

**VALIDATION DE LA CARTOGRAPHIE DU GEL
DU SOL À L'AIDE D'IMAGES
RADARSAT-1**

Rapport de recherche R-1119 1^{er} décembre 2009

Validation de la cartographie du gel du sol à l'aide d'images RADARSAT-1

Par

Jean-Thomas Denault
Monique Bernier

Institut national de la recherche scientifique
Centre Eau, Terre et Environnement
490, rue de la Couronne
Québec (Québec) G1E 2H8

Présenté à

Agriculture et Agroalimentaire Canada
1341, chemin Baseline
Ottawa (Ontario) K1A 0C5

Rapport de recherche R-1119

Le 1^{er} décembre, 2009

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCTION | 1 |
| 2. ANALYSE DES DONNÉES D’HUMIDITÉ ET DE TEMPÉRATURE DU SOL RECUEILLIES SUR LES BASSINS VERSANTS DU BRAS D’HENRI ET DE BLACK BROOK | 3 |
| 2.1. Méthodologie employée | 3 |
| 2.2. Variation temporelle et spatiale de l’humidité du sol (BDH) | 3 |
| 2.2.1. Mesures en continu | 3 |
| 2.2.2. Mesures prises lors de la saisie des images | 6 |
| 2.3. Variation temporelle et spatiale des températures du sol | 9 |
| 2.3.1. Mesures en continu | 9 |
| 2.3.2. Mesures prises lors de la saisie des images | 10 |
| 3. DÉTERMINATION DES MODÈLES DE RÉTRODIFFUSION À L’ÉCHELLE DU MICRO- BASSIN D’INTERVENTION | 11 |
| 3.4. Méthodologie employée | 11 |
| 3.5. Résultats | 11 |
| 4. AUTRES AVENUES À EXPLORER | 23 |
| 4.1. Vérification de l’hypothèse de l’utilisation de la différence en dB entre deux images d’une même année pour déterminer les zones de gel | 23 |
| 4.2. Utilisation de modèles semi-empiriques | 31 |
| 5. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS | 33 |
| 5.3. Recommandations sur l’utilisation des modèles de régression en dehors des zones de calibration. | 33 |
| 5.4. Autres avenues à explorer | 34 |
| 6. RÉFÉRENCES | 35 |
| ANNEXE 1A. BDH- Analyse des conditions météos lors de prise de l’image RADARSAT | 37 |
| ANNEXE 1B. BDH- Analyse des conditions météos lors de prise de l’image RADARSAT | 39 |

| | |
|--|-----------|
| ANNEXE 1D. BBW - Analyse des conditions météos lors de prise de l'image RADARSAT..... | 43 |
| ANNEXE 2A. BDH- Analyse des températures du sol lors de prise de l'image RADARSAT..... | 45 |
| ANNEXE 2B. BDH- Températures mesurées aux thermocouples (-1 et -5 cm) lors des passages de RADARSAT-1..... | 47 |
| ANNEXE 3. BDH- Régression entre les différents points de mesures et la température mesurée au thermocouple..... | 49 |
| ANNEXE 4. Classification des images RADARSAT grâce à EASI modelling de PCI geomatic..... | 51 |
| ANNEXE 5. Cartes de gel pour les hivers 2006-2007-2008 | 53 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1. Mesures d'humidité du sol aux points de contrôles du MBI | 7 |
| Tableau 2. Teneur en eau du sol et profondeur de gel mesurés à la météo de MBI | 8 |
| Tableau 3. Test de signifiante de différents facteurs retrouvés dans le micro-bassin du Bras d'Henri..... | 12 |
| Tableau 4. Seuils possibles et intervalles de confiance selon différents scénarios testés. Les valeurs en bleu sont les valeurs utilisées dans la création des cartes..... | 20 |
| Tableau 5. Seuils déterminés dans le cadre de GRIP-I et vérification si ces seuils tombent dans l'intervalle de confiance des données déterminées dans le cadre de GRIP-II (MBI vs BDH). | 21 |
| Tableau 6. Seuils déterminés dans le cadre de GRIP-I (Khaloune et al, soumis..... | 21 |
| Tableau 7. Modèles des régressions pour des points de mesures constants | 22 |

