

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

Rapport de recherche No R-618-e2 30 novembre 2002

Validation à moyen terme de l'approche EQeau

Rapport final préparé pour

Pierre Ducharme

Hydro-Québec

Par

Monique Bernier

Yves Gauthier

**Institut national de la recherche scientifique, INRS-ETE
2800, rue Einstein, Case postale 7500, Sainte-Foy (Québec), G1V 4C7**

Rapport de recherche No 618-e2

30 novembre 2002

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	v
LISTE DES FIGURES	vii
1. INTRODUCTION ET OBJECTIFS	1
2. SOMMAIRE DES RÉSULTATS DE L'HIVER 2001-2002.....	3
2.1 DONNÉES ACQUISES	3
2.2 LES PARAMÈTRES D'ENTRÉE D' <i>EQEAU</i>	5
2.3 L'APPLICATION D' <i>EQEAU</i>	7
2.4 RECOMMANDATIONS SUITE À L'HIVER 2002	11
3. ACTIVITÉS RELIÉES AUX OBJECTIFS 5 ET 6.....	13
3.1 REPRÉSENTATION CARTOGRAPHIQUE.....	13
3.1.1 <i>Problème de la répartition des densités par bassin</i>	13
3.1.2 <i>Problème des plans d'eau</i>	18
3.2 FIABILITÉ DE L'ALGORITHME ET INCERTITUDE DES RÉSULTATS	19
3.2.1 <i>Quantité de neige maximale</i>	19
3.2.2 <i>Conditions environnementales particulières : le cas des brûlis</i>	20
4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	25
4.1 BILAN DE LA PHASE DE VALIDATION EN MODE OPÉRATIONNEL	25
4.2 RECOMMANDATIONS POUR 2003	27
RÉFÉRENCES.....	29

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Images RADARSAT SCANSAR Narrow (SCN) acquises pour la saison 2001-2002.....	3
Tableau 2 : Images RADARSAT SCANSAR Narrow (SCN) acquises pour la saison 2001-2002.....	4
Tableau 3 : Paramètres d'entrée sélectionnés pour l'application d'EQueau en 2002.....	5
Tableau 4 : Répartition des sites de mesures au sol par classes d'altitudes et par classes de latitudes	15
Tableau 5 : Calcul des densités (kg/m) par classes d'altitudes et de latitudes pour 2001.....	16
Tableau 6 : Pourcentage de densité par rapport à la classe la mieux représentée (2001)	17
Tableau 7 : Pourcentage de densité par rapport à la classe la mieux représentée (2002)	17
Tableau 8 : Conversion des résistances thermiques en équivalents en eau.....	19
Tableau 9 : Proportion de la superficie des brûlis par sous-bassin (%)	21

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Mosaïque des équivalents en eau estimés de janvier 2002.....	9
Figure 2 : Mosaïque des équivalents en eau estimés de mars 2002.....	9
Figure 3: Validation des équivalents en eau estimés à l'échelle du bassin, pour janvier et mars 2002.....	10
Figure 4 : Variation des équivalents en eau estimés et mesurés, aux sites d'échantillonnage, en fonction de l'altitude.	10
Figure 5 : Matrice des altitudes regroupées par classes (Bassin de la Grande rivière) et sites de relevés de neige d'Hydro-Québec	14
Figure 6 : Exemple d'une carte où les plans d'eau sont de couleurs différentes.	18
Figure 7 : Relation entre la densité et l'équivalent en eau sur les lignes de neige d'Hydro-Québec de 1999 à 2002	20
Figure 8 : Variation temporelle de la rétrodiffusion pour certaines occupations du sol	23

1. Introduction et objectifs

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 veulent 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. Tenter d'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. Il décrit par la suite les travaux

subséquents réalisés dans le cadre des objectifs 5 et 6. Les activités effectuées portent principalement sur la représentativité des cartes, la fiabilité de l'algorithme (objectif 5) et l'établissement de l'incertitude des résultats d'EQeau (objectif 6). Plus spécifiquement, nous avons :

- (1) évalué une nouvelle méthode de spatialisation des densités moyennes
- (2) déterminé 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) analysé les variations temporelles du signal des brûlis et évalué l'impact de cette classe sur les estimés d'équivalent en eau;

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 ³
18 au 27 janvier	Carottage	HQ	150 mm	209 kg/m ³
11 au 15 mars	Carottage et profils	INRS-HQ	250 mm	254 kg/m ³
16 au 23 mars	Carottage	HQ	200 mm	211 kg/m ³

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 °Cm²/J..

