

Record Number: 22990
Author, Monographic: Bernier, M
Author Role:
Title, Monographic: EQeau : implantation d'EQeau sur l'ensemble du bassin de la rivière La Grande
Translated Title:
Reprint Status:
Edition:
Author, Subsidiary:
Author Role:
Place of Publication: Québec
Publisher Name: INRS-Eau
Date of Publication: 2000
Original Publication Date: 30 juin 2001
Volume Identification:
Extent of Work: x, 58
Packaging Method: pages incluant 4 annexes
Series Editor:
Series Editor Role:
Series Title: INRS-Eau, rapport de recherche
Series Volume ID: 568 e3
Location/URL:
ISBN: 2-89146-450-8
Notes: Rapport annuel 2000-2001
Abstract: 10.00\$
Call Number: R000568 e3
Keywords: rapport/ ok / dl

***Implantation d'EQeau sur l'ensemble du
bassin de la rivière La Grande***

Rapport de recherche No 568-e3

30 juin 2001

**Implantation d'EQuau sur l'ensemble du bassin
de la rivière La Grande**

**Rapport d'étape préparé pour
Prévisions et Ressources Hydriques,
Hydro-Québec**

Par

Monique Bernier

Yves Gauthier

Marc Philippin

Avec la collaboration de

Marie-Claude Bouchard (Hydro-Québec)

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

Rapport d'étape No 568-e3

30 juin 2001

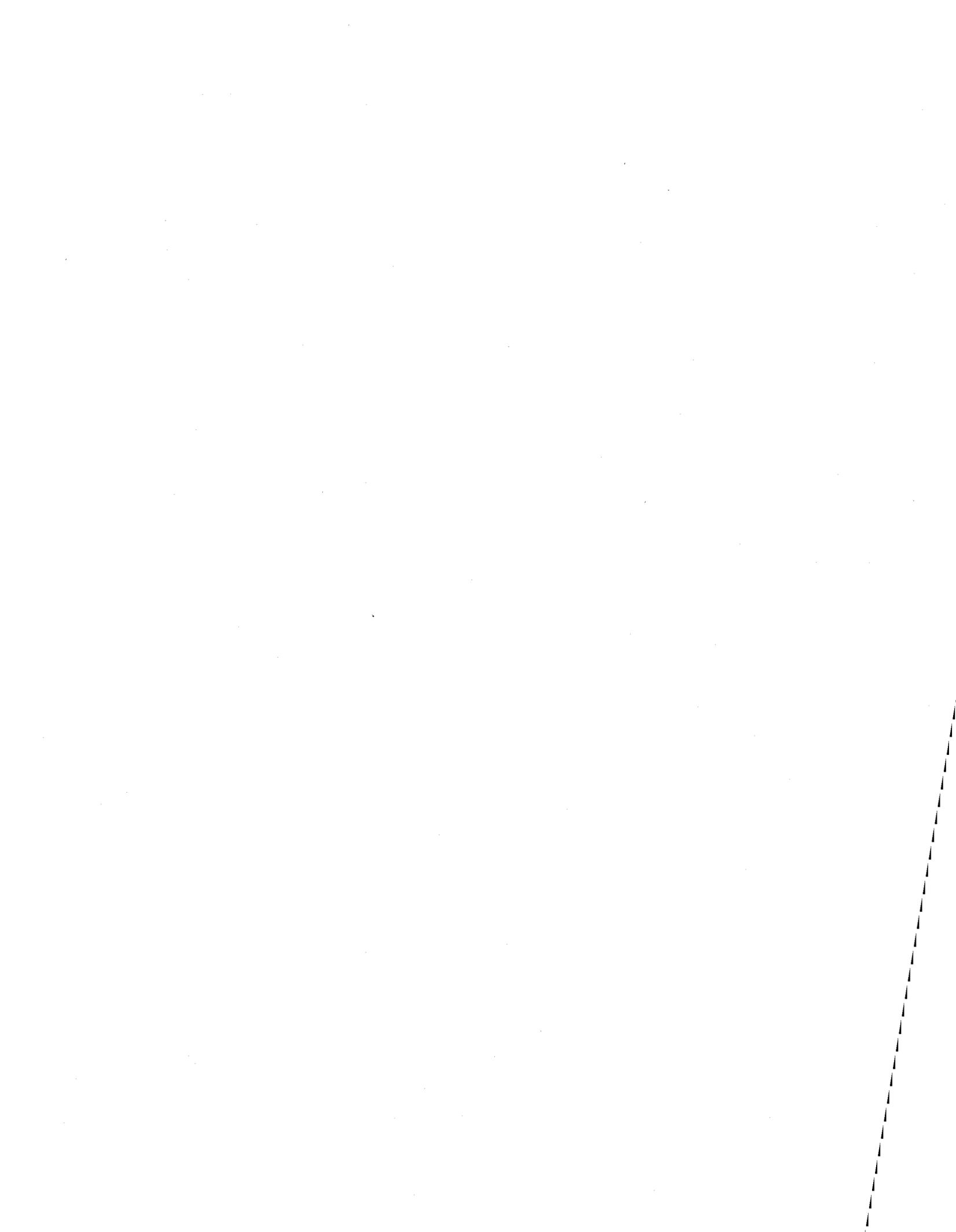
TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	iii
LISTE DES TABLEAUX	v
LISTE DES FIGURES	vii
SOMMAIRE	ix
1 INTRODUCTION ET OBJECTIFS	1
2 DONNEES DE L'HIVER 2000-2001	5
3 ANALYSE DES RESULTATS DE L'HIVER 2000-2001	7
3.1 Application d'EQueau aux sites d'échantillonnages	7
3.1.1 Choix de l'image de référence	7
3.1.2 Choix de l'algorithme	13
3.1.3 Choix de la densité	16
3.1.4 Comparaison des équivalents en eau	16
3.2 Application d'EQueau à l'image entière	24
4 RESULTATS DE L'APPLICATION D'EQUEAU EN MODE OPERATIONNEL	27
4.1 Début janvier	27
4.2 Début février	28
4.3 Mi-mars	28
4.4 Bilan	28
5 VALIDATION A PARTIR DES IMAGES WIDE	31
5.1 Comparaison des modes	31
5.2 Comparaison de la rétrodiffusion	32
5.3 Application d'EQueau aux sites d'échantillonnages	34
5.4 Application d'EQueau aux images en mode Wide	37
6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	45
6.1 Conclusion	45

6.2	Recommandations pour la saison 2001-2002	47
6.2.1	Recommandations pour le volet opérationnel d'EQueau (Hydro-Québec)	47
6.2.2	Recommandations pour le volet recherche d'EQueau (INRS-Eau)	47
RÉFÉRENCES		49
<i>Annexe 1 : Mosaique des équivalents en eau du début janvier</i>		<i>51</i>
<i>Annexe 2 : Mosaique des équivalents en eau du début février</i>		<i>53</i>
<i>Annexe 3 : Mosaique des équivalents en eau de la mi-mars</i>		<i>55</i>
<i>Annexe 4 : Types d'images acquises depuis 1994</i>		<i>57</i>

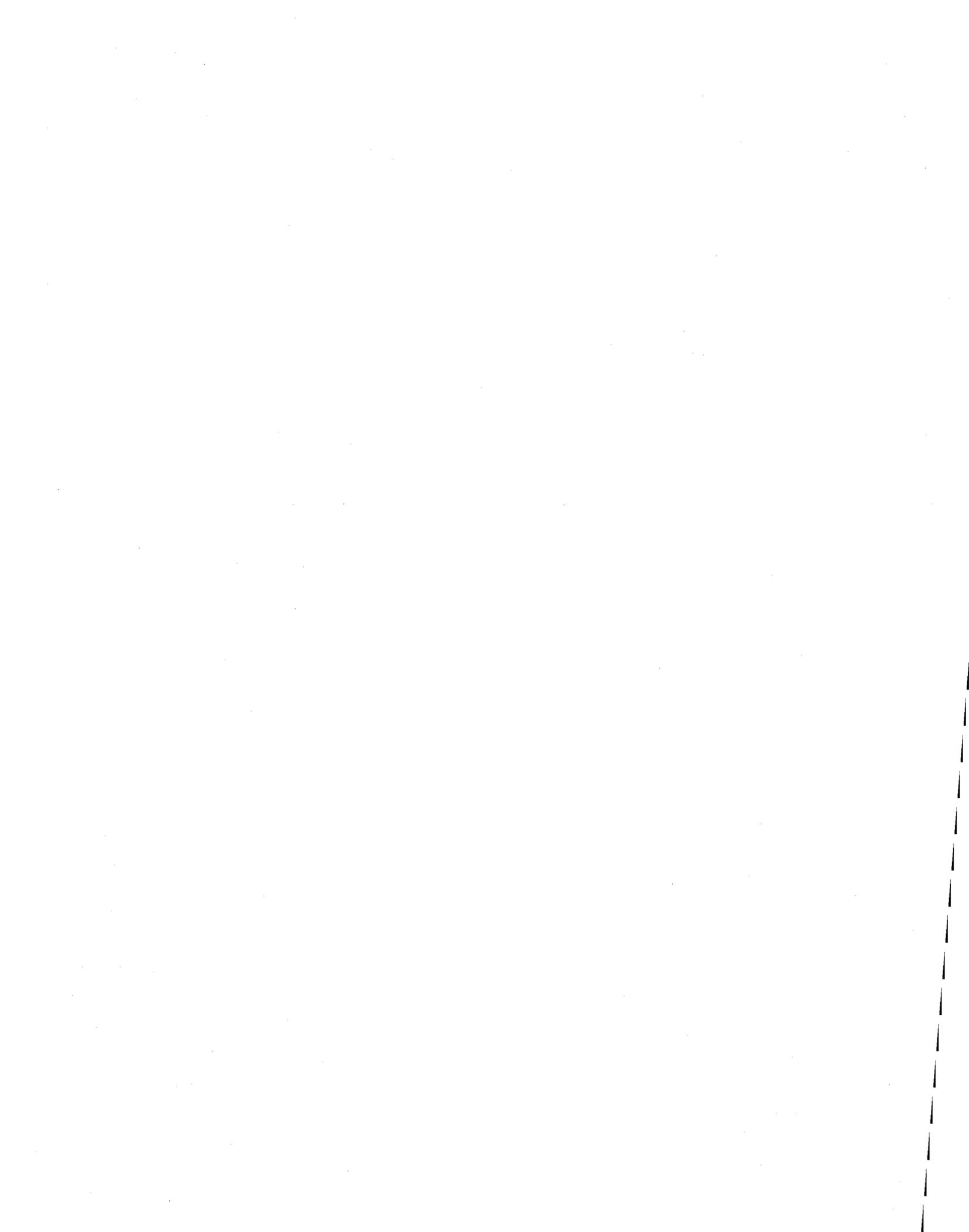
LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Sommaire des données acquises à l'hiver 2000-2001</i>	<u>6</u>
<i>Tableau 2 : Caractéristiques du mode ScanSAR Narrow et du mode Wide</i>	<u>31</u>



LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1 : Localisation des trois orbites ScanSAR Narrow sur le bassin de la rivière La Grande.</i>	6
<i>Figure 2 : Variation de la rétrodiffusion sur une image d'automne en fonction de l'angle d'incidence</i>	8
<i>Figure 3 : Changement de rétrodiffusion dû au changement de faisceau d'une image ScanSAR Narrow.</i>	9
<i>Figure 4 : Variation de la rétrodiffusion des images d'automne en fonction de l'angle d'incidence</i>	11
<i>Figure 5 : Relation mise à jour entre le rapport de rétrodiffusion et la résistance thermique</i>	14
<i>Figure 6 : a) Comparaison des densités mesurées lors du profil et des densités mesurées sur la ligne de neige adjacente b) Comparaison des résistances thermiques mesurées lors du profil et des résistances thermiques estimées à partir de la ligne de neige adjacente.</i>	15
<i>Figure 7 : Comparaison des équivalents estimés et mesurés aux sites d'échantillonnages</i>	17
<i>Figure 8 : Variation de la rétrodiffusion moyenne des images d'hiver en fonction de l'angle d'incidence</i>	19
<i>Figure 9 : Valeurs moyennes du couvert de neige au cours de l'hiver, telle que relevée par différentes sources</i>	21
<i>Figure 10 : Variation temporelle de la rétrodiffusion a) selon l'occupation du sol, b) et c) aux sites d'échantillonnages</i>	23
<i>Figure 11 : Comparaison des équivalents en eau estimés selon deux densités différentes</i>	25
<i>Figure 12 : Comparaison entre les moyennes aux sous-bassins obtenues par EQeau et par Hydro-Québec. Note: 1 seul point de comparaison apparaît pour la période du début février en raison de l'absence de relevés de neige d'HQ. Ce point compare les résultats obtenus par EQeau et ceux de l'INRS-Eau dans le secteur LG-4, Brisay.</i>	27
<i>Figure 13 : Couverture de l'image Wide par rapport à l'image ScanSAR Narrow</i>	32
<i>Figure 14 : Comparaison des modes Wide (W1) et ScanSAR Narrow (SCN) à l'automne</i>	33
<i>Figure 15 : Comparaison des modes Wide (W1) et ScanSAR Narrow (SCN) en milieu d'hiver</i>	33
<i>Figure 16 : Comparaison des équivalents en eau <u>estimés</u> et <u>mesurés</u> aux sites à partir du mode Wide et du mode ScanSAR Narrow</i>	35
<i>Figure 17 : Comparaison des équivalents en eau <u>estimés</u> aux sites à partir du mode Wide et du mode ScanSAR Narrow</i>	35
<i>Figure 18 : Cartes d'équivalents en eau du début janvier produites à partir des images des modes ScanSAR Narrow (gauche) et Wide1 (droite).</i>	37
<i>Figure 19 : Comparaison maille par maille des cartes d'équivalents en eau du début janvier produites à partir des images des modes ScanSAR Narrow et Wide1.</i>	39
<i>Figure 20 : Cartes d'équivalents en eau du début février produites à partir des images des modes ScanSAR Narrow et Wide1</i>	39
<i>Figure 21 : Comparaison maille par maille des cartes d'équivalents en eau du début février produites à partir des images des modes ScanSAR Narrow et Wide1.</i>	41
<i>Figure 22 : Cartes d'équivalents en eau produites à partir des images du mode ScanSAR Narrow (20 mars, à gauche) et Wide1 (3 mars, à droite)</i>	43



SOMMAIRE

L'approche *EQeau* a permis d'obtenir de bons résultats en phase de recherche (hiver 1998) et en phase pré-opérationnelle (hiver 1999) à partir d'images RADARSAT en mode Standard et Wide. Lors de l'utilisation en mode opérationnel à l'hiver 2000, l'approche *EQeau* n'a pas performé comme prévu, principalement à cause de la faible qualité radiométrique des images ScanSAR Wide (500 km x 500 km) utilisées pour couvrir l'ensemble du bassin de la Rivière La Grande. L'année 2001 marque donc le début d'une phase de validation de l'approche *EQeau* dans un contexte opérationnel, afin de mieux comprendre les limites d'application et d'en raffiner et si besoin modifier l'algorithme, pour le rendre à la fois plus sensible et plus robuste.

Une quinzaine d'images en mode ScanSAR Narrow (300 X 300 km) ont donc été achetées par Hydro-Québec. Ces images proviennent de trois orbites différentes afin de couvrir l'ensemble du bassin de la rivière La Grande. Deux séries ont été acquises à l'automne afin de sélectionner les meilleures images de référence possibles et trois séries durant les mois d'hiver. En plus des lignes de neige réalisées par Hydro-Québec, deux campagnes de terrain spécifiques ont été réalisées, l'une du 29 janvier au 2 février, l'autre du 19 au 22 mars 2001. Afin de valider la qualité radiométrique des images ScanSAR Narrow, des images en mode Wide 1 ont aussi été acquises à chacune de ces périodes par l'intermédiaire d'Environnement Canada et de l'Agence spatiale canadienne.

Depuis janvier, trois des cinq objectifs prévus pour l'année 2001 ont été réalisés et complétés. La série d'images ScanSAR Narrow de novembre 2000 a été choisie à titre d'images de référence (sol gelé, mois de 10 cm de neige). L'analyse de la variation temporelle du signal des images ScanSAR Narrow a montré que cette variation correspond bien aux conditions environnementales observées sur le terrain. De plus, tant en novembre qu'en hiver, les rétrodiffusions des images en mode Wide et ScanSAR Narrow sont comparables. Les cartes d'équivalents en eau produites par les deux modes se comparent également (± 10 mm), ce qui confirme la stabilité du système RADARSAT et plus particulièrement, la qualité radiométrique des images ScanSAR Narrow. Trois mosaïques d'équivalents en eau ont été produites et la répartition spatiale des équivalents en eau correspond généralement aux relevés ponctuels d'Hydro-Québec. De plus, les équivalents en

eau moyens estimés par EQeau pour les sous-bassins 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 sur le bassin de La Grande à l'hiver 2001, et de leur incertitude, le choix de densités représentatives pour l'étalonnage d'EQeau a été difficile, d'où la nécessité d'examiner les moyens d'obtenir des mesures de terrain plus fiables. Les valeurs de densités mesurées étant fort différentes d'un sous-bassin à l'autre, cela entraîne une segmentation des cartes par sous-bassins. Néanmoins, des solutions à ce problème sont envisagées pour l'an prochain (section 6.2).