Liste des figures

| | | |
|-------------|---|----|
| Figure 1. | Relation entre température mesurée (thermocouples, -10, -15 et -30cm) et teneur en eau du sol (TDR, 15-30 cm) à la station météo du MBI pour les hivers 2006-2007-2008-2009..... | 4 |
| Figure 2. | Relation entre température moyenne (HOBO, -5cm; n=43) et teneur en eau moyenne du sol (ECH2O, -5 cm; n=8) au cours de l'hiver 2008-09. | 5 |
| Figure 3. | (a) Relation entre température et teneur en eau du sol pour les données recueillies à la station météo (TDR) et grâce aux sondes ECH ₂ O (b) Relation entre température et teneur en eau du sol présentée par Spaans and Baker (1996)..... | 6 |
| Figure 4. | (a-f) Températures moyennes du sol mesurées à différentes profondeurs pour les bassins BDH et BBW pour les hivers 2007, 2008 et 2009 | 9 |
| Figure 5. | Angle de visée du satellite déterminé en fonction de l'orientation des parcelles et résultats de coefficients de rétrodiffusion moyens déterminés à partir des images filtrées (LEE 5x5) du 20 février 2007 et du 16 mars 2007..... | 13 |
| Figure 6. | Régression entre température mesurée (°C; axe horizontal) et coefficient de rétrodiffusion (dB; axe vertical) selon différents groupes de points de mesure | 15 |
| Figure 7. | Comparaison entre température mesurée aux Hobos (°C; axe horizontal) et coefficient de rétrodiffusion (dB; axe vertical) entre BDH et BBW | 16 |
| Figure 8. | Exemple de relation entre l'humidité du sol et les coefficients de rétrodiffusion mesurés | 17 |
| Figure 9. | Relation théorique entre (a) la teneur en eau volumétrique et la constante diélectrique du sol (Ulaby <i>et al.</i> 1986) et (b) le coefficient de rétrodiffusion..... | 18 |
| Figure 10. | Relation entre % d'humidité du sol mesuré au TDR (-10 cm) et coefficient de rétrodiffusion RADARSAT-1 avec (a) peu de résidus (b) beaucoup de résidus. | 19 |
| Figure 11. | Relation entre la teneur en eau au TDR et la température mesurées aux thermocouples (-5cm) pour les hivers 2006-07 et 2007-08..... | 19 |
| Figure 12. | Coefficients de rétrodiffusion moyens mesurés sur l'ensemble du bassin versant du Bras d'Henri et de Black Brook | 24 |
| Figure 13c. | Différence de classification par différences de dB au cours de l'hiver 2005-2006 | 26 |
| Figure 14. | Différence de classification par différences de dB au cours de l'hiver 2007-2008 | 28 |
| Figure 15c. | Différence de classification par différences de dB au cours de l'hiver 2008-2009 | 30 |

1. Introduction

Le projet GRIP 2 (*Government related initiatives program*/Programme des initiatives connexes du gouvernement) est financé par l'Agence spatiale canadienne et fait suite au projet GRIP 1 dont l'objectif était d'évaluer la faisabilité de mesurer et de cartographier le gel du sol par les images radar à synthèse d'ouverture (RSO) à faible résolution (Radarsat-1 : 9m) à l'échelle du bassin versant du Bras d'Henri. Une méthodologie de classification des images RADARSAT-1 avait alors été développée. Cette méthodologie consistait en la détermination de différents seuils fonction de paramètres de texture de surface du sol et d'utilisation du sol sous lesquels le sol était considéré comme gelé. L'objectif du projet GRIP 2 est de développer un système intégré d'aide à la décision (SIAD) utilisant les images RADARSAT-2 pour gérer le risque d'érosion des sols pendant la fonte printanière des neiges à l'échelle du bassin versant. Le Dr. Eric van Bochove est responsable du projet, et il est accompagné du chercheur postdoctoral Dr. Jalal Khaldoune ainsi que de quatre collaborateurs : Michel C. Nolin (Ph.D., chercheur en pédologie appliquée à l'agroenvironnement), Lien Chow (Ph.D. chercheur en santé environnementale), Glenn Benoy (Ph.D. chercheur en santé environnementale) et la Pr. Monique Bernier (Institut National de Recherche Scientifique - Eau Terre & Environnement). Ce projet fait appel à deux partenaires en plus de ceux de l'Agence Spatiale Canadienne : Yves Lavergne, directeur technique en agroenvironnement de la Direction générale en environnement d'AAC, et Jean-Louis Daigle, directeur du Centre de Conservation des Sols et de l'Eau de l'Est du Canada, à Saint-André (Nouveau-Brunswick).

