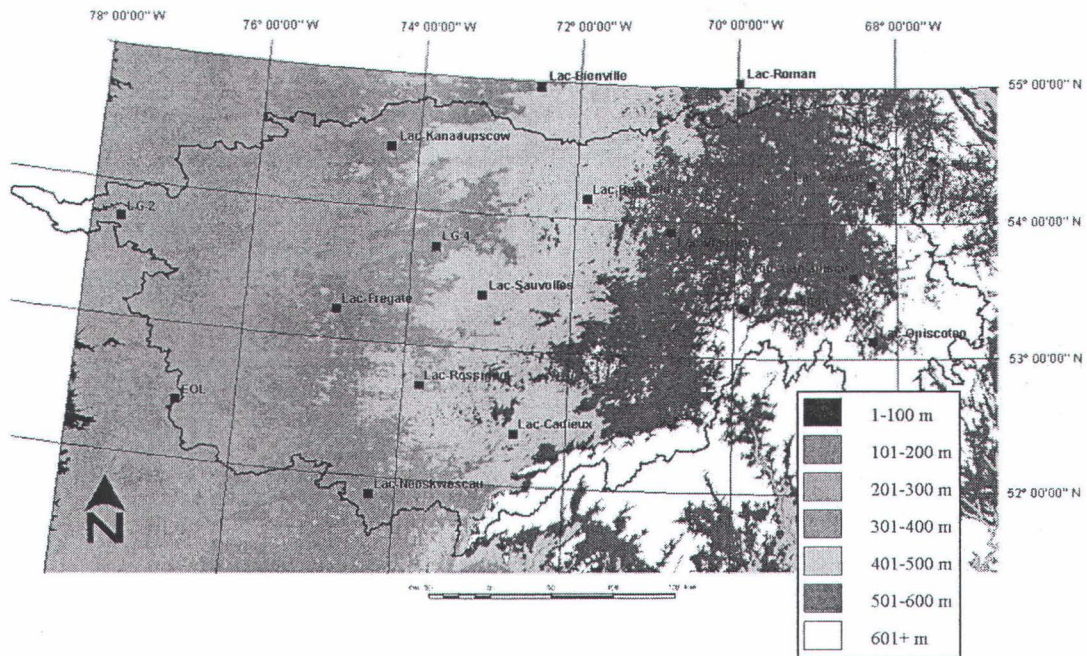


Figure 14 : Matrice des altitudes regroupées par classes (Bassin de la Grande rivière) et sites de relevés de neige d'Hydro-Québec



Selon cette figure (résumée au Tableau 9), le réseau de mesures actuel d'Hydro-Québec permettrait d'établir une densité de neige moyenne à partir d'au moins trois sites pour les classes d'altitudes supérieures à 300m, soit le territoire en amont du réservoir de LG3. Ils permettrait également de le faire pour les latitudes supérieures à 52°N, ce qui englobe 95% du bassin. Dans les deux cas, les sites de l'INRS augmentent le nombre d'échantillons mais ne l'optimisent pas pour les classes sous-représentées. À l'avenir, il serait pertinent de déplacer certains des sites d'échantillonnage vers des classes sous-représentées (100-200 et 200/300).