La validation de l'algorithme avec les données de 2001 a été effectuée (objectif 4a). Les données de janvier 2001 suivent la tendance générale des années antérieures, mais l'ordonnée à l'origine est significativement plus basse, parce que les rapports de rétrodiffusion antérieurs provenaient d'images de référence où le sol n'était pas gelé. L'ordonnée à l'origine a d'ailleurs dû être modifiée lors de la période opérationnelle. D'ici la fin de l'année, nous examinerons attentivement les valeurs des paramètres d'EQeau pour l'ensemble des images acquises depuis 1997 (Annexe 4), afin de raffiner l'algorithme d'EQeau avant la prochaine saison hivernale (objectif 4b). De plus, nous testerons aussi la version MapX d'EQeau, et au besoin, y feront des modifications mineures, en collaboration avec VIASAT, afin que cette version soit conviviale, performante et opérationnelle pour la prochaine saison (objectif 5). Finalement, nous assisterons Hydro-Québec dans la planification des acquisitions de nouvelles images RADARSAT et la réalisation d'une campagne de terrain automnale. Les résultats de l'hiver 2001 seront aussi présentés au colloque *Remote Sensing in Hydrology* qui se tiendra à Montpellier, du 2 au 5 octobre 2001.

1 INTRODUCTION ET OBJECTIFS

Le but du projet « *EQeau* » est de permettre au *Service Prévisions et Ressources hydriques* d'Hydro-Québec d'utiliser de façon opérationnelle une méthode d'estimation de l'équivalent en eau de la neige à l'aide de l'imagerie RADARSAT.

Les trois objectifs généraux du projet *EQeau* sont:

- Démontrer l'exploitabilité des données de télédétection (RADARSAT et LANDSAT) pour l'estimation de l'équivalent en eau du couvert nival et l'efficacité du *prototype EQeau* en combinaison avec les méthodes actuelles de relevés sur le terrain.
- Par rapport aux méthodes actuelles d'estimation, évaluer l'accroissement de la précision (réduction de l'incertitude) de l'estimation de la quantité d'eau stockée sur le territoire, basée sur les données RADARSAT.
- Mettre en évidence les avantages économiques et stratégiques que procurent l'implantation d'une telle méthode (retour sur l'investissement) et sa commercialisation internationale.

L'approche *EQeau* a permis d'obtenir de bons résultats en phase de recherche (hivers 1997 et 1998) et en phase pré-opérationnelle (hiver 1999). À l'hiver 2000, la détermination de l'équivalent en eau du couvert nival de la région de La Grande à partir d'images RADARSAT-1 avait été marquée par plusieurs nouveautés. Premièrement, l'analyse des images RADARSAT par le logiciel *EQeau* avait été réalisée dans un contexte opérationnel. Deuxièmement, plusieurs images ScanSAR Wide (9) avaient été acquises au cours du même hiver ce qui nous avaient permis d'évaluer la stabilité du signal et la qualité radiométrique de ce type d'images. Troisièmement, le secteur à cartographier était quatre fois plus étendu que celui des années passées, donc plus diversifié du point de vue de l'occupation du sol (étendue des brûlis, densité des tourbières) et de la densité du couvert nival. Finalement, nous avons des données au sol que pour trois des sept images hivernales.

Toutefois, lors de cette utilisation en mode opérationnel à l'hiver 2000, l'approche *EQeau* n'a pas performé comme prévu, dû à la faible qualité radiométrique des images ScanSAR Wide utilisées pour cartographier l'ensemble du bassin de la Rivière La Grande. Tel que discuté, en détails, dans

le rapport d'étape du 30 juin 2000, les images ScanSAR Wide surestimaient l'équivalent en eau de la neige au sol. Deux causes expliquent ce biais systématique. D'une part, les conditions environnementales lors de l'acquisition des images de référence n'étaient pas optimales; le sol était encore dégelé et il y avait déjà une quarantaine de centimètres de neige au sol. D'autre part, des modifications avaient été apportées dans la production des images à la station de réception de Gatineau afin de réduire les artefacts entre les limites des quatre faisceaux des images ScanSAR Wide. Toutefois, ce processus avait changé la dynamique du signal ce qui nuisait à la performance de l'algorithme *EQeau* développé antérieurement à ce changement. Il devenait alors évident que les images ScanSAR Wide (quatre faisceaux) n'étaient plus appropriées pour *EQeau*. Nous recommandions alors l'utilisation du mode ScanSAR Narrow (deux faisceaux) pour l'hiver 2001. Celui-ci permet tout de même de couvrir une superficie de 300 km X 300 km en comparaison de 500 km X 500 km pour le mode ScanSAR Wide. Ce changement de mode, impliquait aussi que de nouvelles images de référence devaient être prises à l'automne 2000. De plus, afin de valider la qualité radiométrique des images ScanSAR, des images en mode Wide (1 faisceau) ont aussi été acquises. Voir l'annexe 4 pour un sommaire des types d'images utilisées depuis 1994.

L'année 2001 marque donc le début d'une phase de validation de l'approche dans un contexte opérationnel, afin de mieux comprendre les limites d'application et d'en raffiner et si besoin modifier l'algorithme, pour le rendre à la fois plus sensible et plus robuste. Il faut également s'assurer qu'*EQeau* tire le maximum des informations contenues dans les images RADARSAT-1.

Les cinq objectifs spécifiques pour l'année 2001 sont les suivants:

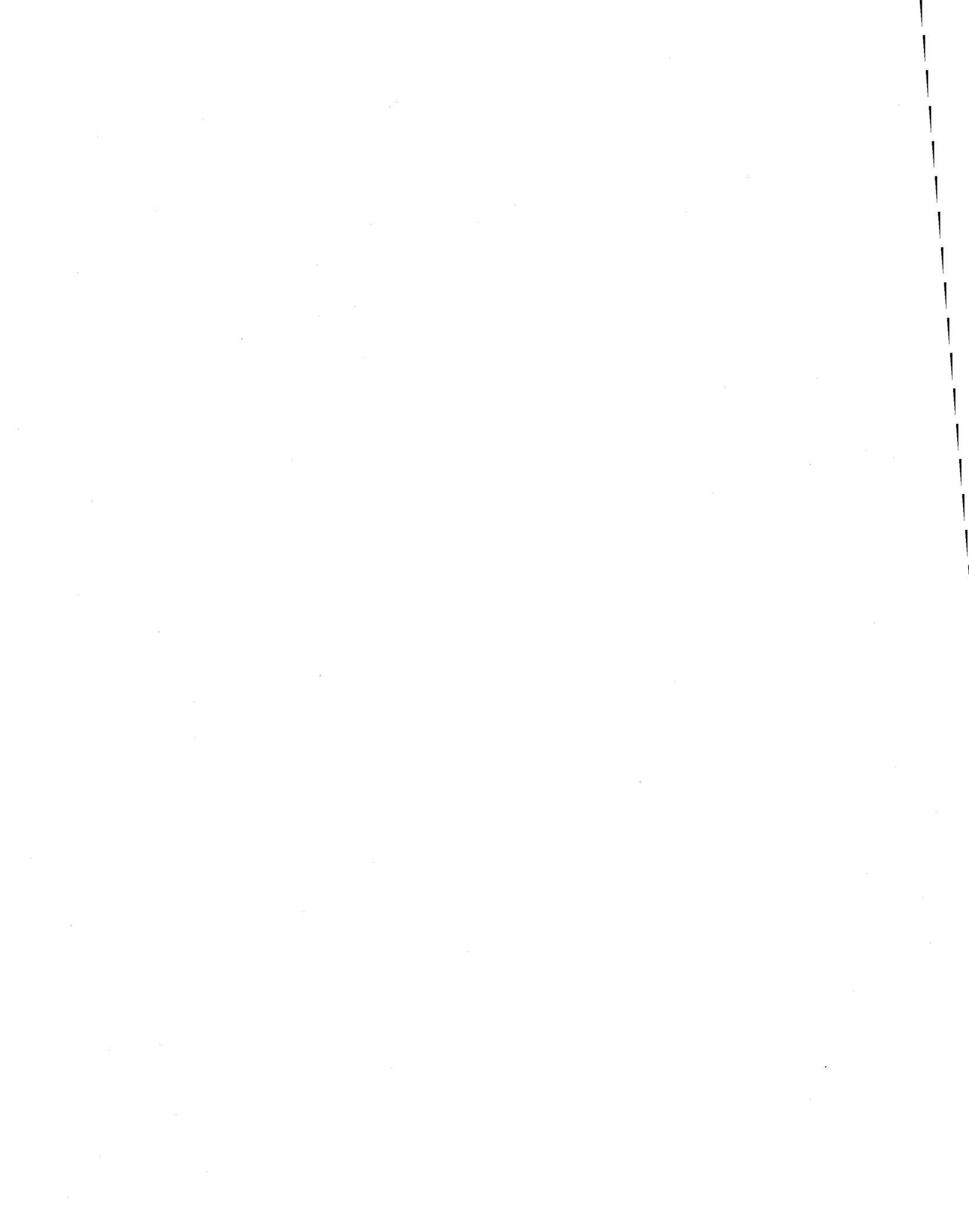
1. Analyser deux séries d'images d'automne (mode ScanSAR Narrow) et choisir la meilleure série d'images de référence.
2. Cartographier les équivalents en eau de la neige au sol sur l'ensemble du bassin de la Rivière La Grande à partir de trois séries d'images ScanSAR Narrow.
3. Valider la qualité radiométrique des images ScanSAR Narrow à l'aide d'images Wide.
4. (a) Valider et (b) raffiner l'algorithme d'*EQeau*
5. Valider la version MapX et effectuer des modifications mineures au logiciel *EQeau*.

Des images ScanSAR Narrow ont donc été acquises en octobre et en novembre 2000 afin de pouvoir choisir la meilleure période pour les images de référence. Ces images d'automne ainsi

que les images acquises durant les mois de janvier, février et mars 2001 ont été traitées par VIASAT d'après la procédure opérationnelle établie antérieurement. Dès la réception des images, VIASAT a effectué le traitement radiométrique et géométrique des images RADARSAT afin de produire les matrices d'entrée pour le logiciel *EQeau*. Ces images ont ensuite été transmises à Hydro-Québec et à l'INRS-Eau pour analyse par *EQeau* et production des cartes d'équivalents en eau. Les cartes et mosaïques ont été produites par Yves Gauthier (INRS-Eau) et Marie Claude Bouchard (Hydro-Québec). *Ces activités correspondent au volet opérationnel du projet.*

De plus, l'INRS-Eau a réalisée le volet *R&D* du projet, c'est-à-dire la cueillette et l'analyse de données de terrain, la validation de la qualité des images ScanSAR Narrow et de l'algorithme d'*EQeau*. Ce rapport d'étape décrit les principales activités réalisées depuis le début de l'année (objectifs 1, 2, 3, 4a) et constitue le principal livrable attendu au 30 juin 2001.

- Description des données acquises (chapitre 2)
- Analyse du signal d'automne, choix des images de référence, analyse du signal des images d'hiver, validation de l'algorithme d'*EQeau* à l'aide des données terrain (Objectif 1 et 4a, chapitre 3).
- Production des cartes d'équivalents en eau à l'aide du logiciel *EQeau* et des images ScanSAR Narrow, évaluation de la performance de l'algorithme et de la performance de la méthode dans un contexte opérationnel. (Objectif 2, chapitre 4).
- Analyse du signal des images Wide (W1), calcul des équivalents en eau, comparaison des résultats avec les images ScanSAR Narrow (chapitre 5).



2 DONNEES DE L'HIVER 2000-2001

Le scénario retenu pour l'hiver 2000-2001 implique l'utilisation d'images RADARSAT en mode ScanSAR Narrow (300 km X 300 km), afin d'éviter les problèmes rencontrés à l'hiver 1999-2000 avec le mode ScanSAR Wide (500km X 500km). En raison de leur nature particulière (composition de quatre faisceaux), il est plus difficile d'obtenir la stabilité radiométrique des images ScanSAR Wide et cela nuit à l'obtention d'une valeur physique précise (équivalent en eau de la neige). Pour la même raison (composition de quatre faisceaux), le fournisseur de données a modifié son traitement initial des images ScanSAR Wide afin d'en améliorer la qualité visuelle, ce qui est incompatible avec l'application quantitative visée ici. Dans le scénario 2000-2001, trois images ScanSAR Narrow (composition de deux faisceaux) sont nécessaires pour couvrir l'ensemble du bassin de La Grande et celles-ci sont acquises à l'intérieur de six jours (figure 1). De plus, pour des fins de validation, des images RADARSAT en mode Wide 1 et centrées sur le secteur de LG4 ont aussi été acquises grâce à la collaboration d'Environnement Canada (CRYSYS) et de l'Agence Spatiale Canadienne.

Trois périodes d'acquisitions hivernales ont été choisies pour le volet opérationnel, soit début janvier, début février et mi-mars, pour un total de neuf images ScanSAR Narrow. Pour l'image de référence sans neige, deux périodes d'acquisitions automnales ont été choisies, soit fin octobre et mi-novembre (total de six images). Ces deux séries automnales permettront de mieux identifier la période idéale pour l'image de référence. Donc au total, 15 images RADARSAT en mode ScanSAR Narrow ont été acquises pour la saison 2000-2001. Pour le mode Wide, chaque image est acquise sept jours après l'image ScanSAR Narrow de l'orbite centrale (5 images). Une sixième acquisition a été effectuée sur l'orbite de la fin février (Tableau 1).

Au tableau 1 sont aussi présentées les dates des campagnes de terrain de l'hiver 2001. Afin de calibrer l'algorithme d'EQueau et de valider les cartés résultantes, deux campagnes de terrain sur le secteur LG4-Brisay ont été planifiées en collaboration avec Hydro-Québec. La première eut lieu à la fin de janvier et l'autre à la mi-mars, ces deux périodes correspondant chacune à une série d'acquisition d'images. Nouveauté cette année, des relevés de neige d'Hydro-Québec ont été effectués simultanément à ces campagnes, afin de calibrer l'algorithme et de valider les résultats obtenus sur l'ensemble du bassin de La Grande.

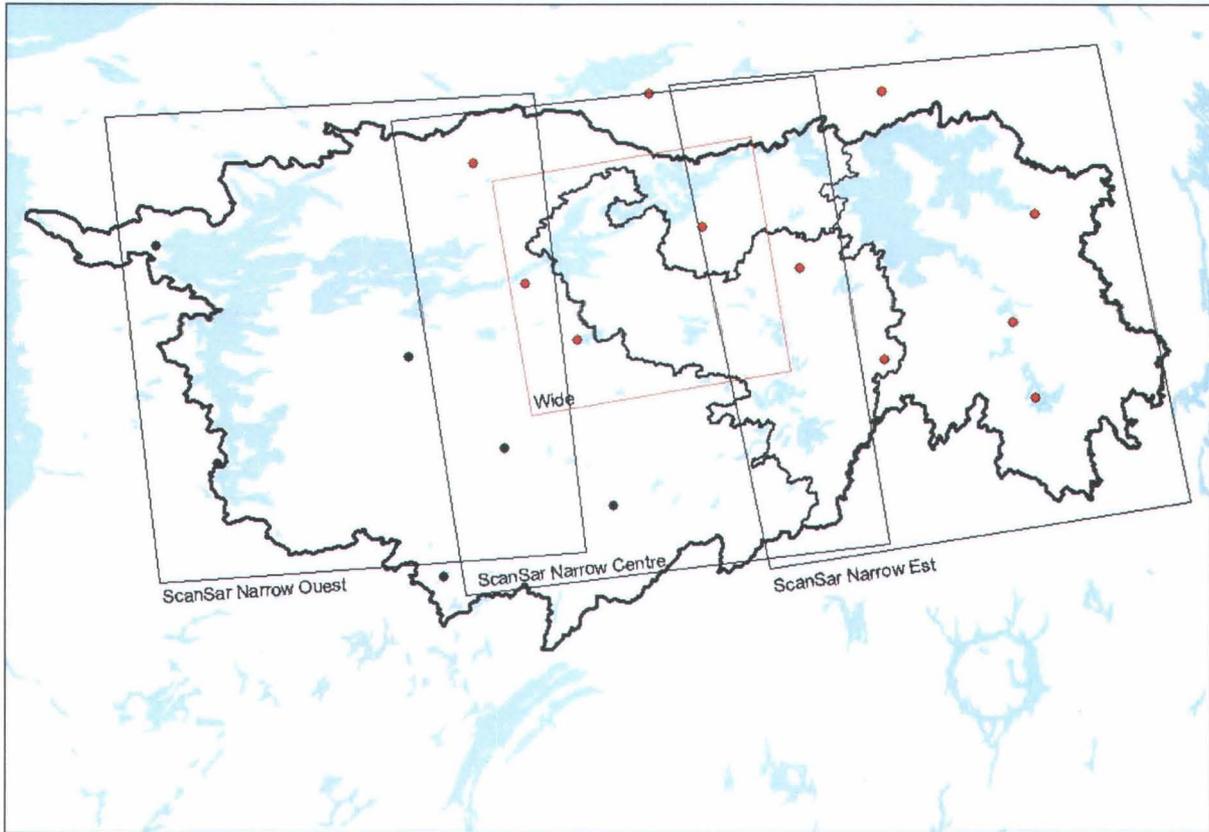


Figure 1 : Localisation des trois orbites ScanSAR Narrow sur le bassin de la rivière La Grande.

Tableau 1 : Sommaire des données acquises à l'hiver 2000-2001

Images ScanSAR Narrow	Images Wide	Campagnes de terrain HQ	Campagnes de terrain INRS-Eau
24-27-30 octobre	3 novembre		
17-20-23 novembre	27 novembre		
4-7-10 janvier	14 janvier	5 au 12 janvier	
28-31 janvier et 2 février	7 février		29 janvier au 2 février
		16 au 23 février	
	3 mars		
17-20-23 mars	27 mars	16 au 23 mars	19 au 22 mars

3 ANALYSE DES RESULTATS DE L'HIVER 2000-2001

L'analyse des résultats de l'utilisation d'EQueau à l'hiver 2000-2001 est présentée de l'échelle locale vers l'échelle globale. Les paramètres influençant les résultats à chacun des niveaux seront discutés en détail.