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

2.2 Les paramètres d'entrée d'E_{Qeau}

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'E_{Qeau} en 2002

Paramètre	Janvier	Mars
Densité moyenne du couvert de neige	240 kg/m ³	250 kg/m ³
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 :

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, la stabilité du signal et les modifications apportées au traitement des images par RSI imposent certains compromis. L'objectif initial du contrat actuel étant de réutiliser 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 et viable, bien que non optimale.

- L'algorithme « sol gelé » est choisi en raison des conditions observées en novembre 2000
- 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 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 sur les images dont l'orbite était légèrement décalée (30 janvier, 11 mars).

Comme pour les images d'automne, une analyse détaillée du signal de rétrodiffusion a été effectuée et les grandes lignes sont les suivantes :

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 Caniapiscaw 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'EQeau s'en trouvent affectées puisque les prémisses de base ne sont plus respectées sur l'ensemble du territoire.

2.3 L'application d'EQeau

L'équivalent en eau a été calculé à l'aide de la version 4.0 du logiciel EQeau (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 Caniapiscou (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 Caniapiscou. 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 Caniapiscou).
- 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.

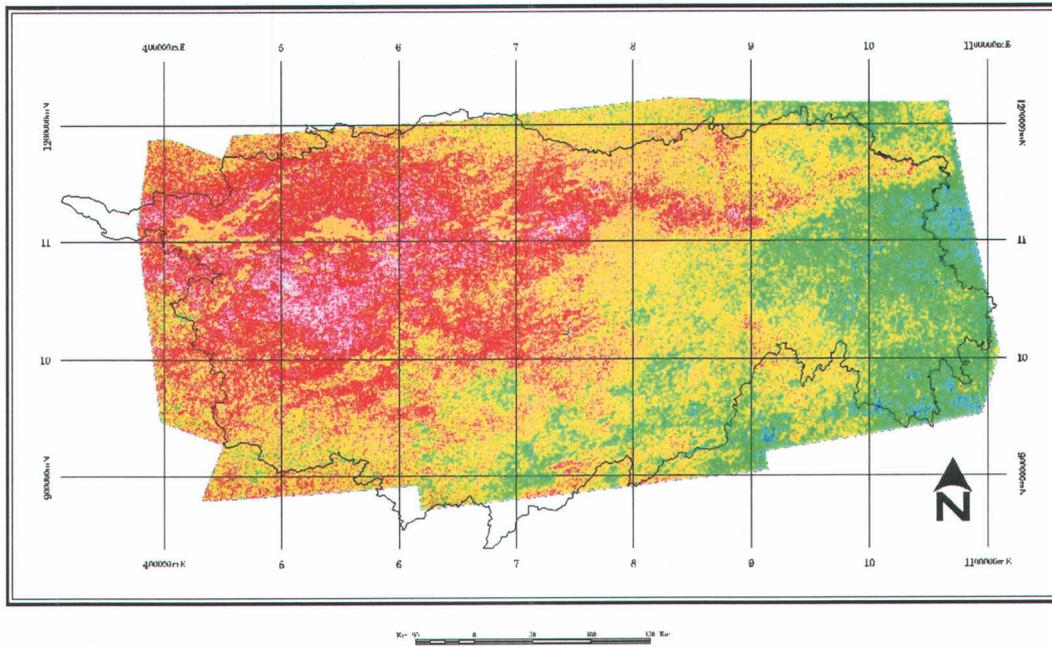


Figure 1 : Mosaïque des équivalents en eau estimés de janvier 2002

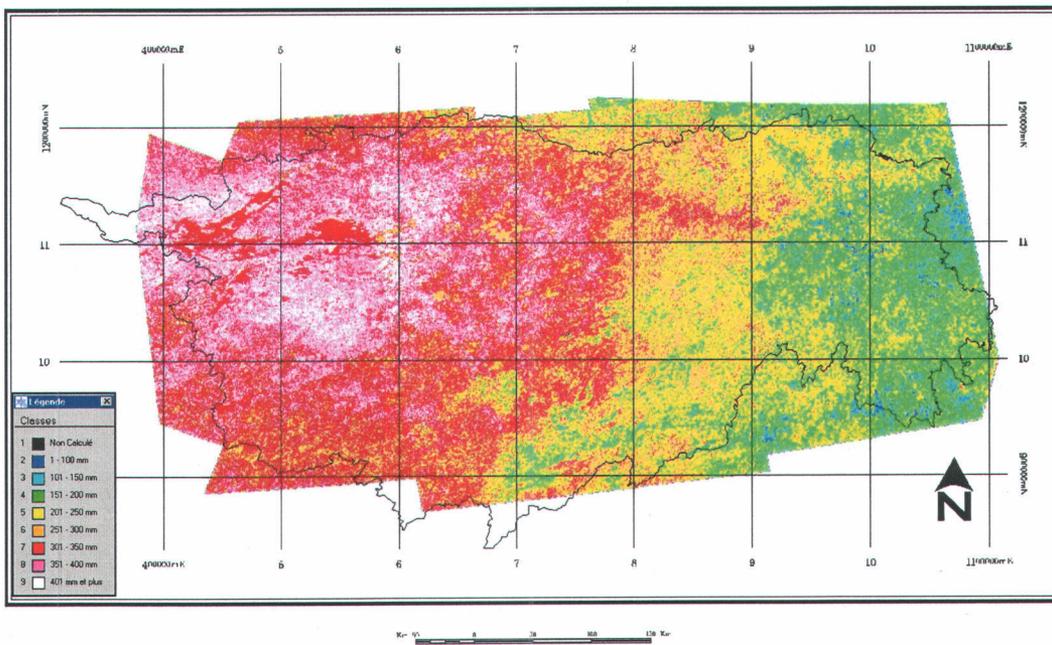


Figure 2 : Mosaïque des équivalents en eau estimés de mars 2002

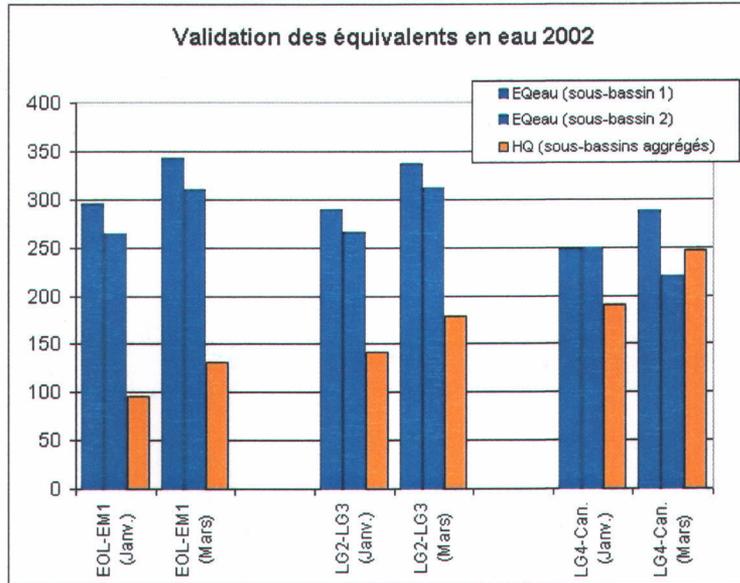


Figure 3: Validation des équivalents en eau estimés à l'échelle du bassin, pour janvier et mars 2002.