**Tableau 9 : Répartition des sites de mesures au sol par classes d'altitudes et par classes de latitudes**

Classe d'altitudes [m]	Sites (HQ / INRS)	Classe de latitudes	Sites (HQ / INRS)
1-100	Aucun	51° à 52°	Lac Neoskwescau,
101-200	LG2	52° à 53°	Lac Cadieux, EOL Lac Rossignol
201-300	EOL	53° à 54°	Lac Opiscoteo, Lac Frégate Lac Madigan, Lac Sauvolles, LG4, Lac Caniapiscau, Lac Vianney, LG2,
	#49, #48, #47		#47, #48, #46, #45, #44, #42, #49, #41#, #16, #15, #14, #20, #1, #2, #4, #5b, #6
301-400	Lac Neoskwescau, Lac Frégate, Lac Kanaaupscow, Lac Rossignol, Lac Bienville, LG4	54° à 55°	Lac Bertrand, Lac Falaise, Lac Kanaaupscow, Lac Bienville
	#45, #46, #42, #44, #41, #14, #15, #16		#8, #30, #31, #32, #35, #36, #34, #33
401-500	Lac Cadieux, Lac Sauvolles, Lac Bertrand		
	#20, #1, #2, #6, #32, #30, #4, #31, #8, #36, #5b,		
501-600	Lac Vianney, Lac Falaise, Lac Caniapiscau, Lac Madigan, Lac Opiscoteo		
	#34, #35, #33		
601+	Aucun		

Les données de 2001 ayant été les plus problématiques au niveau de la disparité entre les bassins, nous y avons recalculé les densités moyennes pour chaque classe d'altitudes et chaque classe de latitudes, à partir des relevés d'Hydro-Québec. Selon le Tableau 10, il existe réellement une relation entre la densité de la neige et l'altitude, mais aussi, entre la densité de la neige et la latitude. En effet, la densité moyenne augmente constamment avec l'altitude et elle fait de même avec la latitude. Il serait donc logique de spatialiser la densité en tenant compte de ces deux facteurs. Chaque classe de latitudes serait ainsi découpée en classes d'altitudes, qui pourrait à son tour être subdivisée en classes d'occupation du sol.

**Tableau 10 : Calcul des densités (kg/m) par classes d'altitudes et de latitudes pour 2001**

Classes d'altitudes [m]	Moyenne de densité Janvier	Moyenne de densité Février	Moyenne de densité Mars	Classe de latitudes	Moyenne de densité Janvier	Moyenne de densité Février	Moyenne de densité Mars
1-100	-	-	-	51° à 52°N	-	-	-
101-200*	90	144	159	52° à 53°N	83	148	172
201-300*	94	137	173	53° à 54°N	162	203	212
301-400	126	188	202	54° à 55°N	202	229	227
401-500	158	201	216				
501-600	210	229	227				
601+	-	-	-				

\* Un seul site pour ces classes

Du point de vue technique, l'application de densités moyennes par classes d'altitudes, de latitudes et d'occupations du sol ne nécessite aucun changement de programmation dans *EQeau*. Il suffit simplement de remplacer la matrice combinée « bassins-occupation du sol » par une nouvelle matrice combinée « altitudes-latitudes-occupation du sol ». Le fichier des densités serait quant à lui détaillé selon toutes les combinaisons possibles (84). Toutefois, à partir des données disponibles, il est très difficile de calculer une moyenne représentative pour chaque combinaison puisqu'il est possible qu'aucun site d'échantillonnage ou que très peu de sites n'en fasse partie. Peut-être pourrait-on calculer la variation (%) de la densité d'une classe à l'autre, en prenant pour base la classe la mieux représentée (plus de sites).



Le Tableau 11 présente ces variations séparément pour les classes d'altitudes et de latitudes. Les classes de référence y sont : altitudes 301-400m et latitudes 53°-54°N. On remarquera que le patron de variation de la densité moyenne est différent selon le mois. En effet, plus l'hiver avance et plus le couvert se densifie, moins grande est la variation d'une classe à l'autre.

**Tableau 11 : Pourcentage de densité par rapport à la classe la mieux représentée (2001)**

Classes d'altitudes [m]	Variation de densité Janvier	Variation de densité Février	Variation de densité Mars	Classe de latitudes	Moyenne de densité Janvier	Moyenne de densité Février	Moyenne de densité Mars
1-100	-	-	-	51° à 52°N	-	-	-
101-200*	71%	77%	79%	52° à 53°N	51%	73%	81%
201-300*	75%	73%	86%	53° à 54°N	100%	100%	100%
301-400	100%	100%	100%	54° à 55°N	125%	113%	107%
401-500	125%	107%	107%				
501-600	167%	122%	112%				
601+	-	-	-				

\* Un seul site pour ces classes

Ces constats sont fait uniquement à partir de la saison 2001. Il faudra reprendre les données de toutes les années disponibles pour établir un patron de variation statistiquement représentatif. À titre d'exemple, l'année 2002 donne déjà des valeurs plus stables d'un mois à l'autre, comme le montre le Tableau 12.