3.1 Application d'EQueau aux sites d'échantillonnages

Les sites d'échantillonnages d'Hydro-Québec et de l'INRS représentent le premier niveau d'analyse. À ce niveau, certains paramètres sont plus faciles à contrôler et à valider. Pour chacun des sites, la rétrodiffusion de chaque image est d'abord extraite sur une zone d'environ 350m X 700m (420 pixels). La rétrodiffusion moyenne de ces pixels est ensuite calculée et utilisée comme intrant à l'algorithme. Pour chaque site, le rapport de rétrodiffusion est calculé en utilisant les valeurs des images de novembre comme référence (section 3.1.1). L'algorithme utilisé est une version adaptée de l'hiver 1999 (section 3.1.2). La densité de neige applicable au site est celle mesurée lors des campagnes de terrain correspondantes (section 3.1.3). Enfin, l'équivalent en eau estimé pour chaque site sera comparé à l'équivalent en eau réellement mesuré sur le terrain (section 3.1.4).

3.1.1 Choix de l'image de référence

L'algorithme d'EQueau est basé sur un rapport de rétrodiffusion, c'est-à-dire sur la différence de rétrodiffusion (en dB), entre une image d'hiver et une image de référence. Cette méthode a pour but de minimiser ou d'éliminer entre les deux images, la différence de signal qui n'est pas reliée aux changements survenus dans le couvert de neige.

Dans un premier temps, le rapport de rétrodiffusion permet d'éliminer la différence de signal qui est due aux variations de l'angle d'incidence à l'intérieur d'une image. Cet angle varie, sur une image ScanSAR Narrow, entre 20° et 39°. Une onde radar qui frappe une cible à un angle de 20° sera rétrodiffusée plus fortement qu'à un angle de 39°. Ainsi, comme le montre la figure 2, le signal décroît de part et d'autre de l'image, en fonction de l'angle d'incidence. Comme cette décroissance est théoriquement similaire sur toutes les images acquises selon les mêmes paramètres, un rapport de rétrodiffusion permettra de l'éliminer.

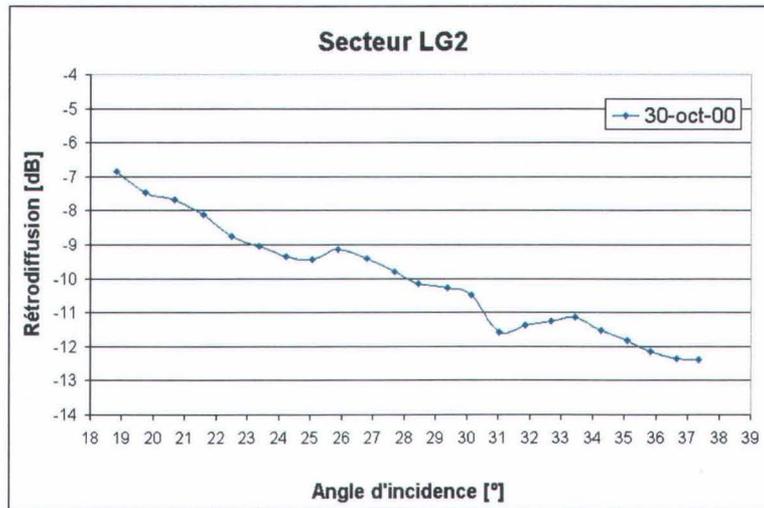


Figure 2 : Variation de la rétrodiffusion sur une image d'automne en fonction de l'angle d'incidence

Un autre phénomène dû à la nature de l'image radar, mais particulier au mode ScanSAR Narrow, est la différence de signal entre les deux faisceaux qui la composent. Pour couvrir une fauchée de 350 km avec une résolution de 50 m, RADARSAT doit utiliser deux faisceaux (W1 et W2). Le premier illumine la scène à des angles d'incidence de 20° à 31° et le second, de 32° à 39°. Dans les faits, il y a un certain chevauchement entre les deux faisceaux et la juxtaposition est souvent difficile. Sur la figure 3, on peut voir clairement la « cassure » entre les deux faisceaux. On peut également détecter cette cassure sur la courbe de la figure 2, vers 31°. Encore une fois, cet artefact est théoriquement similaire sur toutes les images acquises selon les mêmes paramètres et un rapport de rétrodiffusion permettra de l'éliminer.

Un troisième avantage du rapport de rétrodiffusion est de minimiser les effets dus à la topographie. En effet, l'angle de frappe du signal radar peut être modifié par la pente et l'orientation du terrain. Si l'onde radar frappe une cible sur une pente lui faisant face, la rétrodiffusion sera plus élevée que si cette même cible est située en terrain plat. L'effet de pente étant théoriquement similaire sur toutes les images acquises selon les mêmes paramètres, un rapport de rétrodiffusion permettra de l'éliminer.

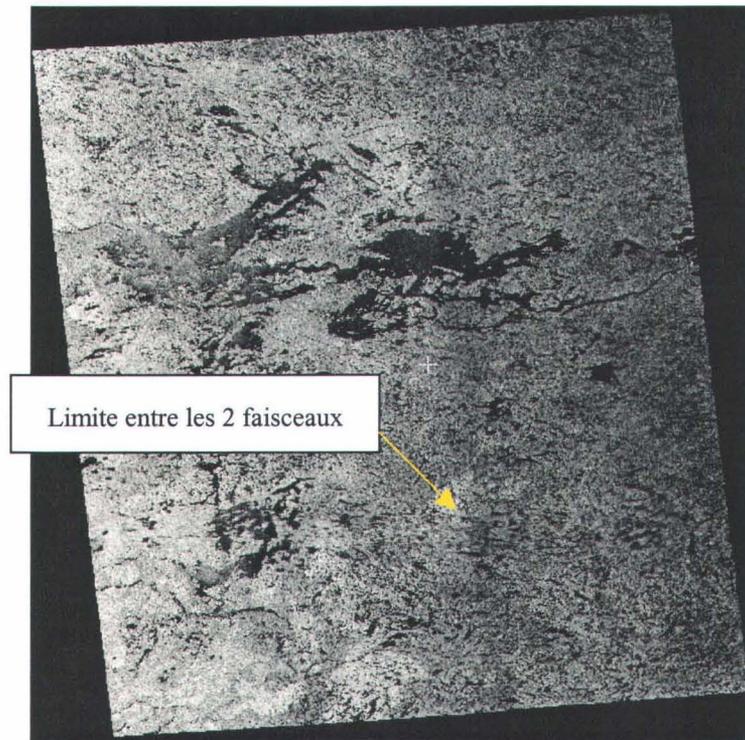


Figure 3: Changement de rétrodiffusion dû au changement de faisceau d'une image ScanSAR Narrow.

Un autre facteur qui influence le signal radar est la rugosité de la cible, aussi bien celle du sol que celle de la végétation. Pour un même couvert de neige sèche, un sol sous-jacent rugueux rétrodiffuse une plus grande partie du signal radar qu'un sol lisse et une zone arborée rétrodiffuse une plus grande partie du signal radar qu'une zone dégagée. L'effet de rugosité étant théoriquement similaire sur toutes les images acquises selon les mêmes paramètres (en ne tenant pas compte de l'humidité du sol), un rapport de rétrodiffusion permettra de l'éliminer.

Finalement, le dernier paramètre pouvant masquer les variations liées au couvert de neige est justement l'humidité du sol, qui affecte la constante diélectrique et le retour du signal radar. Si la teneur en eau du sol varie trop fortement sur l'image de référence, elle induira sur le rapport de rétrodiffusion, des variations qui ne sont pas liées au couvert de neige. De la même façon, un sol gelé par endroit seulement fait varier la teneur en eau et la constante diélectrique du sol. C'est pour cette raison que le choix de l'image de référence est important. Deux choix sont possibles pour que la constante diélectrique du sol soit le plus homogène possible sur une image : lorsque le sol a atteint le point de saturation ou lorsqu'il est complètement gelé. Et idéalement, il ne doit pas

y avoir de neige. Ces conditions se produisent généralement à l'automne mais demeurent imprévisibles, tout en variant localement. De plus, nous sommes dépendants des dates de passage du satellite. En raison de tous ces facteurs, l'image de référence parfaite est difficile à obtenir.

Puisque 2000-2001 représentait la première année d'utilisation d'images ScanSAR Narrow, nous devons acquérir des images de référence correspondant aux trois orbites du bassin de la Grande rivière. Les fenêtres d'acquisitions possibles étaient la dernière semaine d'octobre et la troisième semaine de novembre; 24 jours plus tôt, le sol n'est définitivement pas gelé et 24 jours plus tard, le couvert de neige est trop important. Pour avoir de meilleures chances d'obtenir des valeurs de référence représentatives des conditions recherchées, les images des deux fenêtres disponibles ont été acquises.

L'analyse des valeurs de rétrodiffusion de ces images permet de constater dans un premier temps, que le signal de chaque image varie en fonction de l'angle d'incidence et que la cassure entre les deux faisceaux est présente à chaque fois (figure 4). Ces valeurs ont été obtenues en moyennant la puissance des pixels sur des bandes verticales d'environ 10 km de large.

L'effet constant de l'angle d'incidence et du changement de faisceau permet d'affirmer que le rapport de rétrodiffusion sera efficace pour réduire ces phénomènes, en autant que les images d'hiver aient le même comportement. Une nuance toutefois, le signal dans les plus faibles angles d'incidence est légèrement surélevé en octobre, phénomène visible aussi sur les images par une plus grande brillance en début d'image. Cet artefact en début de faisceau W1 a déjà été observé par le passé et pourrait donner des équivalents en eau erronés en début d'image, si l'image d'octobre est prise comme image de référence.

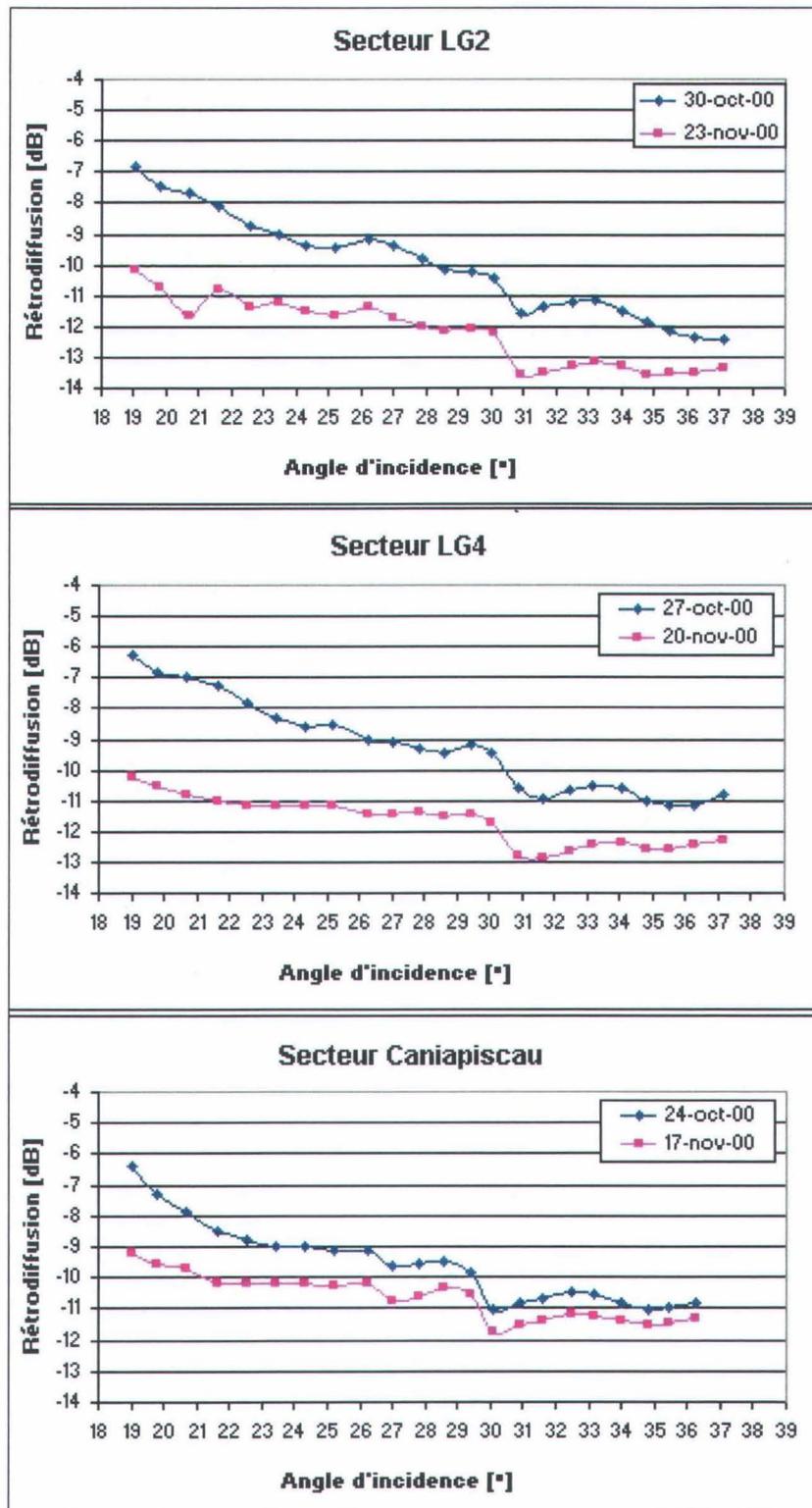


Figure 4: Variation de la rétrodiffusion des images d'automne en fonction de l'angle d'incidence

Le second point majeur à relever sur la figure 4 est l'écart important du signal entre les deux périodes d'acquisitions. La rétrodiffusion est approximativement 2 dB plus faible en novembre qu'en octobre, pour les orbites de LG2 et LG4 et de 1 dB pour le secteur de Caniapiscau. Ces valeurs confirment d'une part, que la constante diélectrique du sol a chuté lors du gel de celui-ci (Lagacé *et al.*, 2000) et que d'autre part, les images ScanSAR Narrow sont sensibles aux changements environnementaux. L'écart plus faible sur le secteur de Caniapiscau est probablement dû au fait que le sol était déjà partiellement gelé en octobre sur ce bassin situé plus en altitude et que le bassin est également plus densément boisé (plus forte rétrodiffusion en novembre).

Les conditions environnementales du 24 au 27 octobre 2000, selon les observateurs aux centrales et aux aéroports sont d'ailleurs les suivantes :

24 octobre : Température près ou supérieure au point de congélation, quelques averses de pluie ou flocons de neige, trace de neige au sol à certains endroits, parfois humide, sol dégelé.

27 octobre : Température de -2°C à -8°C sur La Grande, neige et poudrerie, pas encore d'accumulation au sol sauf dans le secteur de LA1 et Fontanges, sol dégelé en général mais partiellement gelé à l'est.

30 octobre : Température près ou supérieure au point de congélation, aucune averse, trace de neige au sol à certains endroits, sol gelé mais humide en surface.

Les conditions environnementales du 17 au 23 novembre 2000, selon les observateurs aux centrales et aux aéroports sont les suivantes :

17 novembre : Températures de -2°C à -5°C , faibles chutes de neige par endroit, moins de 10 cm de neige sèche au sol, sol gelé.

20 novembre : Températures de -8°C à -16°C , faibles averses de neige par endroit, moins de 10 cm de neige sèche au sol, sol gelé.

23 novembre : Températures de -1°C à -4°C , aucune précipitation, généralement moins de 10 cm de neige sèche au sol, sol gelé.

Ces observations confirment qu'en octobre, les conditions sont très variables, alors qu'en novembre, les conditions sont homogènes et le sol est gelé. Parce que les images de novembre correspondent à un sol gelé, que les conditions y sont généralement homogènes sur les trois images, que le couvert de neige est inférieur à 10 cm et qu'aucun artefact n'est observé sur les images, cette série d'images sera utilisée à titre de référence pour le calcul ultérieur des rapports de rétrodiffusion.

3.1.2 Choix de l'algorithme

L'algorithme utilisé depuis 1999 est une relation linéaire entre le rapport de rétrodiffusion et la résistance thermique. Cette relation encore générale a été déterminée à partir des données RADARSAT de milieu d'hiver de 1997, 1998 et 1999 et des données terrain (profils de neige) correspondants. Un paramètre de l'algorithme (ordonnée à l'origine) peut être modifié pour des conditions de fin d'hiver, là où l'impact de la résistance thermique diminue. Afin de vérifier si la relation rapport de rétrodiffusion et résistance thermique du couvert de neige en 2001 va dans le même sens que par les années passées, les valeurs ont été calculées pour les sites INRS où sont effectués les profils de neige en janvier et en mars 2001. La figure 5 présente le graphique connu de la relation en milieu d'hiver, en y ajoutant les données de janvier 2001. On voit clairement que les données de cette année suivent la tendance générale, mais se retrouvent tout de même sous la droite précédemment utilisée.

La cause principale de ce changement est reliée au choix de la période de référence. En effet, les données de références antérieures provenaient principalement d'images où le sol n'était pas gelé. Deux actions sont donc à prendre. D'abord, pour l'application d'EQeau en 2001, il faut utiliser une relation centrée sur les données particulières de cette année, afin d'obtenir des équivalents en eau estimés plus précis. C'est ce que nous avons fait en abaissant l'ordonnée à l'origine (de 7.4 à 5.4), lors des applications en mode opérationnel de l'hiver 2001. Deuxièmement, il est essentiel dans la suite du projet, de raffiner l'algorithme. Il faut dans ce contexte, regarder à la fois les rapports de rétrodiffusion et les résistances thermiques.