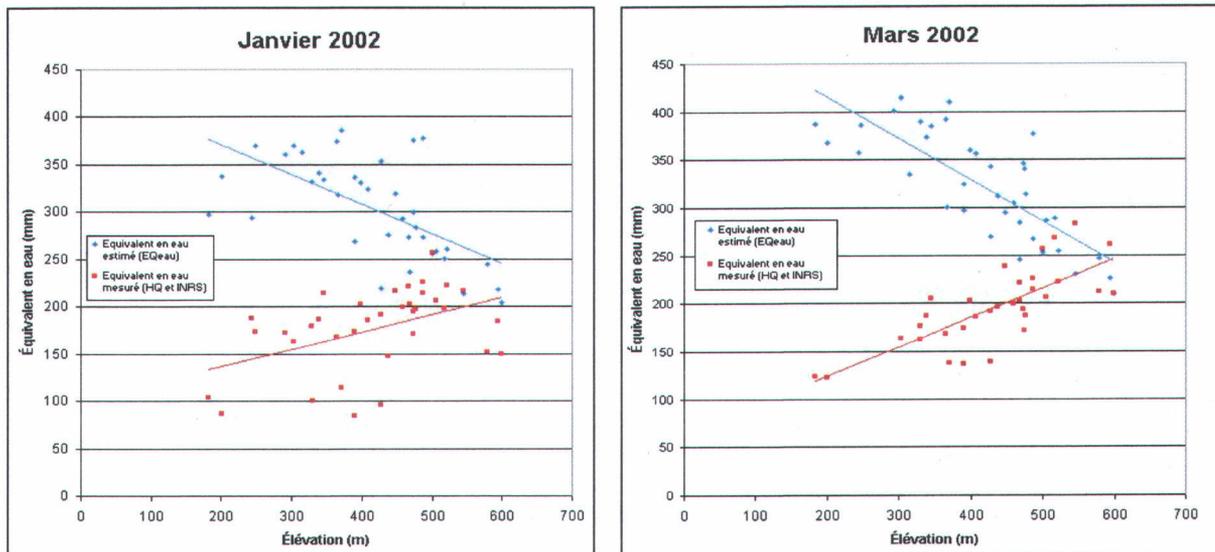


Figure 4 : Variation des équivalents en eau estimés et mesurés, aux sites d'échantillonnage, en fonction de l'altitude.

2.4 Recommandations suite à l'hiver 2002

- Les images ScanSAR Narrow, traitées avec le nouveau « payload file », sont radiométriquement stables dans la plupart des cas et se montrent moins dépendantes de l'angle d'incidence;
- 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. Toutefois, il est important de poursuivre la recherche d'une combinaison d'images où les conditions sont plus homogènes sur l'ensemble du bassin (sol gelé partout);
- Il faudra s'assurer que le « payload file » qui sera employé à l'hiver 2003 demeure celui du « payload 2002 »;
- Afin d'éviter l'achat d'images acquises par temps pluvieux, tel que l'image du 15 novembre 2001, ou bien par temps trop doux (neige humide) non utiles à des fins opérationnelles, nous recommandons de recourir dorénavant (en mode opérationnel) à l'option METEO lors de la commande des images RADARSAT. Cette option coûte 405\$ et consiste à programmer trois dates différentes, pour n'en retenir qu'une seule si désiré;
- Bien qu'il soit préférable d'utiliser des images ScanSAR Narrow provenant de la même orbite relative, il est aussi viable d'utiliser des images provenant d'orbites relatives légèrement différentes si les conditions environnementales (par exemple, des conditions de neige humide au sol lors de la journée d'acquisition prévue) des problèmes techniques ou des besoins opérationnels le justifient. De plus, étant donné le faible relief du bassin La Grande, la correction pour les angles d'incidence locaux n'est pas nécessaire pour un décalage de l'ordre de 4 ou 5 degrés. Lorsque le décalage d'orbite est plus significatif entre l'image à analyser et l'image de référence, le logiciel de correction pour les angles d'incidence locaux développé par VIASAT avec l'appui de l'Agence spatiale canadienne devrait être appliqué car il s'avère performant pour des pentes inférieures à 30 degrés;
- Étant donné l'importance de pouvoir obtenir des estimés fiables de la densité réelle de la neige tant pour l'application d'EQueau que pour les autres méthodes de prévisions de la

production hydroélectrique utilisées par HQ, nous recommandons la poursuite de divers projets de recherche en cours tels que le projet canado-européen SNOWPOWER, les survols gamma aéroportés, les images SSM/I et la station expérimentale de Radisson. Selon les résultats obtenus, ces différentes approches pourront être intégrées à l'approche EQeau afin d'améliorer la qualité des prévisions.