L'objectif général de cette étude est de valider les modèles de classification de RADARSAT-1 développés dans le cadre du projet GRIP-1 et apporter les améliorations nécessaires afin de l'adapter aux caractéristiques des bassins versants Black Brook (NB) et Bras d'Henri (QC). Pour ce faire, une analyse de l'ensemble des données recueillies sur le terrain est effectuée au chapitre 2. Par la suite, de nouveaux modèles de régressions des coefficients de rétrodiffusion (dB) des images RADARSAT-1 sont proposés en fonction des données recueillies au cours de hiver 2006-2007 et 2008 dans le bassin versant du Bras d'Henri et des données des hivers 2007 et 2008 dans le bassin versant Black Brook. Ces modèles seront ensuite comparés à ceux produits dans le cadre du projet GRIP-I (Chapitre 3). Différentes approches seront ensuite suggérées afin d'améliorer les performances de la cartographie du gel du sol (Chapitre 4).

2. Analyse des données d'humidité et de température du sol recueillies sur les bassins versants du Bras d'Henri et de Black Brook

2.1. Méthodologie employée

En premier lieu, l'analyse de la relation entre la température du sol et la teneur en eau volumétrique mesurée à l'aide Time Domain Reflectometry (TDR) est présentée afin de bien comprendre l'impact du gel du sol sur les teneurs en eau libre du sol. Ensuite, une analyse de l'ensemble des données de température recueillies sur le terrain à l'aide de thermocouples et de thermomètres HOB0® (Southern MA, USA) a été effectuée afin de mieux comprendre la variabilité du gel saisonnière du sol.

2.2. Variation temporelle et spatiale de l'humidité du sol (BDH)

Des données d'humidité du sol ont été recueillies dans le bassin versant du Bras d'Henri pour chacune des années de saisies d'image; que ce soit en continu ou synchronisée avec le passage du satellite. Toutefois, l'intensité de l'échantillonnage a varié au cours des 3 années. Ainsi, pour les années 2006-07 et 2007-08, les données en continu étaient mesurées aux 2 stations météo du projet WEBS et des données ponctuelles étaient saisies sur une série de points de mesures. En 2008-2009, des instruments ECH₂O (Decagon, WA, USA) permettant la saisie automatisée de l'humidité du sol ont été installés aux points de contrôles du MBI.

2.2.1. Mesures en continu

La mesure des données en continu permet de constater l'étroite relation en la température du sol et le taux d'humidité mesuré par Time Domain Reflectometry (TDR). La figure 1 présente la relation entre le contenu en eau mesuré (-15 à -30 cm) par TDR et la température moyenne mesurée (-10;-15;-30) d'un profil de sol mesurée à la station météo du bassin d'intervention au cours des 2006 à 2009. Dans cette figure on remarque que la température du sol mesurée aux thermocouples est plus sensible que la mesure d'humidité du sol puisque ce dernier intègre un volume plus important de sol.