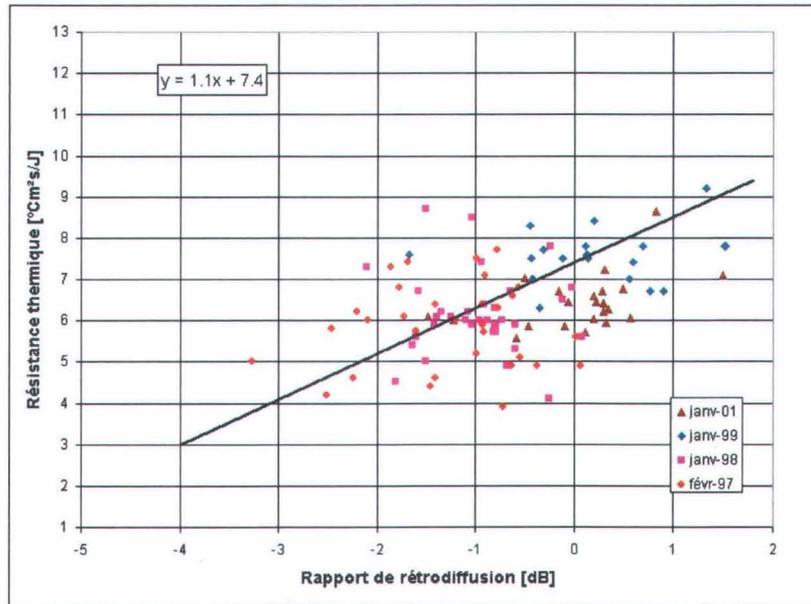


Figure 5: Relation mise à jour entre le rapport de rétrodiffusion et la résistance thermique

Pour ce qui est des rapports de rétrodiffusion, il faut, à partir des données actuelles et antérieures, vérifier les conditions d'acquisitions des images de référence afin de s'assurer qu'elles soient comparables. On ne peut en effet comparer des rapports qui dans un cas, sont basés sur des sols dégelés et dans l'autre cas, sur des sols gelés. Ou si le sol est gelé, était-il plus froid ou plus enneigé une année qu'une autre? À la limite, il pourrait être possible de déterminer des algorithmes spécifiques aux conditions prévalant lors de l'acquisition de l'image de référence. Il faut également revoir l'échelle à laquelle est calculée la rétrodiffusion sur un site d'échantillonnage afin d'éviter les effets persistants du « speckle » sur la variabilité locale. Il faut une valeur réellement représentative du secteur d'échantillonnage. Cela étant fait, il faudra également s'assurer de la validité des résistances thermiques estimées aux sites. Il existe à ce niveau une certaine incertitude reliée à la précision des mesures de terrain. En effet, comme le montre la figure 6a, il semble que les densités mesurées de façon détaillée lors d'un profil, sont régulièrement plus élevées que les densités estimées par le carottage. Puisque ces dernières sont utilisées pour extrapoler la résistance thermique à tous les sites, il y a surestimation de la résistance thermique aux sites d'échantillonnage (figure 6b) et par conséquent, les paramètres de l'algorithme (pente, ordonnée à l'origine) peuvent être faussés.

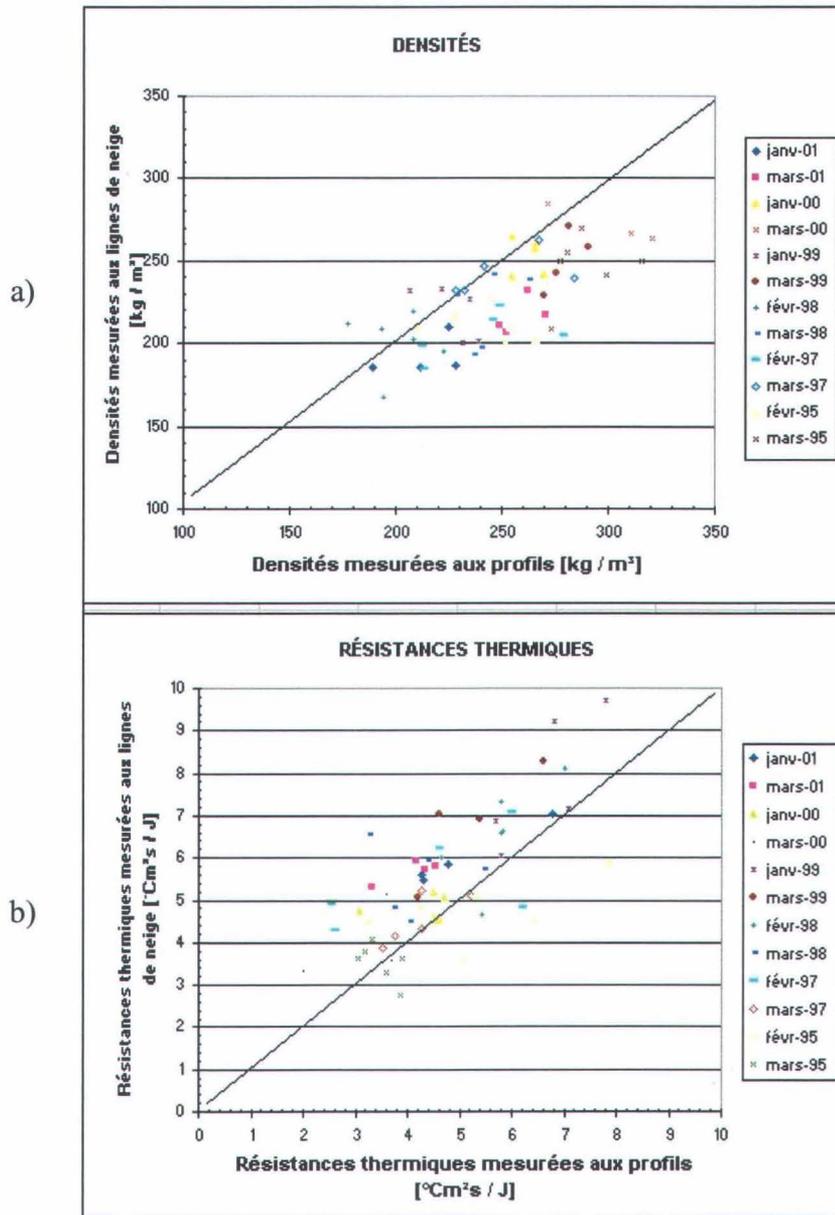


Figure 6: a) Comparaison des densités mesurées lors du profil et des densités mesurées sur la ligne de neige adjacente b) Comparaison des résistances thermiques mesurées lors du profil et des résistances thermiques estimées à partir de la ligne de neige adjacente.

Un dernier aspect qui devra être examiné, est la pertinence de garder une relation linéaire plutôt que polynomiale. Le rapport de rétrodiffusion ne peut augmenter indéfiniment. Il aura logiquement tendance à plafonner lorsque la température du sol approchera 0°C. Avec les données dont nous disposons depuis 1994, nous sommes peut-être en mesure d'établir une telle relation de type polynomiale.

3.1.3 Choix de la densité

Au début janvier, seuls les densités des sites d'Hydro-Québec sont disponibles. À la fin janvier et au début février, seuls les sites INRS ont été visités. À la mi-mars, tous les sites possèdent des mesures de terrain et pourront être utilisés. La mesure de densité par carottage présente actuellement une incertitude et une variabilité très élevée, avec un écart-type sur la moyenne de 60 kg/m^3 en janvier et de 30 kg/m^3 en mars, pour l'ensemble du bassin de La Grande. Toutefois, dans le cas de l'application au site, la densité mesurée utilisée dans le calcul de l'équivalent en eau estimé est issue de la même manipulation que l'équivalent en eau mesuré utilisé pour validation. Ce facteur s'annule donc.

3.1.4 Comparaison des équivalents en eau

Quand le rapport de rétrodiffusion au niveau local correspond bien aux changements environnementaux survenus entre l'image de référence et l'image d'hiver et que l'algorithme utilisé représente bien la relation avec la résistance thermique du couvert de neige, la correspondance entre les deux valeurs d'équivalents en eau devrait être parfaite. La figure 7 présente l'ensemble des résultats pour les trois périodes d'application. On remarque que les sites INRS présentent une meilleure concordance en général, ce qui s'explique par le fait que les sites sont regroupés à l'intérieur d'un secteur de 150 km et que les variations y sont moins grandes. Les mesures ont aussi été faites par le même groupe d'opérateurs, ce qui limite les erreurs de manipulation. Les sites Hydro-Québec sont pour leur part répartis sur l'ensemble du bassin et les relevés sont effectués par plusieurs personnes différentes. Parmi les sites qui s'éloignent fortement de la droite, on notera à la fois en janvier et en mars, le site du lac Kanaapscow, le site LG4 et le site #16N. Les autres cas sont plutôt aléatoires. Également, la correspondance semble meilleure en janvier qu'en mars.

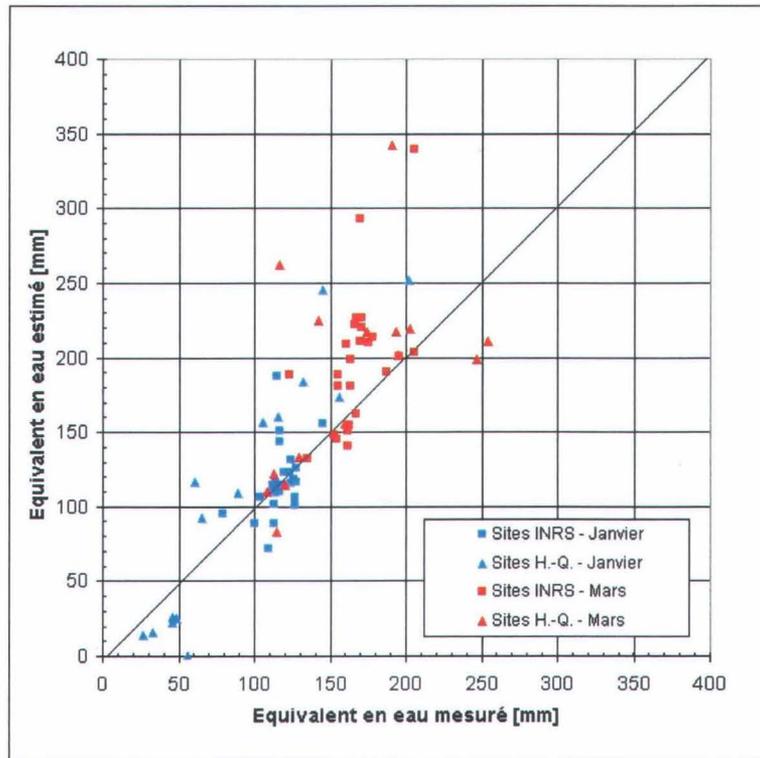


Figure 7: Comparaison des équivalents estimés et mesurés aux sites d'échantillonnages

Les différences observées peuvent être de différentes sources. La première est bien sûr l'image radar. Sur l'image de référence, bien que les conditions globales soient homogènes, il se peut qu'elles diffèrent pour un site en particulier, par exemple, si le sol n'y est pas gelé. Le rapport de rétrodiffusion ne correspondrait pas dans ce cas, à l'algorithme global utilisé. Il se peut également que le comportement de l'image d'hiver ne soit pas conforme aux attentes. En effet, un des principes à la base d'EQueau veut que le sol gelé se réchauffe légèrement à mesure que le couvert de neige s'y accumule, en raison des caractéristiques isolantes de la neige. Une nuance importante toutefois, si la température de l'air chute significativement entre l'acquisition des images de référence et celles d'hiver, il se peut que le sol soit plus froid à l'hiver qu'à l'automne et ce, malgré la présence d'un couvert de neige. Cette situation peut se produire dans un climat comme celui de la Baie James. Théoriquement, la constante diélectrique du sol et sa rétrodiffusion, augmentent avec le réchauffement de la température d'un sol gelé. L'analyse des images d'hiver, dans des conditions de réchauffement progressif, devrait donc nous montrer une augmentation graduelle du signal entre la fin novembre et la fin mars.

Sur la figure 8, on compare pour les trois orbites, la rétrodiffusion moyenne de chaque image en fonction de l'angle d'incidence. Dans un premier temps et tout comme à l'automne, la variation en fonction de l'angle d'incidence et la cassure due au changement de faisceau sont généralement comparables sur toutes les images. On voit bien que seules les images d'octobre présentent des valeurs particulièrement élevées pour les faibles angles d'incidence. Cette caractéristique due à l'humidité du sol n'est pas visible sur les images d'hiver et de novembre et ne sera donc pas présent sur les rapports de rétrodiffusion.

En ce qui concerne la variation temporelle du signal, toujours sur la figure 8, on remarque deux choses :

- Premièrement, le signal augmente effectivement entre novembre et mars. Cette augmentation est de l'ordre de 0.5 dB entre novembre et janvier et de l'ordre de 1 dB entre novembre et mars. Entre le début janvier et le début février, on ne dénote toutefois aucune augmentation.
- Deuxièmement, le signal des images d'hiver demeure toujours inférieur au signal d'octobre, ce qui est logique puisque le sol n'est pas dégelé.

Une exception à ces règles est faite sur le secteur de Caniapiscau. Dans la partie est de l'image, le signal d'octobre est plus faible que sur certaines des images d'hiver. Il est fort possible que dans ce secteur et à ces altitudes, le sol gèle plus tôt et que la constante diélectrique du sol ait déjà chuté à cette date. Une autre particularité de ce secteur est le fait que le signal de mars soit le plus faible des images d'hiver. Jusqu'à un angle de 27°, il est même plus faible que celui du 17 novembre. Un tel comportement pourrait être relié à la présence au sol de neige légèrement humide. Toutefois, les observateurs répartis sur le bassin et la station météo du site #2 signalent tous des températures entre -5° et -10° lors du passage du satellite, ce qui exclut cette hypothèse. Puisqu'il s'agit vraiment du seul cas où le signal de mars est plus faible que sur les images précédentes et que les conditions environnementales ne semblent pas expliquer ce changement, il est probable qu'il s'agisse d'une anomalie d'ordre radiométrique. Celle-ci se répercutera par une sous-estimation de la résistance thermique, laquelle entraînera des valeurs d'équivalents en eau plus basses (annexe 3, image de l'est, 17 nov.).

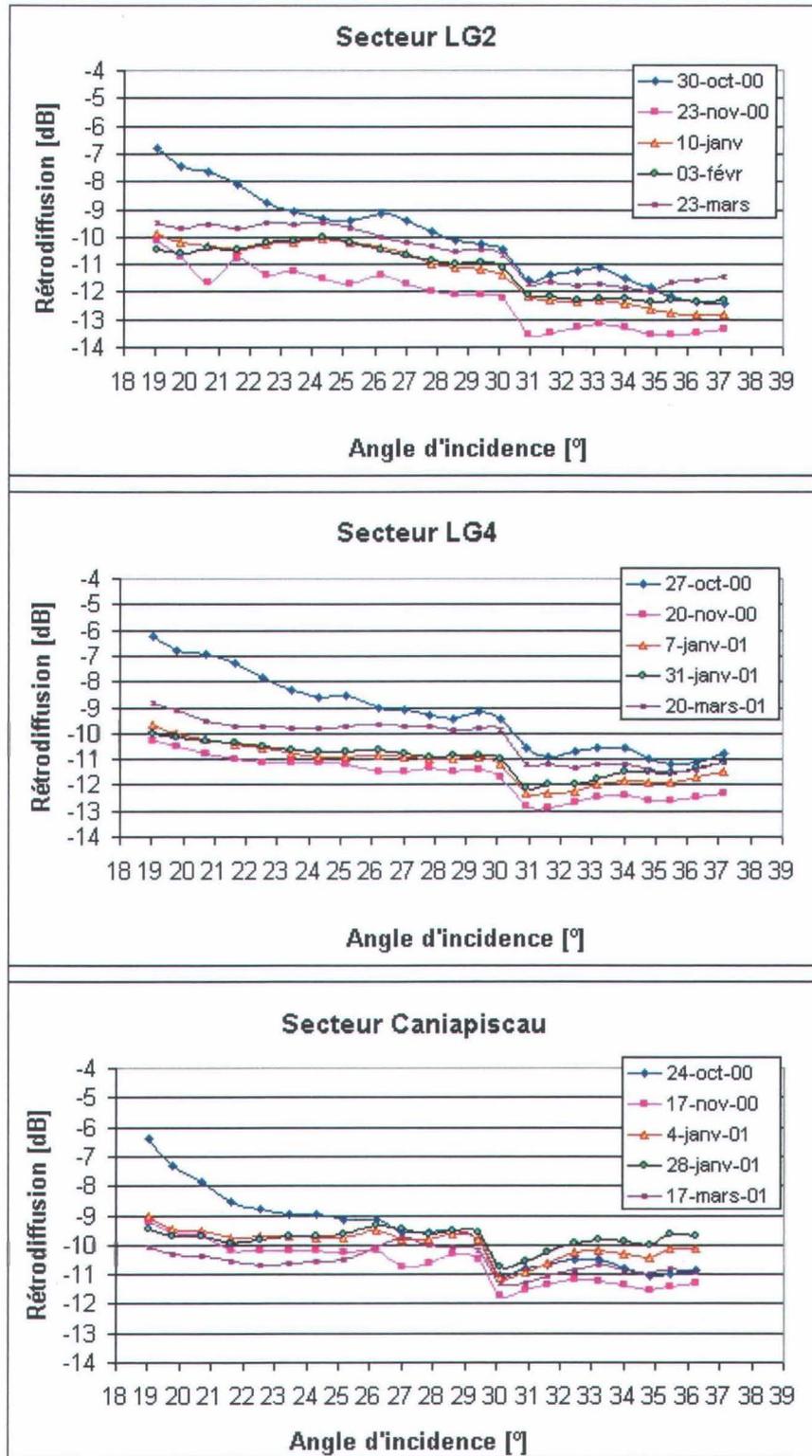


Figure 8 : Variation de la rétrodiffusion moyenne des images d'hiver en fonction de l'angle d'incidence

Afin de confirmer les observations précédentes, les conditions environnementales du 4 au 10 janvier 2001, selon les observateurs aux centrales et aux aéroports sont les suivantes :

4 janvier 2001 : Températures de -22 à -29°C , aucune précipitation, 30 à 45 cm de neige sèche au sol.

7 janvier 2001 : Températures de -20 à -29°C , aucune précipitation, 30 à 45 cm de neige sèche au sol.

10 janvier 2001 : Températures de -15 à -25°C , aucune précipitation, 40 à 45 cm de neige sèche au sol.