3. Activités reliées aux objectifs 5 et 6

À titre de rappel, les objectifs 5 et 6 sont les suivants :

5. Améliorer l'apparence de la représentation cartographique et la fiabilité de l'algorithme;
6. Tenter d'établir l'incertitude des résultats;

De façon plus logique, nous discuterons d'abord du point de la représentation cartographique et ensuite, du point de la fiabilité de l'algorithme et de l'incertitude des résultats.

3.1 Représentation cartographique

3.1.1 Problème de la répartition des densités par bassin

Tel qu'observé en 2001, un des problèmes 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.

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 pourrait exister. Toutefois, cette disparité ne serait pas nécessairement assujettie aux limites des bassins. 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.

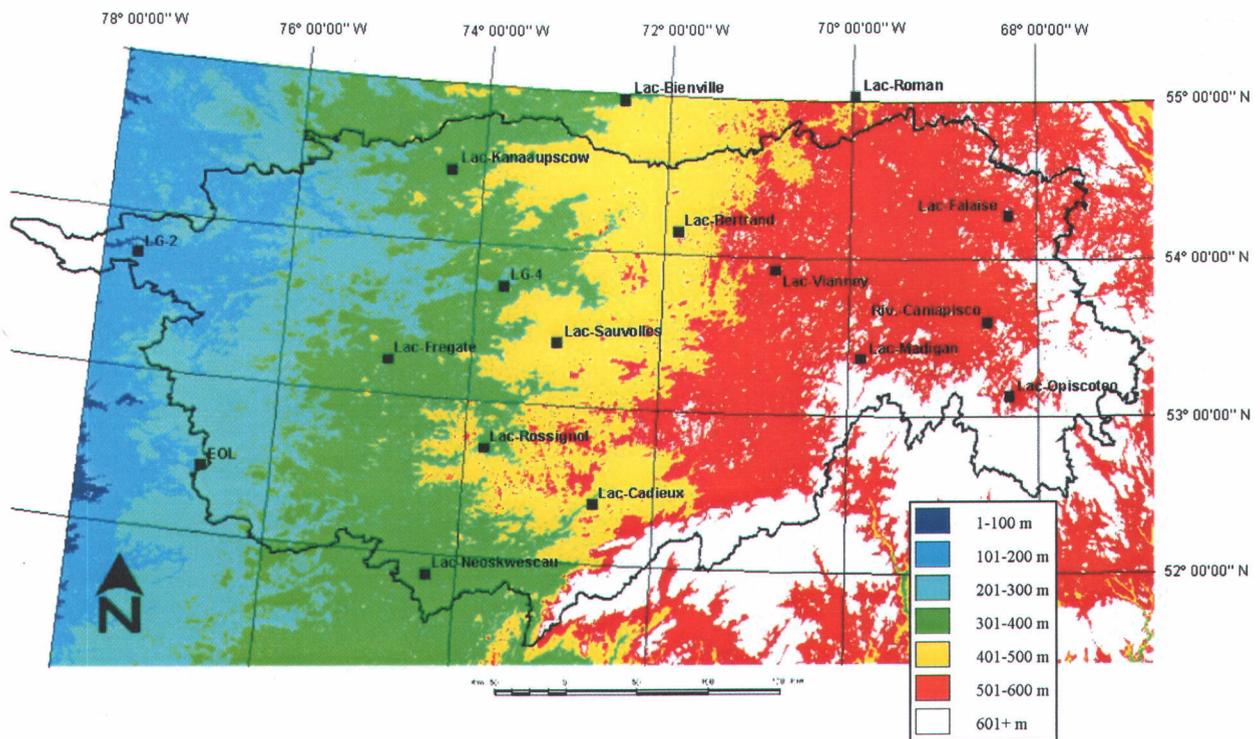


Figure 5 : Matrice des altitudes regroupées par classes (Bassin de la Grande rivière) et sites de relevés de neige d'Hydro-Québec

Selon cette figure (résumée au tableau 4), 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.