**Tableau 12 : Pourcentage de densité par rapport à la classe la mieux représentée (2002)**

Classes d'altitudes [m]	Variation de densité Janvier	Variation de densité Février	Variation de densité Mars	Classe de latitudes	Moyenne de densité Janvier	Moyenne de densité Février	Moyenne de densité Mars
1-100	-	-	-	51° à 52°N	-	-	-
101-200*	107%	105%	101%	52° à 53°N	72%	77%	79%
201-300*	94%	92%	94%	53° à 54°N	100%	100%	100%
301-400	100%	100%	100%	54° à 55°N	115%	111%	115%
401-500	135%	123%	126%				
501-600	147%	131%	139%				
601+	-	-	-				

\* Un seul site pour ces classes

### 5.3 Problème des plans d'eau

Au niveau de l'apparence des cartes produites par *EQeau*, un deuxième problème est apparu lorsque nous sommes passés de l'application sur une image (secteur LG4) vers une application sur trois images (ensemble du bassin). Il s'agit de la valeur appliquée aux plans d'eau, pour lesquels l'algorithme n'est pas applicable. Dans sa version actuelle *EQeau* applique aux plans d'eau, la moyenne d'équivalent en eau calculée sur les pixels terrestre de l'ensemble de l'image. Le problème est que cette moyenne peut varier d'une image à l'autre, c'est-à-dire que la moyenne calculée pour l'image de l'est pourrait être de 220 mm (eau en jaune) et celle calculée pour l'ouest pourrait être de 190 mm (eau en vert). La carte produite pour janvier 2002 (figure 6) présente un phénomène semblable, avec les lacs de l'est en jaune et ceux de l'ouest en rouge. Il faudrait donc **uniformiser la couleur des plans d'eau ou mettre leur valeur à zéro (noir)**. Il faut toutefois s'assurer que le logiciel ne tienne pas compte de ces pixels lors du calcul de la moyenne d'équivalent en eau par sous-bassin.