Les conditions environnementales du 28 janvier 2001 au 3 février 2001, selon les observateurs aux centrales et aux aéroports sont les suivantes :

28 janvier 2001 : Températures de -14 à -20°C , faible neige par endroit, 45 à 50 cm de neige sèche au sol.

31 janvier 2001 : Températures de -20 à -29°C , aucune précipitation, 45 à 55 cm de neige sèche au sol.

3 février 2001 : Températures de -21 à -22°C , aucune précipitation, 30 à 55 cm de neige sèche au sol.

Considérant ces valeurs, les conditions du début janvier et du début février sont pratiquement identiques, tout en tenant compte que ces observations ne sont pas prises de façon scientifique. Il est tout de même logique que les valeurs de rétrodiffusion des images correspondantes soient également similaires, tel qu'observé plus tôt à la figure 6.

Les conditions environnementales du 17 au 23 mars 2001, selon les observateurs aux centrales et aux aéroports sont les suivantes :

17 mars 2001 : Températures de -5 à -9°C , faible neige par endroit, 45 à 50 cm de neige sèche au sol.

20 mars 2001 : Températures de 2 à 3°C, aucune précipitation, 40 à 55 cm de neige légèrement humide en surface (2 observateurs seulement (LG4, Fontanges)).

23 mars 2001 : Températures de 1°C, faible neige, 30 cm de neige légèrement humide en surface (1 observateur seulement (LG4)).

Deux observations s'imposent. D'abord, si l'on regarde la figure 9, où l'on retrouve la hauteur moyenne du couvert de neige au cours de l'hiver, telle que relevée par différentes sources, on constate que les données des observateurs sont constamment plus basses que celles des relevés officiels ou de la sonde de la station #2. On confirme ici que les conditions sont demeurées stables entre janvier et février, avec une augmentation d'à peine 10 cm du couvert de neige. Par contre, il y a une vingtaine de centimètres de neige de plus à la mi-mars qu'au début février selon les relevés officiels et la sonde de la station #2. Se basant sur ces observations, la stabilité du signal radar entre le début janvier et le début février et son augmentation en mars sont tout à fait logiques. Comme mentionné précédemment, les valeurs plus basses de l'image du 17 mars ne peuvent s'expliquer par la présence de neige humide à ce moment puisque la température de l'air est sous le point de congélation. À l'opposé, les conditions de légère neige humide observées les 20 et 23 mars ne semblent pas être suffisantes pour influencer le signal des images correspondantes.

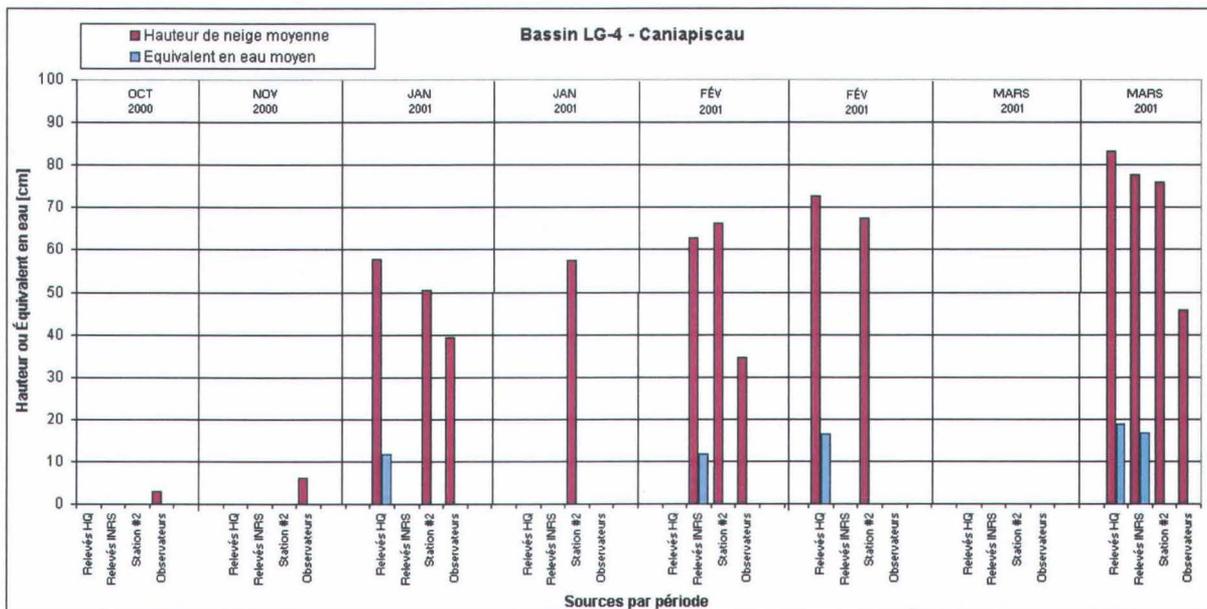


Figure 9: Valeurs moyennes du couvert de neige au cours de l'hiver, telle que relevée par différentes sources

L'analyse de la variation temporelle du signal a aussi été effectuée à une autre échelle, c'est-à-dire en regardant les valeurs moyennes de rétrodiffusion par occupation du sol, puis par sites d'échantillonnages. Ces calculs ont été réalisés uniquement sur le secteur de LG4, où l'on retrouve les sites de relevés de l'INRS. La figure 10a montre que dans le cas des moyennes par occupation du sol, le comportement du signal est similaire à l'analyse globale. Il y a deux dB entre octobre et novembre et une progression du signal entre novembre et mars, particulièrement dans le cas des sols nus et des landes. La variation du signal en zone boisée est plus faible, ce qui confirme que la végétation masque un peu les variations du sol. Les brûlis quant à eux, ont toujours un comportement particulier et il faudrait songer à les retirer du calcul de l'équivalent en eau moyen.

Sur les figures 10b et 10c, les moyennes calculées pour chaque site d'échantillonnages INRS donnent un aperçu différent de la variation temporelle de rétrodiffusion. Les valeurs d'octobre (fig.10b) sont en général, 2 dB supérieures aux valeurs de novembre, mais on voit que la situation peut changer fortement pour certains sites, en raison de caractéristiques locales particulières. L'écart observé varie en effet de 3.3 à -0.5 dB. Les valeurs du début et de la fin janvier (fig.10c) sont en général identiques, avec encore là, quelques exceptions locales dans l'est. Les valeurs de mars sont en général 1 dB au-dessus des valeurs de la fin janvier, avec des écarts réels variant plutôt entre 0 et 2 dB. Le seul problème vient du fait qu'à cette échelle, les valeurs du 20 novembre ne sont pas toujours plus basses que celles de janvier. Peut-être s'agit-il d'un cas où à certains endroits, le sol est plus froid en janvier qu'en novembre.

En résumé, la variation temporelle moyenne du signal radar, à une exception près (17 mars), correspond bien aux conditions telles qu'observées sur le terrain. La variabilité du signal radar demeure assez faible en hiver (<2dB) et compte tenu de la précision de l'instrument, il se peut qu'il ne soit pas assez sensible pour détecter toutes les variations du couvert de neige, particulièrement lorsque la température extérieure se réchauffe et que l'impact de la résistance thermique diminue. L'analyse à une échelle plus locale, montre des comportements qui peuvent différer de la tendance générale, compte tenu que les caractéristiques de la cible (sol, neige, végétation) ou les conditions environnementales sont souvent variables dans l'espace. Il faut donc s'attendre à de plus grands écarts dans la précision des résultats à l'échelle locale (pixels, sites d'échantillonnages) par rapport à une échelle plus globale (bassins, groupes d'occupation du sol).

À l'échelle locale, il y a également la possibilité que la rétrodiffusion moyenne soit affectée par le chatoiement (« speckle ») de l'image, malgré le filtre.

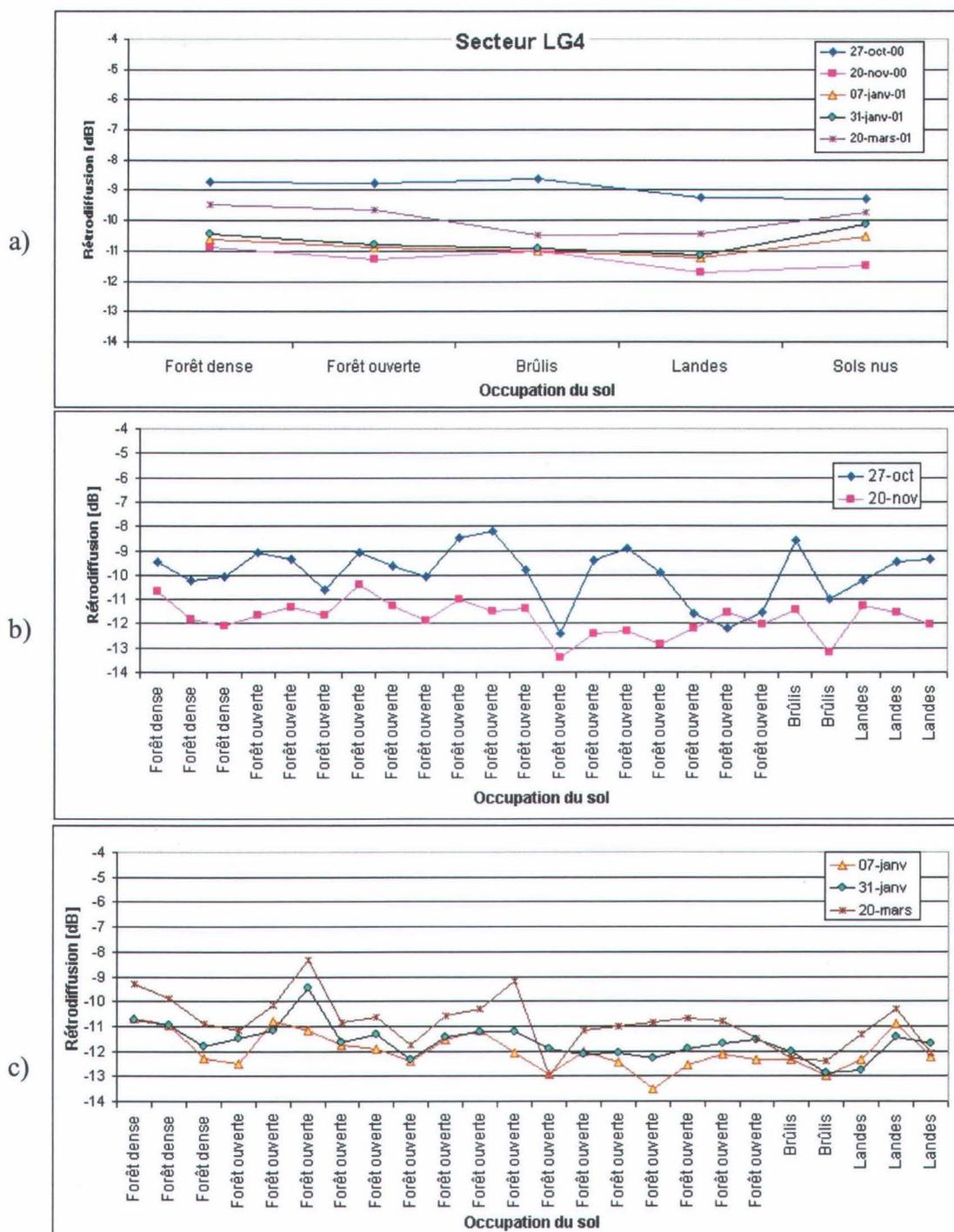


Figure 10: Variation temporelle de la rétrodiffusion a) selon l'occupation du sol, b) et c) aux sites d'échantillonnages

3.2 Application d'EQeau à l'image entière

Lors de l'application de l'algorithme aux images entières par *EQeau*, la seule différence en ce qui concerne les sites d'échantillonnages est au niveau de la densité de neige utilisée. À la place de la densité mesurée effectivement au site, on utilise une densité moyenne répartie sur l'image, selon l'occupation du sol et le sous-bassin. Afin de vérifier la variabilité induite par ce changement, la figure 11 compare pour chaque site, les équivalents en eau estimés avec la densité mesurée et ceux estimés par *EQeau*, avec la densité répartie sur les images.

Dans le cas des sites INRS du 31 janvier 2001, les densités mesurées aux sites sont fortement concentrées entre 180 et 200 kg/m³ alors que les densités employées dans *EQeau* pour LG4, Laforge et Caniapiscau sont de l'ordre de 180 à 205 kg/m³. Il y a donc très peu de distribution de part et d'autre de la moyenne. Par contre, en mars, les densités mesurées aux sites INRS varient plus fortement entre 200 et 240 kg/m³ et même si les densités utilisées pour *EQeau* sont de l'ordre de 205 à 235 kg/m³, une plus grande étendue de valeurs entraîne une plus grande dispersion des points. Pour les stations HQ en janvier, la très grande variabilité s'explique par des densités mesurées très variables (60 à 190 kg/m³) et incertaines sur les bassins de l'ouest. Les valeurs moyennes utilisées dans *EQeau* varient plutôt de 140 à 165 kg/m³. En mars, les mesures sur les bassins de l'ouest vont de 160 à 250 kg/m³ alors qu'*EQeau* utilise des valeurs plus centrales de 175 à 195 kg/m³. Il est donc clair à la suite de cette analyse que la densité utilisée dans l'algorithme influence fortement les équivalents en eau estimés et que les méthodes d'estimation et de répartition des densités dans *EQeau* devra être améliorée. Une interpolation par polygones de Thyssen est envisageable, de même qu'une pondération en fonction de l'altitude, afin d'atténuer la segmentation des cartes en fonction des bassins (annexes 1, 2, 3).

La dernière étape dans une phase de recherche, mais la première en mode opérationnel, est l'application de l'algorithme à l'image entière et la validation à partir des valeurs calculées au niveau des sous-bassins. Ces résultats ont été présentés dans le bilan de la campagne 2001 rédigé par Marie-Claude Bouchard (Hydro-Québec, 2001) en juin 2001 et sont repris au chapitre suivant.

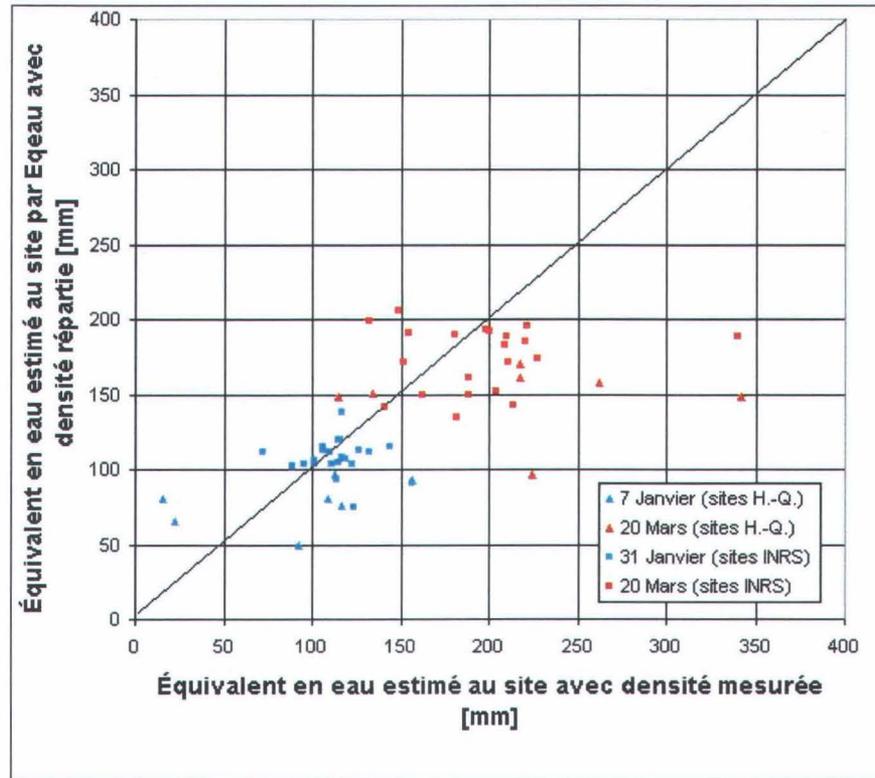


Figure 11: Comparaison des équivalents en eau estimés selon deux densités différentes

4 RESULTATS DE L'APPLICATION D'EQUEAU EN MODE OPERATIONNEL

4.1 Début janvier

L'hiver 2001 fut bien particulier au niveau de la dynamique du couvert de neige. Au début janvier, les quantités de neige mesurées au sol sont inférieures à la normale et les densités mesurées au sol sont très faibles. Il existe toutefois une réelle incertitude sur les relevés de terrain dans ces conditions et leur utilisation comme valeurs de référence doit être faite avec précaution. Les moyennes interpolées à partir de ces données vont de 67 à 131 mm pour l'équivalent en eau. Les estimations d'équivalents en eau d'EQueau, basées sur des valeurs plus centrées (section 3.2) vont de 56 à 131 mm. La comparaison des résultats pour chaque sous-bassin est présentée à la figure 12. Au début janvier, les valeurs sont similaires à l'ouest alors qu'elles sont légèrement plus basses pour EQueau sur les sous-bassins de l'est. La carte mosaïque des équivalents en eau pour le début janvier est présentée à l'annexe 1.