Tableau 4 : 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 5, 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 serait à son tour subdivisée en classes d'occupations du sol.

Tableau 5 : 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 6 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 6 : 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 faudrait 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 7.

Tableau 7 : 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

3.1.2 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.

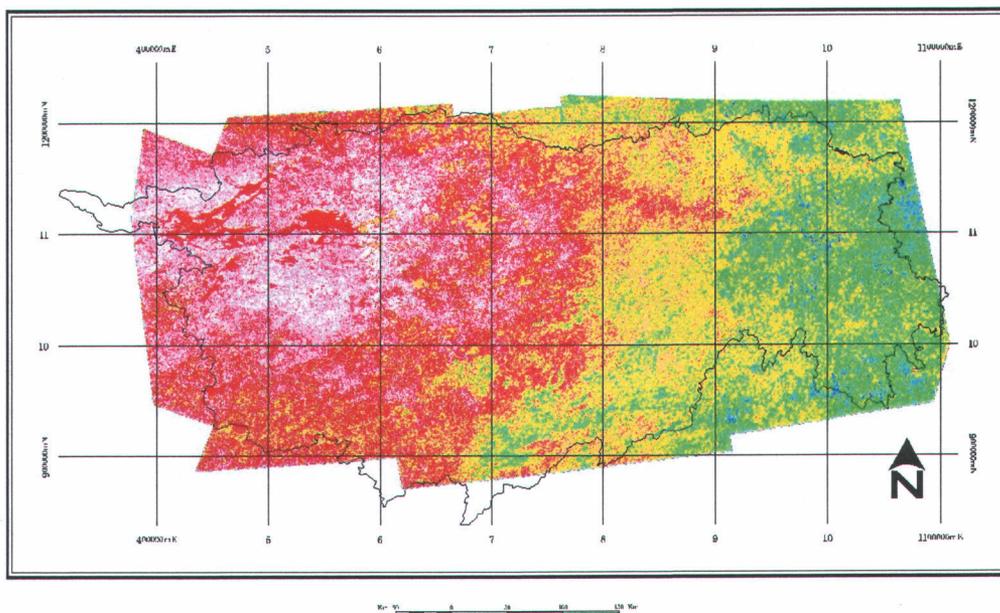


Figure 6 : Exemple d'une carte où les plans d'eau sont de couleurs différentes.

3.2 Fiabilité de l'algorithme et incertitude des résultats

Cet 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.

3.2.1 Quantité de neige maximale

L'algorithme d'*EQeau* est basé sur un réchauffement progressif du sol avec l'accumulation de neige. Il est probable qu'à un certain point où 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, dépendamment des conditions, à une résistance thermique de 7.0 à 7.5 °Cm²/J. Le tableau 6 donne les équivalences en fonction de la densité.

Tableau 8 : 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 ² /J	200 kg/m ³	190 mm	100-200 mm
7.5 °Cm ² /J	225 kg/m ³	261 mm	150-250 mm
7.5 °Cm ² /J	250 kg/m ³	349 mm	175-275 mm
7.5 °Cm ² /J	275 kg/m ³	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 (figure 8).

Ainsi, l'algorithme devrait pouvoir fonctionner dans les conditions normales retrouvées à la Baie James. Dans les cas plus extrêmes, le taux de confiance de l'algorithme sera plus faible. Depuis 1996, la résistance thermique calculée pour les profils est toujours restée en deçà de 8 °Cm²/J. Il

pourrait être intéressant de calculer à l'avenir, une résistance thermique approximative à partir des relevés d'Hydro-Québec, question de savoir si l'on demeure dans la zone d'applicabilité. Finalement, il ne faut pas perdre de vue que ces analyses posent l'hypothèse que les températures de l'air sont celles habituellement observées sur le bassin entre les mois de janvier et mars.