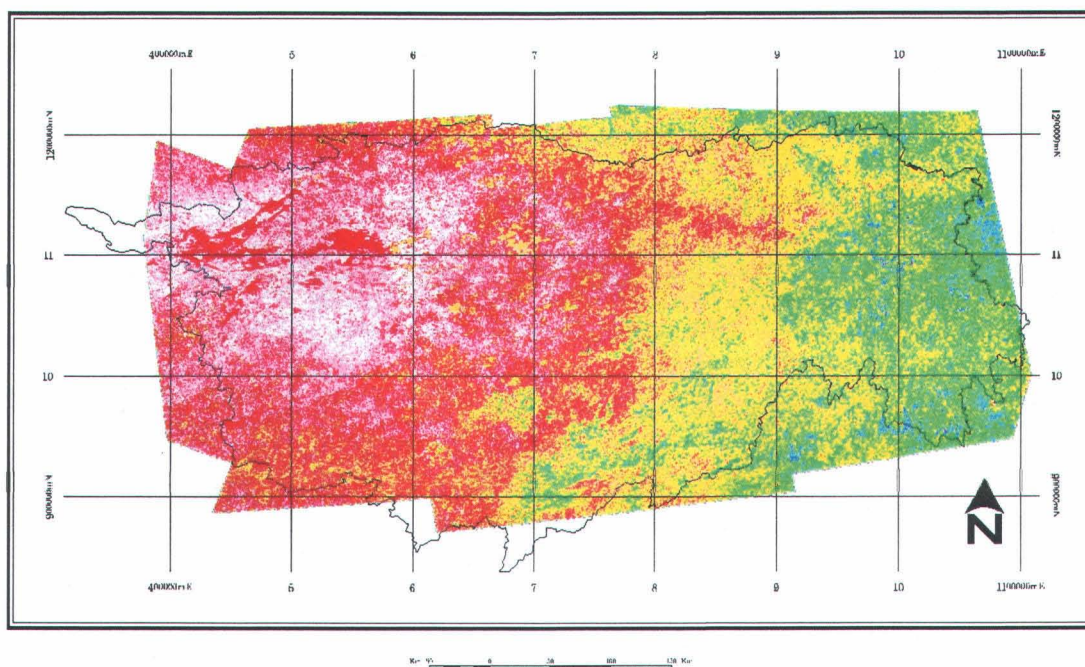


Figure 15 : Exemple d'une carte où les plans d'eau sont de couleurs différentes

## 6. Conclusion et recommandations

---

### 6.1 Bilan de la phase de validation en mode opérationnel

L'année 2002 complète un cycle de validation à moyen terme de l'approche EQeau en mode opérationnel. Nous avons démontré au cours des quatre dernières années que l'intégration de cette technologie dans les activités courantes d'Hydro-Québec était faisable, en autant que les résultats soient valables.

Pour des raisons diverses et souvent imprévisibles, nous ne sommes toutefois pas parvenus à réduire l'incertitude (RMSE: 25 mm) sur les équivalents en eau estimés par *EQeau*. Le premier facteur à considérer pour expliquer cet état de fait, est le changement fréquent du mode d'image utilisé. Les premières applications du logiciel (1996-1998) furent réalisées avec le mode Standard (100 km X 100 km, 30m de résolution). Pour tenter de couvrir un sous-bassin complet en mode pré-opérationnel et ainsi comparer nos résultats à ceux d'Hydro-Québec, nous avons en 1999, utilisé le mode Wide (150 km X 150 km, 30m de résolution). Pour tenter de couvrir le maximum du bassin de la Grande rivière, nous avons aussi expérimenté en 1999 et 2000, le mode ScanSAR Wide (500 km X 500 km, 4 faisceaux, 100m de résolution,) qui venait tout juste d'être étalonné par le fournisseur. Par contre, entre 1999 et 2000, le fournisseur a modifié ses paramètres de traitement du signal (*payload file*), rendant incomparables ces deux années. Nous nous sommes alors tournés vers le mode ScanSAR Narrow (350 km X 350 km, 2 faisceaux, 50m de résolution) en 2001 et 2002, pour réaliser qu'une fois de plus, le *payload file* avait été modifié. Toutefois, cette modification a amélioré la qualité des données. Au fil des années, nous avons tenté de toujours conserver les mêmes orbites pour l'acquisition des images, il a aussi fallu composer avec l'annulation de certaines acquisitions et l'utilisation d'orbites décalées. Tous ces changements ont été faits par nécessité. Mais, ils ont pour conséquence de ne pas avoir permis de tester la méthode

adéquatement, en gardant des paramètres stables (mode, couverture, résolution, orbites) sur une longue période.

Toujours au niveau de ces changements, la couverture d'un territoire toujours plus grand a aussi des conséquences. Un territoire plus hétérogène au niveau des conditions environnementales signifie une série de nouveaux défis, comme celui de la variabilité des densités de neige sur le bassin, de la présence de sols gelés et de sols dégelés pour une même date et de la possibilité de pluie, de neige humide et de neige sèche sur une série de trois images rapprochées. On doit donc maintenant composer avec ces nouvelles problématiques.