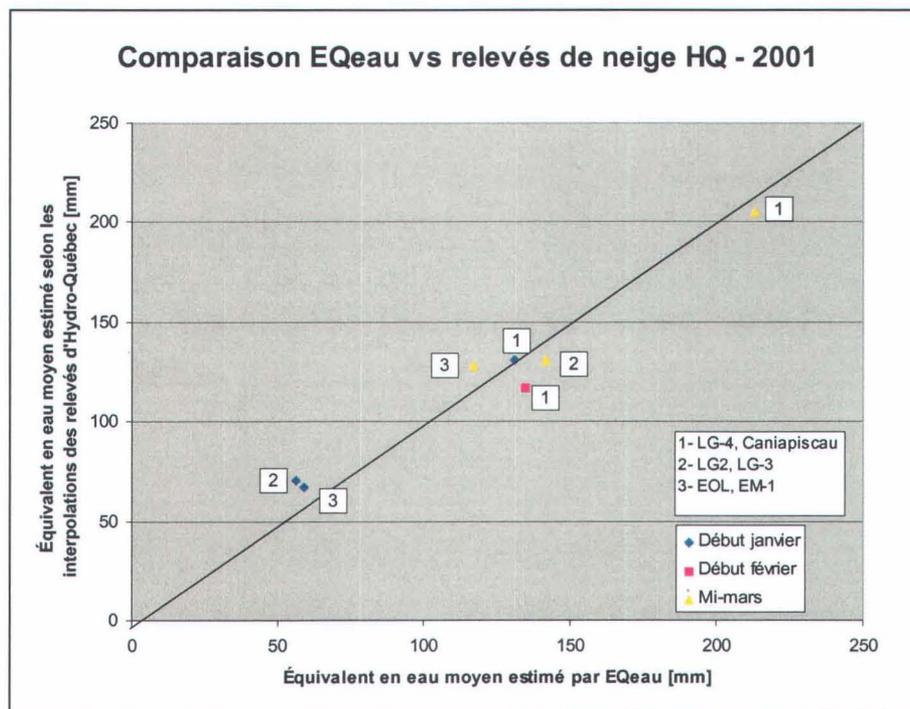


Figure 12 : Comparaison entre les moyennes aux sous-bassins obtenues par EQeau et par Hydro-Québec. Note: 1 seul point de comparaison apparaît pour la période du début février en raison de l'absence de relevés de neige d'HQ. Ce point compare les résultats obtenus par EQeau et ceux de l'INRS-Eau dans le secteur LG-4, Brisay.

4.2 Début février

Les conditions du couvert de neige ont très peu changé depuis les premiers relevés. La moyenne mesurée début janvier sur les bassins LG4-Caniapiscou par Hydro-Québec était de 114 mm d'équivalent en eau alors que celle mesurée début février par l'INRS (25 sites) sur le tronçon LG4-Brisay est de 117 mm (± 25 mm). Les hauteurs de neige approximatives relevées par les observateurs (aéroports et centrales) étaient quant à elles de 35 à 45 cm début janvier et de 45 à 55 cm début février. Finalement, la station météorologique du site #2 (intersection route LG4-LA1) indique une augmentation du couvert de neige de 10 à 15 cm entre les deux périodes. L'augmentation générale anticipée de l'équivalent en eau entre le début janvier et la fin février est donc de 10 à 15 mm au plus. Les résultats d'EQeau montrent une augmentation moyenne allant de 1 à 19 mm selon le bassin. La comparaison des résultats pour le secteur des relevés de terrain réalisés par l'INRS est présentée à la figure 12. La carte mosaïque des équivalents en eau pour le début février est présentée à l'annexe 2.

4.3 Mi-mars

Entre le début février et la mi-mars, les relevés de l'INRS pour la région LG4-LA1-Brisay dénotent une augmentation de 54 mm de la moyenne d'équivalent en eau. Les relevés d'Hydro-Québec sur le secteur LG4-Caniapiscou montrent une augmentation de l'équivalent en eau moyen de 74 mm entre le début janvier et la mi-mars et de 22 mm entre la mi-février et la mi-mars. Il y a donc eu des chutes de neige en février et mars et une augmentation significative de l'équivalent en eau. Les résultats d'EQeau montrent une augmentation d'au moins 80 mm pour le secteur LG4-Caniapiscou et de 60 mm pour LG2-LG3 et EOL-EM1. Encore une fois, la comparaison des résultats est présentée à la figure 12. La carte mosaïque des équivalents en eau pour la mi-mars est présentée à l'annexe 3.

4.4 Bilan

Dans un premier temps, mentionnons que les problèmes rencontrés avec les images ScanSAR Wide (hiver 2000) ne se sont pas reproduits avec les images ScanSAR Narrow. Les artefacts causés par les faisceaux ont été généralement bien éliminés par le rapport entre les images d'automne et les images d'hiver. Le processus de mosaïque de trois images a aussi bien

fonctionné. La variation du coefficient de rétrodiffusion entre les différentes dates va également dans le sens d'un réchauffement progressif du sol en fonction de l'accumulation du couvert de neige, tel que discuté au chapitre 3.

Cette année, les équivalents en eau moyens estimés par EQueau sont comparables aux moyennes calculées par interpolation des relevés de neige d'Hydro-Québec (Figure 12). Les cartes présentées en annexe montrent aussi que la répartition spatiale estimée par EQueau correspond généralement aux relevés de neige ponctuels d'Hydro-Québec. Toutefois, en raison de la variation extrême des valeurs de densités de la neige sur le bassin de La Grande cet hiver et de leur incertitude, l'étalonnage d'EQueau à partir de ces densités a été plus difficile. Il faut rappeler qu'EQueau est basé sur la résistance thermique de la neige et donc sur sa conductivité thermique. Le lien entre ce facteur et l'équivalent en eau est étroitement relié à la densité de la neige. D'où la sensibilité d'EQueau à la densité et la nécessité de mesures plus fiables sur le terrain. Les projets de validation d'instruments de mesure de la densité de la neige en continu tel que SNOWPOWER vont d'ailleurs en ce sens. De plus, tel que discuté au chapitre 3, une interpolation par polygones de Thyssen est envisagée, de même qu'une pondération en fonction de l'altitude afin d'atténuer la segmentation des cartes en fonction des sous-bassins (annexes 1,2,3).



5 VALIDATION À PARTIR DES IMAGES WIDE

5.1 Comparaison des modes

Suite à l'incertitude reliée aux valeurs radiométriques des images ScanSAR Wide de l'hiver 2000, nous avons jugé prudent de valider les valeurs radiométriques des images ScanSAR Narrow de l'hiver 2001 à partir d'images Wide, acquises lors de la même période. Si le signal est comparable sur les deux modes, l'incertitude sera réduite. Une telle validation n'est toutefois pas absolue, en ce sens que les deux séries de données comparées ne sont pas identiques. Le tableau 2 nous montre les différentes caractéristiques des deux modes.

Tableau 2 : Caractéristiques du mode ScanSAR Narrow et du mode Wide

Mode Radarsat-1	ScanSAR Narrow	Wide 1
Couverture	300 km X 300 km	165 km X 165 km
Résolution nominale	50 m	30 m
Dimension du Pixel	25 m	12.5 m
Nombre de faisceaux et angles d'incidence	2 W1 (20°-31°) W2 (31°-39°)	1 W1 (20°-31°)
Format d'enregistrement (résolution radiométrique)	8 bit	16 bit
Données étalonnées	Oui	Oui

Ainsi, l'on comparera des données de résolution spatiale et de résolution radiométrique différentes, ce qui peut engendrer certaines différences au niveau de la rétrodiffusion mesurée. Également, le territoire commun, couvert par les deux modes, le sera selon des angles d'incidence différents (figure 13). Enfin, chaque image en mode Wide est acquise 7 jours après l'image en mode ScanSAR Narrow, période pendant laquelle les conditions environnementales peuvent avoir changé. Néanmoins, malgré les différences entre les deux séries de données, le mode Wide peut permettre de confirmer la validité des résultats obtenus avec le mode ScanSAR Narrow.



Figure 13 : Couverture de l'image Wide par rapport à l'image ScanSAR Narrow

5.2 Comparaison de la rétrodiffusion

La première comparaison sera celle du signal d'automne. On voit très bien sur la figure 14, que malgré les différences énumérées plus haut entre les séries de données ScanSAR Narrow (SCN) et Wide (W1), le signal demeure fort comparable à l'automne. Il y a un peu plus de différences à la fin octobre mais c'est normal puisque les conditions environnementales y sont plus variables entre les deux périodes d'acquisition. En novembre, la rétrodiffusion est identique.

À l'hiver, les données sont aussi très similaires. La figure 15 montre que tant au début janvier qu'au début février, les rétrodiffusions des deux modes sont comparables. Les équivalents en eau estimés à partir des deux modes devraient donc aussi être similaires. À la fin mars, les conditions de neige humide prévalant lors de l'acquisition de l'image Wide (27 mars) ont rendu la correction géométrique de l'image extrêmement difficile et les comparaisons malheureusement impossibles. L'image Wide acquise le 3 mars a toutefois été traitée et les résultats seront discutés plus loin.

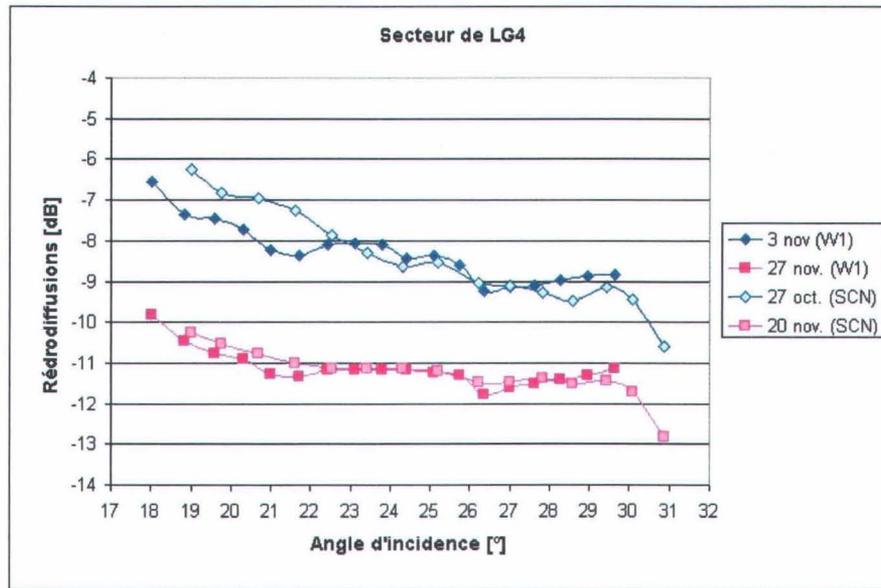


Figure 14 : Comparaison des modes Wide (W1) et ScanSAR Narrow (SCN) à l'automne

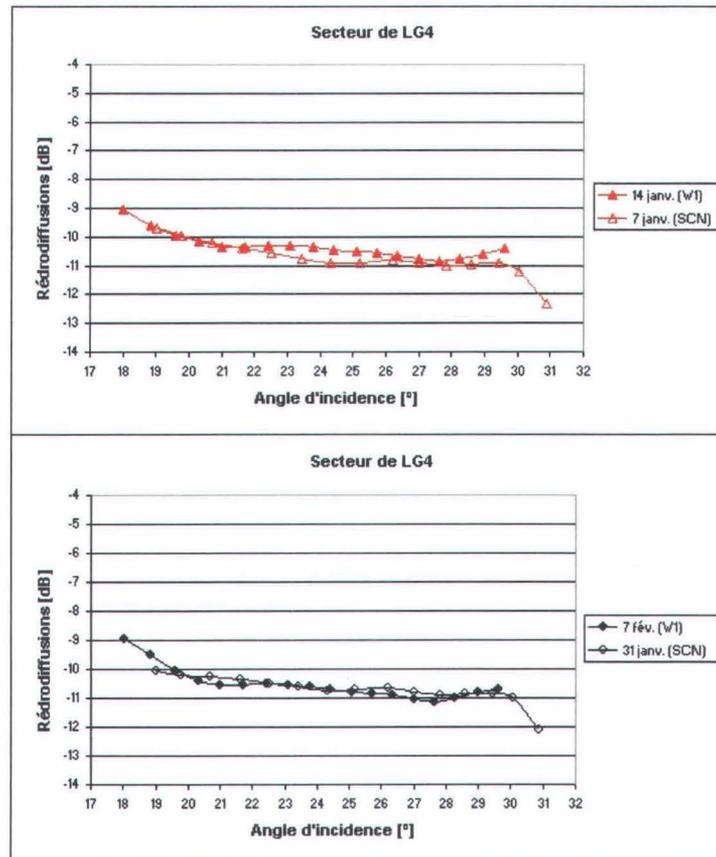


Figure 15 : Comparaison des modes Wide (W1) et ScanSAR Narrow (SCN) en milieu d'hiver

5.3 Application d'EQueau aux sites d'échantillonnages

Selon la même méthodologie qu'à la section 3.1, les équivalents en eau ont été estimés pour les sites d'échantillonnages inclus sur l'image Wide, c'est-à-dire les sites INRS situés entre l'aéroport de LG4 et l'aéroport de Fontanges et les sites HQ de Lac-Bertrand et Lac-Sauvolles. Les rétrodiffusions moyennes de chaque site ont été extraites sur une zone de 350m X 700m, pour les images du 27 novembre, 14 janvier et 7 février. Nous ne possédons aucune donnée de terrain et aucune image ScanSAR Narrow pour la période correspondant à l'image du 3 mars et nous n'utiliserons donc pas cette image à ce stade de la validation. Rappelons que l'image du 27 mars est également inutilisable pour cette application (neige humide). Tout comme pour le mode ScanSAR Narrow, ce sera l'image de la fin novembre qui sera utilisée comme image de référence. D'autre part, l'algorithme utilisé est le même qu'en mode ScanSAR Narrow et les densités utilisées sont celles correspondant aux bassins de LG3, LG4 et Laforge en mode opérationnel. Les seules comparaisons possibles entre les deux modes sont donc pour les couples "7 janvier (SCN) / 14 janvier (W1)" et "31 janvier (SCN) / 7 février (W1)". Dans le premier cas, les données de terrain sont disponibles pour les sites HQ et dans le second cas, elles le sont pour les sites INRS.

La figure 16 compare donc les équivalents en eau mesurés aux sites d'échantillonnages, avec les équivalents en eau estimés localement pour ces mêmes sites, et ce, dans les deux modes. On constate que l'écart entre les valeurs estimées et mesurées est similaire pour les deux modes. Rappelons que l'écart-type sur les valeurs moyennes mesurées est de 25mm en janvier La figure 17, quant à elle, compare uniquement les équivalents en eau estimés et confirme que les deux modes donnent des résultats comparables, quoiqu'on remarque des valeurs légèrement plus élevées en mode ScanSAR Narrow. Quatre sites donnent des résultats très différents mais ils ne correspondent pas à un secteur spécifique ou à une occupation du sol particulière. Cette différence est probablement reliée à des changements environnementaux d'ordre local. En résumé, pour les deux périodes possibles, l'application de l'algorithme au niveau local donne des résultats comparables dans les deux modes, avec toutefois des valeurs un peu plus faibles en mode Wide (9mm).

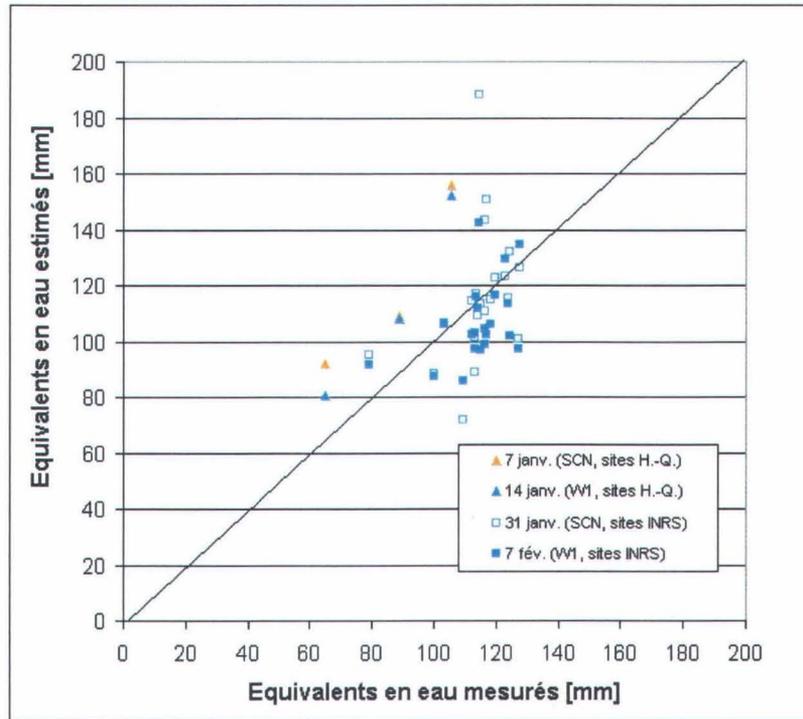


Figure 16 : Comparaison des équivalents en eau estimés et mesurés aux sites à partir du mode Wide et du mode ScanSAR Narrow

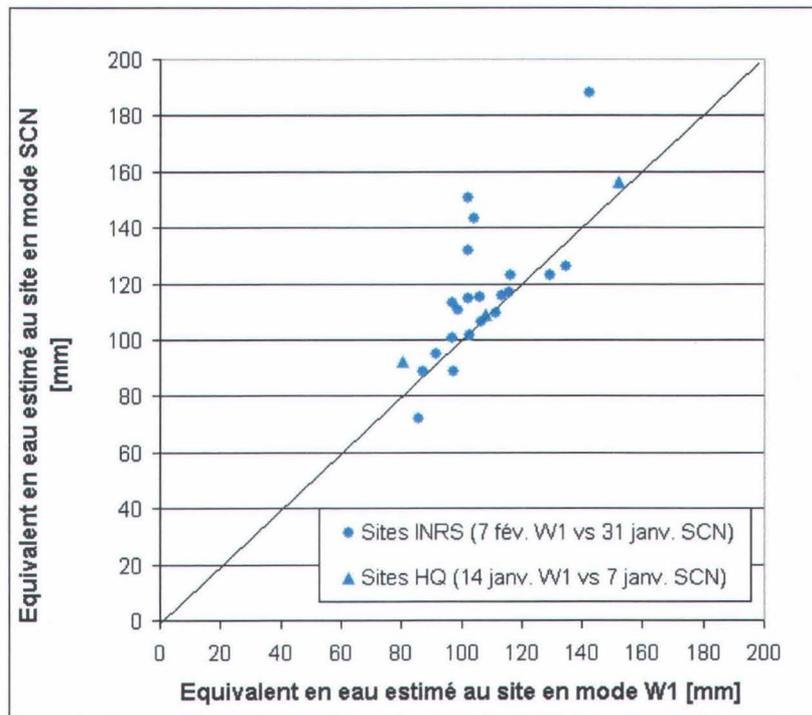


Figure 17 : Comparaison des équivalents en eau estimés aux sites à partir du mode Wide et du mode ScanSAR Narrow

3.4 Application d'EQeau aux images en mode Wide

EQeau a été appliqué sur les images Wide en utilisant l'image de référence du 27 novembre et les mêmes densités que lors de l'application opérationnelle sur les images ScanSAR Narrow (secteur LG4). La figure 18 présente pour le secteur commun, les cartes d'équivalents en eau du début janvier produites à partir des images des deux modes. Sur une telle carte où les valeurs sont regroupées en classes, on constate que les équivalents en eau sont principalement compris dans les classes <150 mm, quel que soit le mode. On remarque toutefois que sur la carte Wide, les valeurs sont souvent une classe au-dessus de la carte ScanSAR Narrow. Avec une comparaison plus détaillée de maille (500 m) à maille (500 m), la figure 19 permet de constater que les estimés du mode Wide sont effectivement plus élevés, mais d'une dizaine de millimètres seulement.