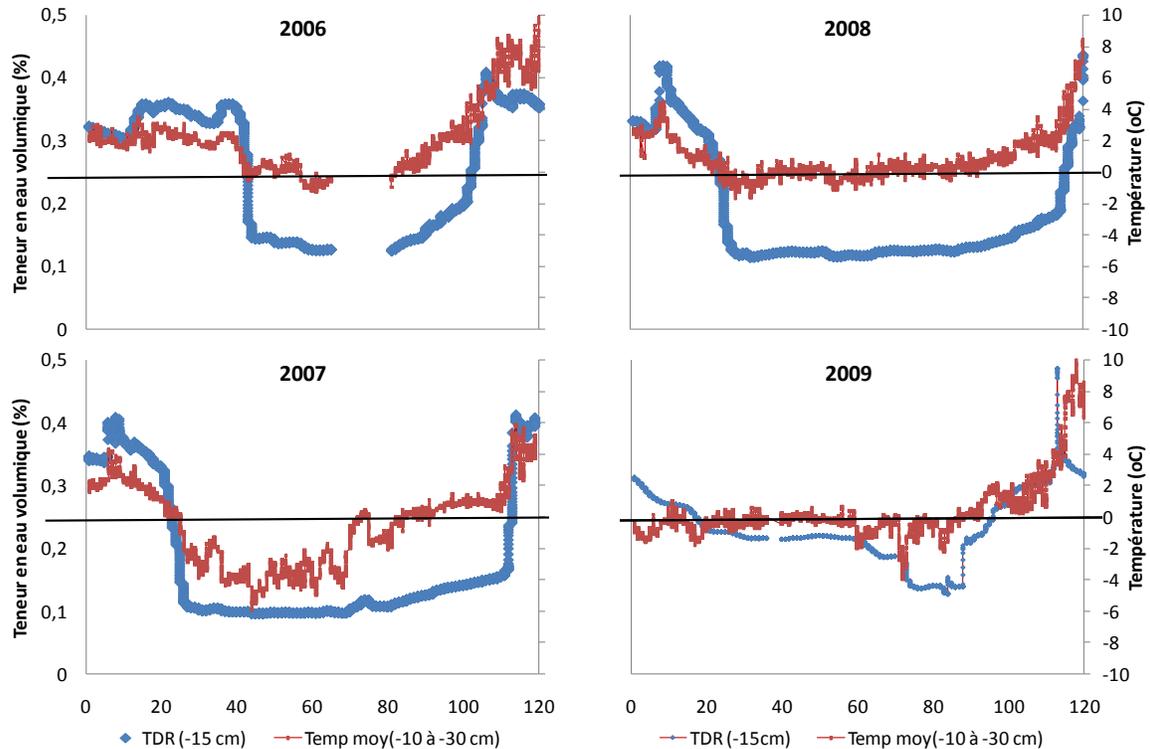


Figure 1. Relation entre température mesurée (thermocouples, -10, -15 et -30cm) et teneur en eau du sol (TDR, 15-30 cm) à la station météo du MBI pour les hivers 2006-2007-2008-2009.

Au cours de l'hiver 2008-09, 20 sondes de mesures d'humidité ECH₂O ont été acquises et installées aux mêmes endroits que les profils de thermocouples. Malheureusement, de nombreux problèmes furent rencontrés. Tout d'abord, il nous a été impossible de retracer le dispositif qui liait le nom des sondes à leurs localisations sur le terrain. Ainsi, seules les tendances moyennes de l'humidité de surface peuvent être interprétées. Également, de nombreuses sondes semblent ne pas avoir fonctionné correctement (12/20) soit dû à une mauvaise installation; des pannes de batteries ou par le bris du matériel par des rongeurs. Ainsi, seulement 8 fichiers ont été recueillis et seulement 4 ont saisi des données jusqu'à la fin mars. Ces données ont toutefois pu être mis en relation avec les valeurs de températures mesurées par HOBO (installés à -5 cm) (figure 2). Sur cette figure, il est possible de constater que la relation température et humidité est encore plus forte probablement du au fait que les deux appareils intègrent un volume de sol comparable. On constate que l'humidité du sol semble suivre 3 grandes phases en fonction des températures mesurées :

1. Lorsque la température est inférieure à -1°C, les variations de température affectent très peu les teneurs en eau libre du sol. L'ensemble de l'eau des macropores est alors probablement gelé et l'eau interstitielle permet de garder la mesure du TDR aux alentours de 5 à 14 % (figure 2b).

2. Lorsque la température du sol se réchauffe et qu'elle se rapproche de 0°C, la teneur en eau libre va graduellement augmenter. De -1 à 0°C, la teneur en eau a varié linéairement de 10 à 20% (figure 2b). Ces valeurs de teneurs en eau indiquent la présence d'eau libre dans le sol et sont fréquemment observées au cours des mois d'été.
3. Lorsque la température dépasse le point de congélation, alors la teneur en eau libre augment très rapidement dû à la fonte de la glace. Lorsque les températures demeurent au dessus du point de congélation pour une certaine période, on remarque toutefois que l'horizon de surface du sol va rapidement commencer à se déshydrater pour atteindre des teneurs en eau variant de 20 à 30%.

Il existe toutefois une zone d'incertitude aux alentours de 0°C, probablement liée soit à l'imprécision de la mesure; à la différence de volume de sol échantillonnée ou à la température de changement de phase de l'eau dans le sol. Ainsi, certains points se retrouvent avec des teneurs en eau libre variant de 10 à 45% alors que la majorité des points se situent entre 12 et 22 % dans l'intervalle de température allant de [-0.5;0.5] (Figure 3 a et b).