Autre conséquence des fréquentes modifications de modes auquel vient s'ajouter les aléas climatiques, il n'a pas été possible de raffiner l'algorithme d'EQeau tel que souhaité, puisque le signal enregistré n'étant pas toujours comparable d'une année à l'autre. Ainsi, les données des campagnes de terrain des hivers 2000 et 2002 n'ont pas pu être prises en compte vu l'impossibilité d'utiliser les images ScanSAR Wide (surestimation) et ScanSAR Narrow (sol dégelé) correspondantes. Nous avons donc été limité aux données des campagnes de terrain de 1997, 1998, 1999 et 2001.

Du point de vue de l'efficacité de la méthode et de l'obtention d'équivalents en eau comparables aux mesures au sol, certains succès ont tout de même été enregistrés, particulièrement sur les valeurs moyennes par sous-bassins, en 1999 et en 2001. C'est au niveau local que la nature hétérogène de l'image radar (*speckle*) cause encore des difficultés et c'est pourquoi nous comptons modifier la chaîne de prétraitement des images radar à l'avenir.

Nous n'avons donc que peu de certitudes face à trois questions qu'une validation à moyen terme aurait dû permettre de répondre, mais nous avons certaines pistes :

- 1) L'instrument de mesure (RADARSAT) est-il suffisamment sensible pour suivre le phénomène par la méthode indirecte de la température du sol? Il semble que les images Standard et ScanSAR Narrow avec un RMSE de moins de 25 mm sur l'estimé des équivalents en eau pourraient donner une meilleure performance si on améliorait les méthodes de pré-traitements des images (filtres, rééchantillonnages, calcul en puissance).

- 2) L'instrument de mesure (RADARSAT) est-il suffisamment stable pour assurer un suivi spatial (multi-faisceaux, angles d'incidence) et temporel (*payload file*, annulation d'images) adéquat? L'expérience a montré que les images ScanSAR Narrow (deux faisceaux) traitées avec le plus récent *payload file* offrent généralement une stabilité radiométrique suffisante et se montrent moins dépendantes de l'angle d'incidence. Toutefois, certaines images ont des écarts imprévisibles du point de vue radiométrique comme celle du 12 mars 2002.
- 3) La méthode est-elle applicable sur un si grand territoire, avec ses problématiques de gel du sol, de conditions météo variables et de densités de la neige variables? L'étape de validation a montré les limites d'applicabilité de l'approche de spatialisation des densités utilisées jusqu'en 2002 (sous-bassins, occupations du sol). Pour l'avenir, les densités devront être spatialisées en tenant compte de leur variation en fonction de la latitude et de l'altitude.

À travers tous les efforts investis et les obstacles rencontrés nous (VIASAT, INRS, HQ) avons pu développer un logiciel performant et très fonctionnel. En quatre ans, *EQeau* est passé de la plate-forme MapInfo<sup>TM</sup> à la plate-forme MapX<sup>TM</sup>, a été constamment réévalué et s'est vu ajouter de nouvelles fonctions d'intégration des équivalents en eau par altitudes et par occupation du sol. Le logiciel *EQeau* en est maintenant à sa version 4.0 et offre beaucoup de flexibilité quant à son utilisation.

## 6.2 Recommandations

Afin que l'approche *EQeau* puisse à nouveau être utilisée à des fins opérationnelles sur le bassin de la Grande rivière, nous recommandons de mettre au point de nouvelles approches pour remédier aux problèmes rencontrés depuis 4 ans et ce, dans un cadre de R&D.