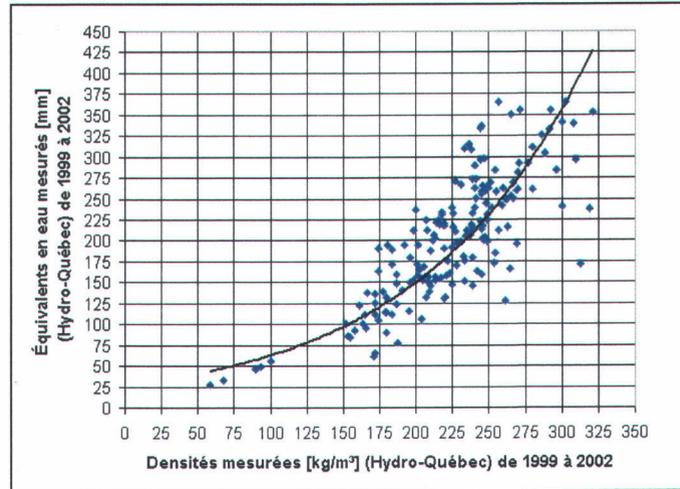


Figure 7 : Relation entre la densité et l'équivalent en eau sur les lignes de neige d'Hydro-Québec de 1999 à 2002

3.2.2 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 9 : Proportion de la superficie des brûlis par sous-bassin (%)

Sous-bassin	Proportion de brûlis
Caniapiscou	5%
Laforge	4%
LG1	23%
LG2	20%
LG3	14%
LG4	9%
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/m² (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 devrait y être applicable.