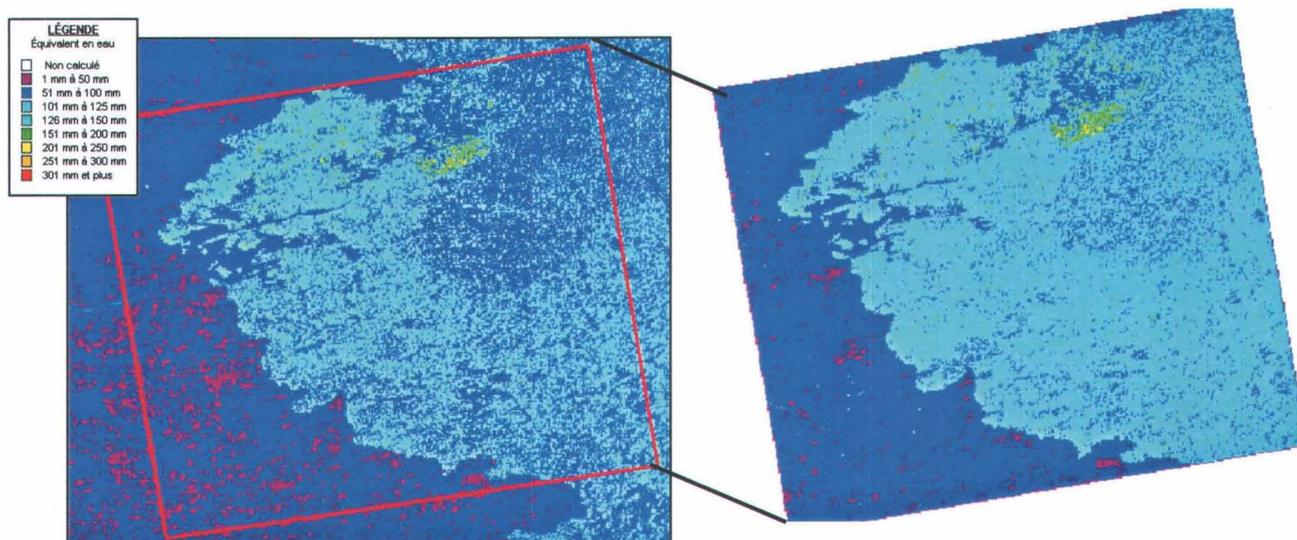
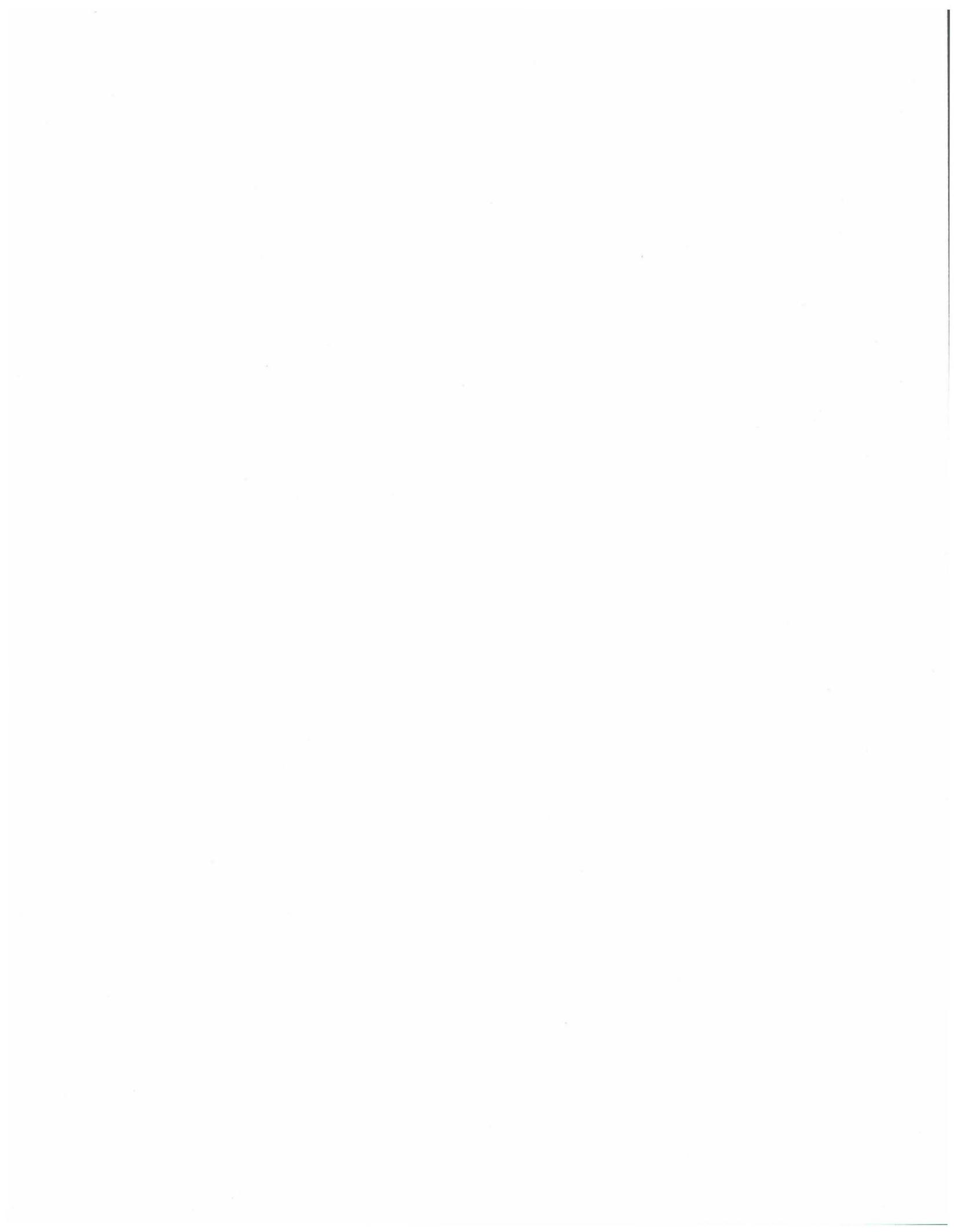


Figure 18 : Cartes d'équivalents en eau du début janvier produites à partir des images des modes ScanSAR Narrow (gauche) et Wide1 (droite).



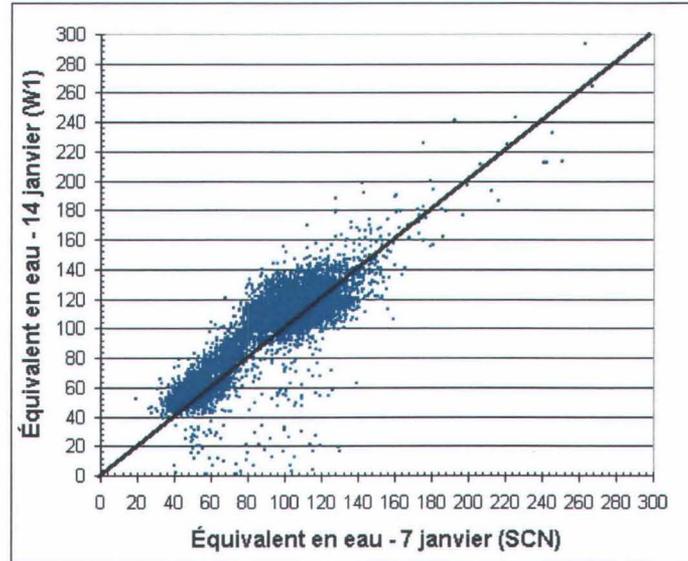


Figure 19 : Comparaison maille par maille des cartes d'équivalents en eau du début janvier produites à partir des images des modes ScanSAR Narrow et Wide1.

Le même exercice est repris aux figures 20 et 21, pour les données du 31 janvier et du 7 février. Dans ce cas, les deux modes donnent des résultats sensiblement identiques. L'image Wide donne des résultats plus élevés de 3 mm en moyenne.

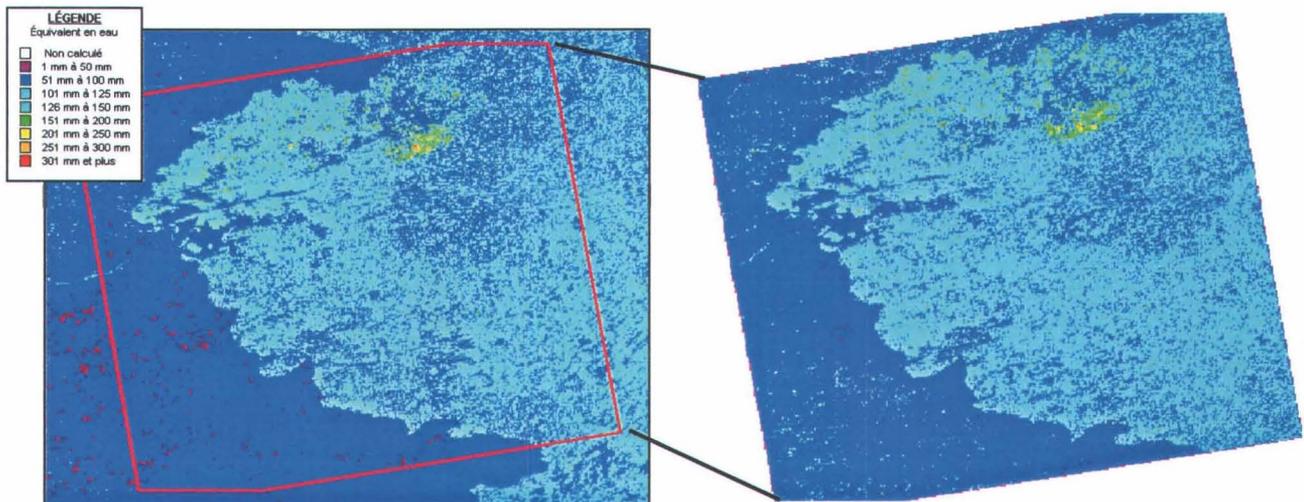


Figure 20 : Cartes d'équivalents en eau du début février produites à partir des images des modes ScanSAR Narrow et Wide1

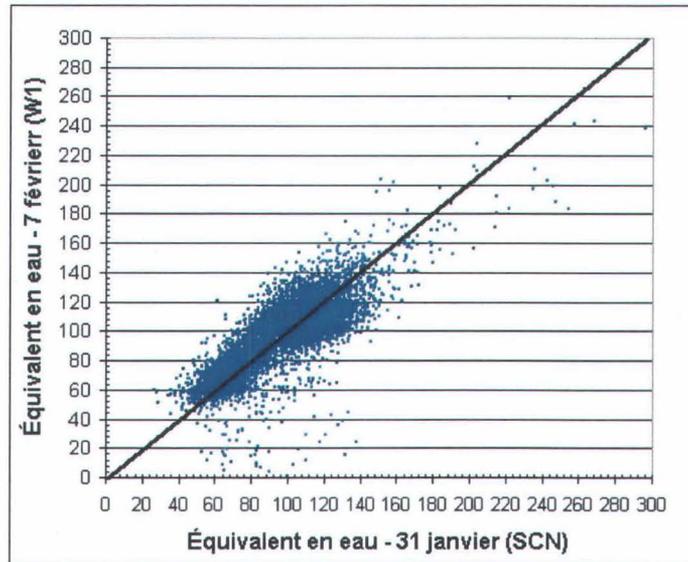


Figure 21 : Comparaison maille par maille des cartes d'équivalents en eau du début février produites à partir des images des modes ScanSAR Narrow et Wide1.

Compte tenu des différentes caractéristiques des deux modes, les résultats obtenus avec le mode Wide concordent avec ceux obtenus du mode ScanSAR Narrow en janvier et février, ce qui donne une plus grande assurance sur la qualité radiométrique du mode ScanSAR Narrow.

Finalement, EQeau a aussi été appliqué sur l'image du 3 mars. Il s'agit toutefois de la seule image acquise à cette période et nous ne disposons de données terrain que pour les périodes de la mi-février et de la mi-mars. Les densités mesurées à ces deux périodes sont similaires pour le secteur LG4-Caniapiscau (220 à 230 kg/m³ en général) et en légère augmentation pour le secteur LG2-LG3 (passant de 150-160 kg/m³ à 160-170 kg/m³). On verra donc sur la figure 22, qu'entre les cartes du 3 mars et du 20 mars, les équivalents en eau sont comparables pour le secteur LG4-Caniapiscau mais en augmentation pour le secteur LG2-LG3. Puisque ces deux cartes sont séparées par 17 jours, la comparaison maille à maille n'est pas ici pertinente.



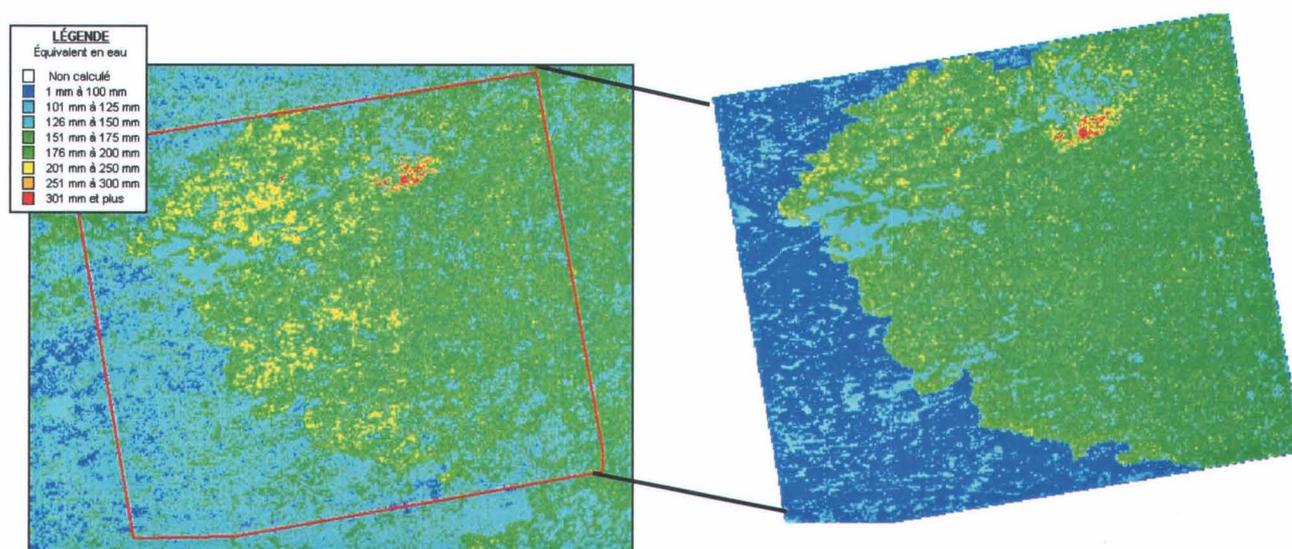


Figure 22 : Cartes d'équivalents en eau produites à partir des images du mode ScanSAR Narrow (20 mars, à gauche) et Wide1 (3 mars, à droite)



6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

6.1 Conclusion

Rappelons d'abord que l'hiver 2000-2001 représente la première année d'utilisation des images RADARSAT de type ScanSAR Narrow (2 faisceaux) dans le cadre du projet EQeau (Annexe 4). En date du 30 juin, nous avons réalisé et complété trois des cinq objectifs prévus pour l'année 2001, et formé de nouveaux membres du personnel d'Hydro-Québec aux relevés de terrain, ainsi qu'au logiciel et à l'approche d'EQeau.

Premièrement, les images ScanSAR Narrow, acquises les 17, 20 et 23 novembre 2000, ont été choisies à titre d'images de référence pour le calcul des rapports de rétrodiffusion. Ces images ont été préférées à celles d'octobre parce que les conditions environnementales sont généralement homogènes pour les trois images, le sol étant gelé et le couvert de neige étant inférieur à 10 cm et qu'aucun artefact n'est observé sur les images.

Deuxièmement, les artefacts rencontrés avec les images ScanSAR Wide à l'hiver 2000 n'ont pas été observés sur les images ScanSAR Narrow. Il n'y a pas eu de problème à appareiller les trois cartes issues des trois images différentes lors de la construction des mosaïques. La répartition spatiale estimée par EQeau correspond généralement aux relevés ponctuels d'Hydro-Québec. De plus, les équivalents en eau moyens estimés par EQeau pour les sous-bassins 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 sur le bassin de La Grande à l'hiver 2001, et de leur incertitude, le choix de densités représentatives pour l'étalonnage d'EQeau a été difficile, d'où la nécessité d'examiner les moyens d'obtenir des mesures de terrain plus fiables. De plus, les valeurs de densités mesurées étant fort différentes d'un sous-bassin à l'autre, cela entraîne une segmentation des cartes par sous-bassins. Pour l'an prochain, nous envisageons d'utiliser une interpolation par polygone de Thyssen et/ou une pondération en fonction de l'altitude afin que les cartes représentent mieux la variabilité spatiale du couvert nival.