- Tout d'abord, afin de conserver une certaine constance des paramètres, nous recommandons de poursuivre l'utilisation d'images en mode ScanSAR Narrow. Toutefois, comme RADARSAT-1 est en orbite depuis sept ans déjà et que sa durée de vie prévue était de cinq ans, nous recommandons d'examiner la possibilité d'utiliser les images du capteur ASAR



d'ENVISAT (ESA) comme source alternative de données avant la disponibilité des images RADARSAT-2;

- Les trois images ScanSAR Narrow des 17, 20 et 23 novembre 2000 représente la meilleure combinaison disponible et peuvent être utilisées comme images de référence pour l'hiver 2003 et 2004. Il faudra s'assurer que le « *payload file* » qui sera employé à l'hiver 2003 et 2004 demeure celui du « *payload 2002* » ou bien de faire retraiter les images de référence.
- Afin de mieux déterminer la période optimale pour le gel uniforme du sol sur l'ensemble du bassin et d'évaluer ainsi un scénario alternatif pour les images de référence, nous recommandons d'acquérir des images en décembre et de les analyser en tenant compte de la neige déjà au sol;
- Afin d'améliorer l'estimation des équivalents en eau au niveau local (réduire l'incertitude sur le rapport de rétrodiffusion), nous recommandons d'évaluer de nouvelles méthodes de filtrage et de ré-échantillonnage des images pour réduire l'effet de chatoiement et l'erreur de positionnement;
- Afin d'améliorer la performance actuel de l'algorithme d'EQeau (coefficient de détermination de 0,51) et d'arriver à des niveaux acceptables pour les utilisateurs, il faudra réduire les incertitudes sur la valeur de la densité de la neige. Pour se faire, les densités mesurées devront être spatialisées en tenant compte de leur variation en fonction de la latitude et de l'altitude.

Finalement, nous recommandons d'apporter des modifications au logiciel *EQeau*, soit, tenir compte d'une nouvelle répartition des densités par latitudes, altitudes et occupations du sol; associer une valeur uniforme aux plans d'eau; tenir compte du maximum de neige détectable CR est  $7.5 \text{ }^\circ\text{Cm}^2/\text{J}$ .



## Références

---

BERNIER, M. Y. GAUTHIER, P.BRIAN, J. COULOMBE-SIMONEAU, J.HURLEY, F. WEBER (2002). Radiometric correction of RADARSAT-1 images for mapping the SWE in mountainous environment. Proceedings of IGARSS'2002 (CD), Toronto, Canada 24-29 June.

BERNIER, M. et Y. GAUTHIER (2001). Implantation d'EQeau sur l'ensemble du bassin de la rivière La Grande. Rapport de recherche No. 609-e1, INRS-Eau, 29 pages, décembre 2001.

BOURGEAU-CHAVEZ, L.L., HARRELL, P.A., KASISCHKE, E.S. and H.F. FRENCH (1997). The detection and mapping of Alaskan wildfires using spaceborne imaging radar system. Int. J. Remote Sensing, Vol. 18, no. 2, 355-373.

RANSON, K.J., KOVACS, K., SUN, G. and V.I. KHARUK (2001). Fire scar detection using JERS, ERS and RADARSAT data in the Boguchany area, Eastern Siberia. CEOS-SAR01-073. CEOS WGCV-SAR WORKSHOP 2001, 2-5 April 2001, NASDA / EORC, Tokyo, Japan.