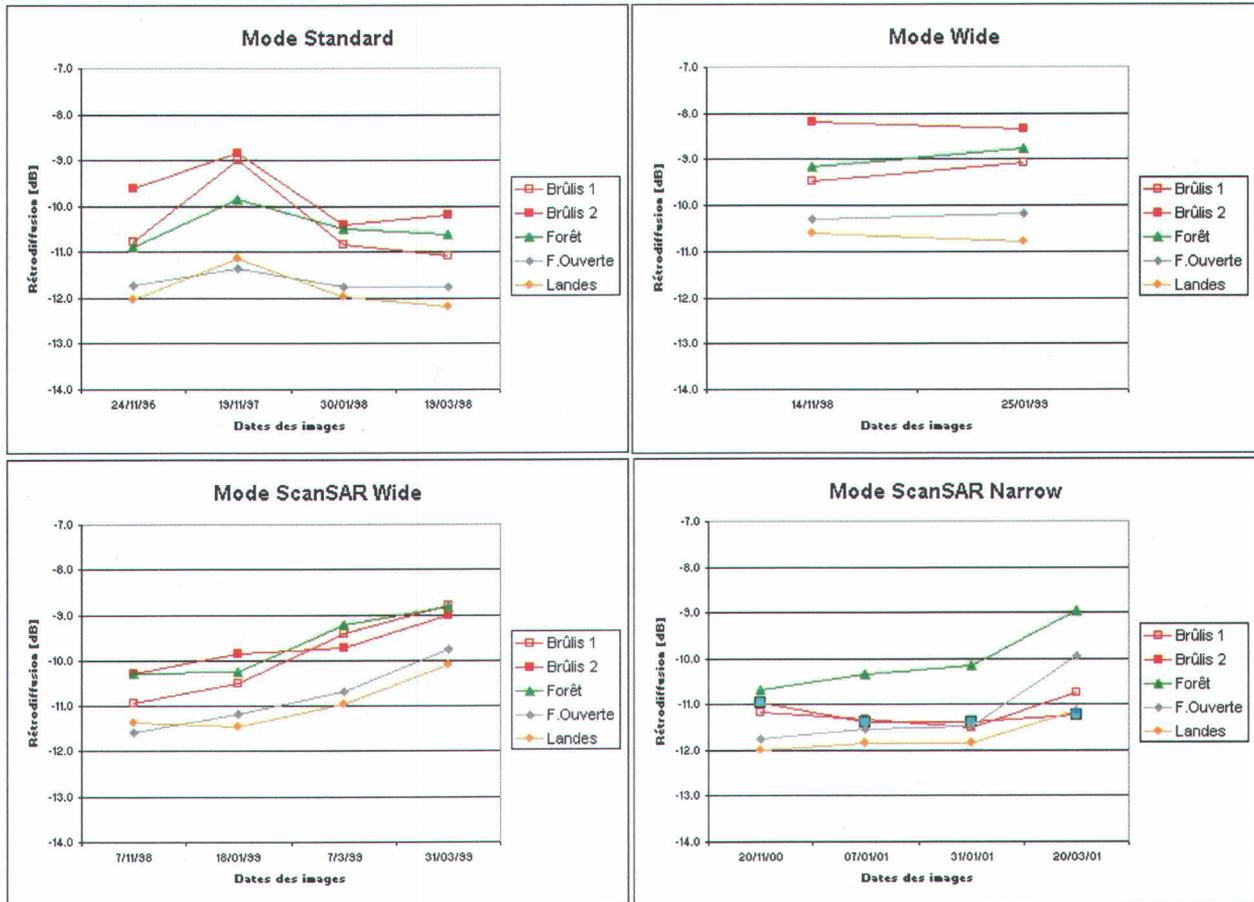


Figure 8 : Variation temporelle de la rétrodiffusion pour certaines occupations du sol

4. Conclusion et recommandations

4.1 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 la donnée soit valable.

Pour des raisons diverses et souvent imprévisibles, nous ne sommes toutefois pas parvenus à réduire l'incertitude 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, 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, 50m de résolution) en 2001 et 2002, pour réaliser qu'une fois de plus, le *payload file* avait été modifié. Et même si 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 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 grand et 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, il n'a pas été possible de raffiner l'algorithme d'EQeau tel que souhaité, puisque le signal radar n'étant pas toujours comparable d'une année à l'autre, peu de données pouvaient être utilisées à cette fin.

Nous n'avons donc encore que peu de certitudes face aux questions qu'une validation à moyen terme aurait dû permettre de répondre, soit :

- L'instrument de mesure (RADARSAT) est-il suffisamment sensible pour suivre le phénomène par la méthode indirecte de la température du sol?
- 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?
- 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?

Au 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.

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™ à la plate-forme MapX™, 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.

4.2 Recommandations pour 2003

Afin que l'approche *EQeau* puisse à nouveau être utilisée à des fins opérationnelles sur le bassin de la Grande rivière, nous recommandons pour 2003, de mettre au point de nouvelles approches pour remédier aux problèmes rencontrés depuis 4 ans et ce, dans un cadre R&D appuyé par Hydro-Québec.

- 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 tout de même la possibilité d'utiliser les images du capteur ASAR d'ENVISAT (ESA) comme source alternative de données avant la disponibilité des images RADARSAT-2;
- 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, 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, nous recommandons d'évaluer de nouvelles méthodes de filtrage et de ré-échantillonnage des images pour réduire l'effet de chatoiment et l'erreur de positionnement;
- Afin d'obtenir des densités plus représentatives à la grandeur du bassin, nous proposons de développer deux nouvelles approches :
 1. Modélisation de la densité de la neige au sol à partir des données météorologiques afin d'utiliser ces valeurs de densité simulées dans l'algorithme;
 2. Intégration des équivalents en eau estimés des images SSM/I (micro-ondes passives) pour dériver les valeurs de densité;

- Finalement, nous recommandons d'apporter les modifications nécessaires au logiciel *EQeau*, pour :
 1. tenir compte d'une nouvelle répartition des densités par latitudes, altitudes et occupation du sol;
 2. associer une valeur uniforme aux plans d'eau;
 3. intégrer l'algorithme exponentiel qui tient mieux compte du maximum de neige applicable;

Références

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