Troisièmement, l'analyse de la variation temporelle du signal des images ScanSAR Narrow, montre que cette variation correspond bien aux conditions environnementales observées sur le terrain ce qui est rassurant quant à la qualité radiométrique des images. Il n'y a qu'une seule

exception sur les 15 images acquises. Le signal radar de l'image du 17 mars est plus faible dans son extrémité ouest que celui des deux autres images de mars, ce qui se traduit par des valeurs d'équivalents en eau plus faibles sur le secteur Caniapiscau à la mi-mars (Annexe 3). Aussi, le signal radar des images ScanSAR Narrow a été comparé avec le signal d'images Wide acquises lors de la même période. Tant en novembre qu'en hiver, les rétrodiffusions sont très similaires. Ainsi, l'application de l'algorithme pour chacun des sites d'échantillonnages donne des résultats semblables dans les deux modes, avec toutefois des valeurs un peu plus faibles en mode Wide (10 mm). En comparant les cartes produites par les deux modes, maille à maille (500m), on se rend compte que les deux modes donnent là aussi des résultats sensiblement identiques, avec une différence moyenne de 10 mm en janvier et de 3 mm en mars, à la faveur cette fois, du mode SCN. Ces résultats confirment la stabilité du système RADARSAT et la qualité radiométrique des images ScanSAR Narrow.

En plus, vu la qualité des images ScanSAR Narrow, nous avons aussi pu valider l'algorithme d'EQeau (Objectif 4a), ce qui avait été malheureusement impossible l'an dernier. Nous avons montré que les données de janvier 2001 suivaient la tendance générale des années antérieures mais nous avons dû abaisser l'ordonnée à l'origine afin de mieux centrer la relation et ce, durant le volet opérationnel. La raison de ce changement est liée au fait que les rapports de rétrodiffusion antérieurs provenaient d'images de référence où le sol n'était pas gelé.

Dans les prochains mois, nous regarderons à la fois les rapports de rétrodiffusion et les résistances thermiques pour l'ensemble des images acquises depuis 1997 afin de raffiner l'algorithme d'EQeau avant la prochaine saison hivernale (objectif 4b). De plus, nous testerons aussi la version MapX d'EQeau, et au besoin, y feront des modifications mineures, en collaboration avec VIASAT, afin que cette version soit conviviale, performante et opérationnelle pour la prochaine saison (objectif 5). Finalement, nous assisterons Hydro-Québec dans la planification des acquisitions de nouvelles images RADARSAT et la réalisation d'une campagne de terrain automnale. Les résultats de l'hiver 2001 seront aussi présentés au colloque *Remote Sensing and Hydrology* qui se tiendra à Montpellier, du 2 au 5 octobre 2001.

6.2 **Recommandations pour la saison 2001-2002**

6.2.1 **Recommandations pour le volet opérationnel d'EQeau (Hydro-Québec)**

- Planifier une campagne d'automne afin de rendre fonctionnelle les trois stations climatologiques avant le début des accumulations de neige.
- Les images ScanSAR Narrow (350 km X 350 km) s'étant montré fiables, acquérir deux ou trois séries d'images 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 et utiliser les images de novembre 2000 comme images de référence dans la version MapX d'EQeau .
- Poursuivre la réalisation des lignes de neige d'Hydro-Québec au même moment que les acquisitions d'images RADARSAT.
- Suite l'évolution temporelle particulière de la rétrodiffusion, éliminer la classe brûlis du calcul de l'équivalent en eau tout comme cela se fait pour les lacs et réservoirs.

6.2.2 **Recommandations pour le volet recherche d'EQeau (INRS-Eau)**

- À l'automne 2001, vérifier les diverses sondes installées dans le secteur LG4/Caniapiscou et installer de nouvelles sondes de température afin de suivre en continu l'évolution de la température du sol, d'en déterminer les minimums et de mieux comprendre l'évolution du signal radar.
- Demander l'acquisition d'une nouvelle série d'images ScanSAR Narrow à l'automne 2001 afin de s'assurer de la stabilité temporelle du système RADARSAT et de valider l'emploi des images de novembre 2000 comme images de référence.
- Afin de recueillir de nouvelles données pour la validation de l'algorithme, réaliser en collaboration avec Hydro-Québec, deux campagnes hivernales (janvier et mars 2002).
- Afin d'améliorer la représentation cartographique, raffiner les méthodes de répartition spatiale des densités (sous-bassins, occupation du sol) utilisées dans l'approche EQeau, en testant les polygones de Thyssen ou une pondération en fonction de l'altitude.

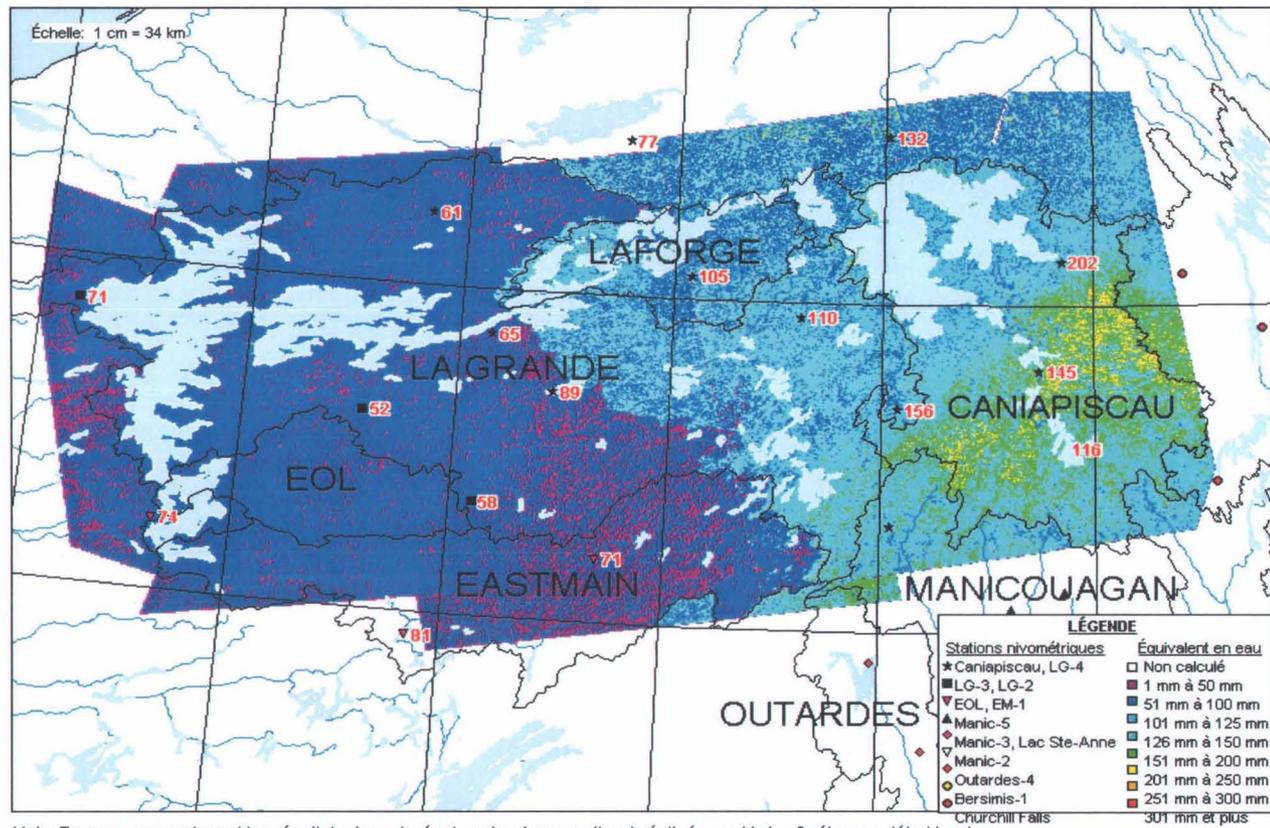
- Afin d'améliorer la précision des estimés à l'échelle locale (au site) et régionale (sous-bassin), étudier et mettre à jour les paramètres de l'algorithme d'EQueau en utilisant l'ensemble des données radar acquises depuis 1994 (Annexe 4). Explorer la possibilité de déterminer les paramètres à utiliser en fonction de conditions environnementales spécifiques lors des acquisitions d'images, réévaluer l'échelle utilisée pour calculer la rétrodiffusion aux sites d'échantillonnages et les filtres utilisés, s'assurer de la validité des résistances thermiques calculées aux sites, modifier l'algorithme le cas échéant (logarithmique au lieu de linéaire).
- En collaboration avec le personnel d'Hydro-Québec, développer des outils pour extraire d'avantage d'informations des produits d'EQueau (cartes, statistiques) afin d'optimiser le réseau au sol, la compréhension de la dynamique du couvert nival et le développement d'un modèle de prévision distribué.
- En collaboration avec le personnel d'Hydro-Québec, évaluer de nouveaux outils de mesure des densités *in situ* (SNOWPOWER, Gamma,...).

RÉFÉRENCES

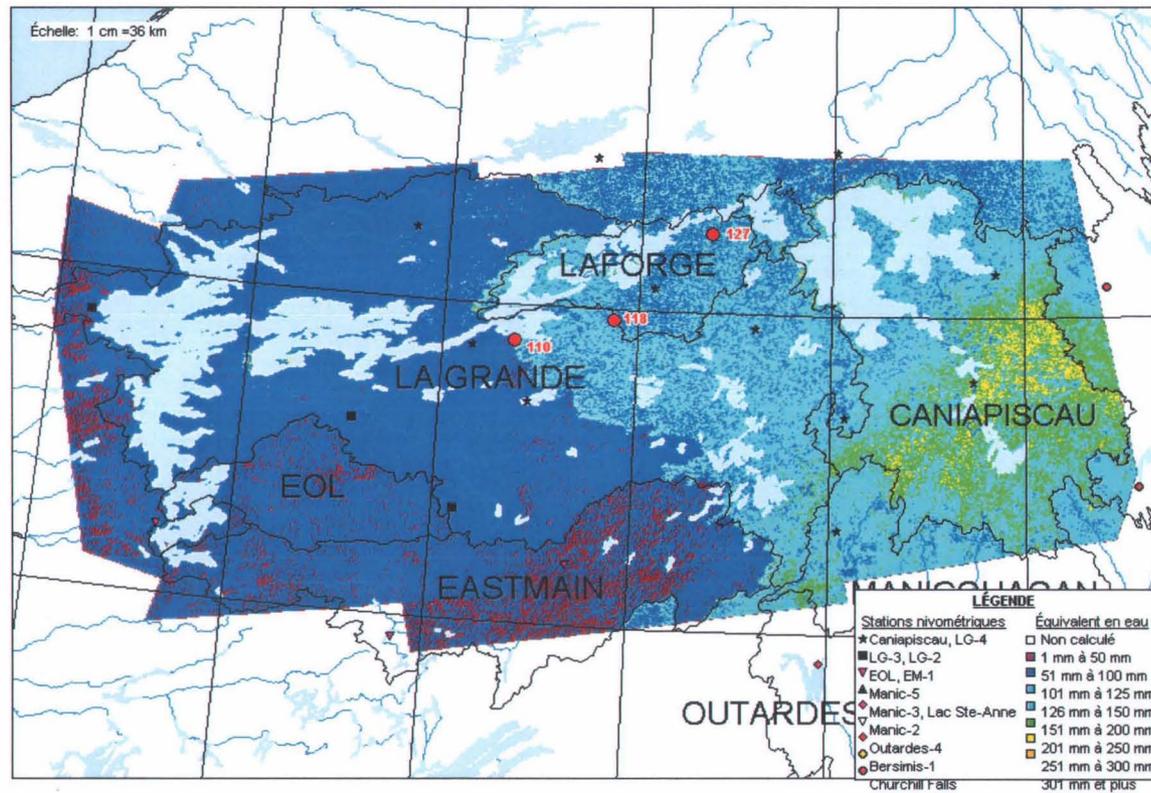
- HYDRO-QUEBEC (2001). EQeau - Bilan de la campagne 2000-2001 et recommandations. Rapport interne, Équipe Préviation des apports, Unité Prévisions et ressources hydriques, Hydro-Québec, 13 juin 2001.
- LAGACÉ, C. et BERNIER, M. (2000). Développement d'une approche pour le suivi du gel saisonnier à partir de l'utilisation conjointe d'images RADARSAT et d'images SSM/I. Proceedings of Eastern Snow Conference, juin.



ANNEXE 1 : MOSAÏQUE DES ÉQUIVALENTS EN EAU DU DÉBUT JANVIER

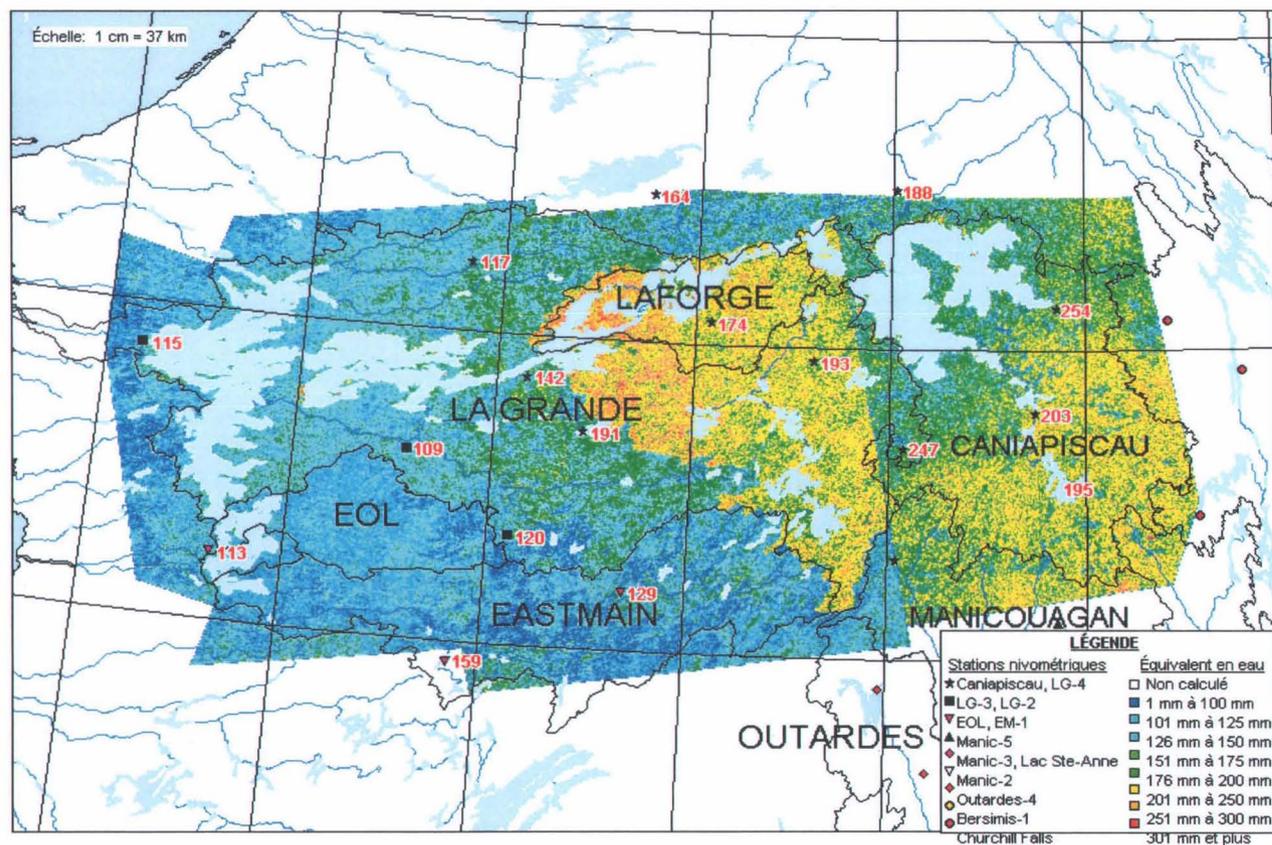


ANNEXE 2 : MOSAÏQUE DES ÉQUIVALENTS EN EAU DU DÉBUT FÉVRIER



Note: En rouge apparaissent les résultats des relevés de neige moyen (en mm d'eau) réalisé par l'INRS-Eau

ANNEXE 3 : MOSAÏQUE DES ÉQUIVALENTS EN EAU DE LA MI-MARS



Note: En rouge apparaissent les résultats (en mm d'eau) des relevés de neige réalisés par Hydro-Québec à la mi-mars

ANNEXE 4 : TYPES D'IMAGES ACQUISES DEPUIS 1994

Année	Satellite	Mode principal	Mode expérimental	Couverture	Résolution	Secteur à l'étude
1994	ERS-1	-	Standard	100 km X 100 km	30 m	LG4, LA1
1995	ERS-1	-	Standard	100 km X 100 km	30 m	LG4, LA1
1996						
1997	RADARSAT-1	Standard (S1)	ScanSAR Wide (SCW)	100 km X 100 km	30 m	LG4, LA1
1998	RADARSAT-1	Standard (S1)	ScanSAR Wide (SCW)	100 km X 100 km	30 m	LG4, LA1
1999	RADARSAT-1	Wide (W1)	ScanSAR Wide (SCW)	165 km X 165 km	30 m	LG4, LA1, Caniapiscau
2000	RADARSAT-1	ScanSAR Wide (SCW)		500 km X 500 km	100 m	La Grande
2001	RADARSAT-1	ScanSAR Narrow (SCN)	Wide (W1)	300 km X 300 km	50 m	La Grande