**ANNEXE 1**



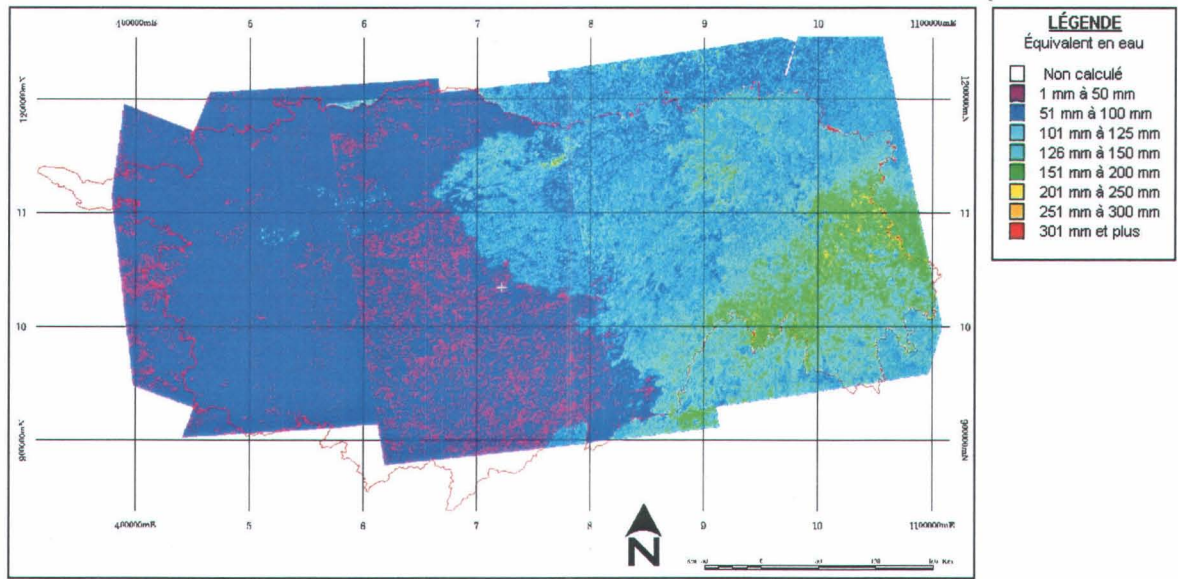


Figure 16 : Carte des équivalents en eau du 4, 7 et 10 janvier 2001 avec densités faibles à l'ouest

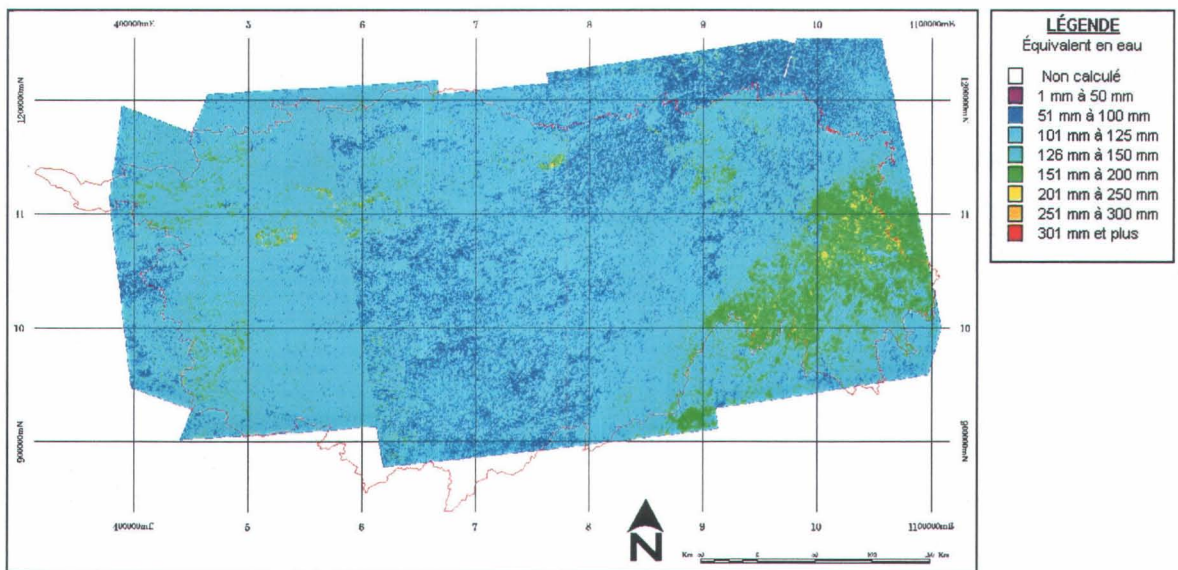


Figure 17 : Reprise de la carte des équivalents en eau du 4, 7, 10 janvier 2001 en utilisant des densités plus homogènes