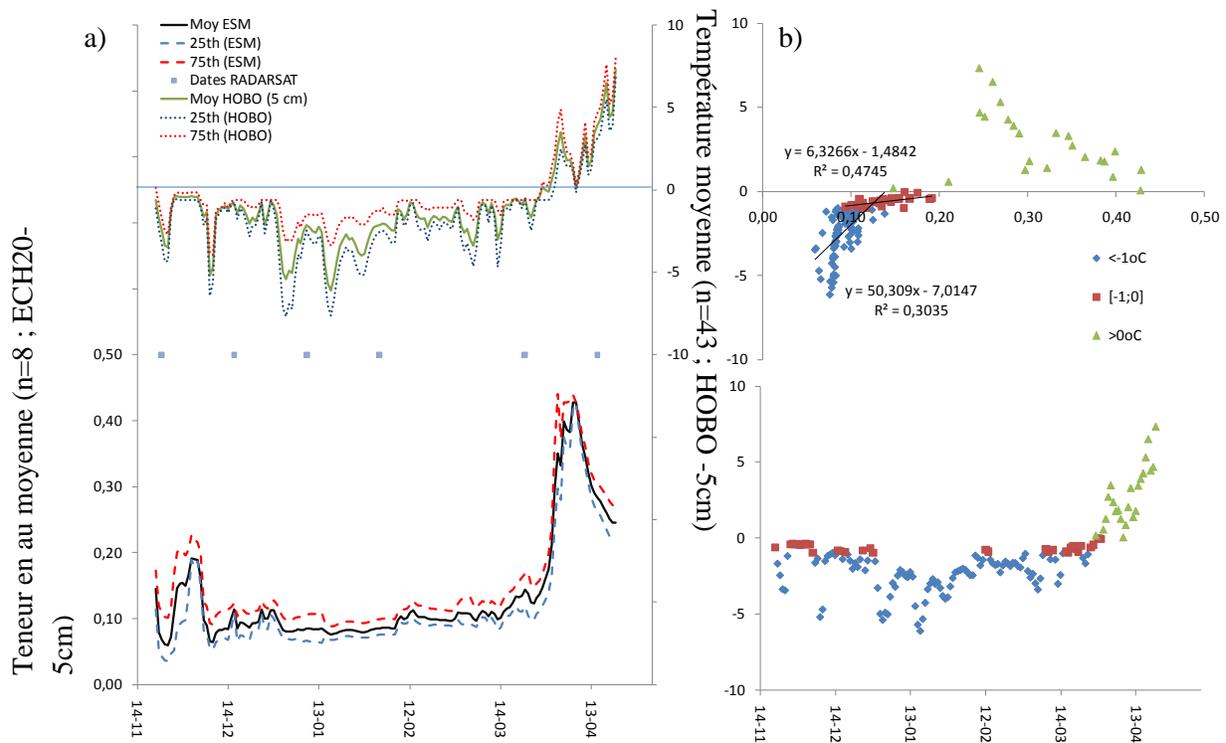


Figure 2. Relation entre température moyenne (HOBO, -5cm; n=43) et teneur en eau moyenne du sol (ECH2O, -5 cm; n=8) au cours de l'hiver 2008-09.

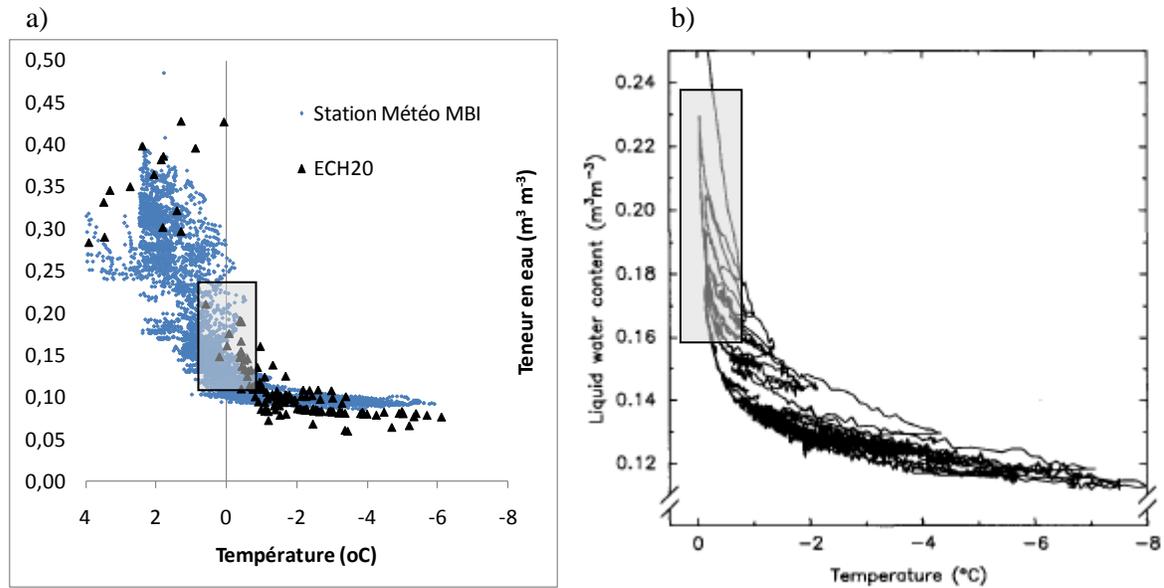


Figure 3. (a) Relation entre température et teneur en eau du sol pour les données recueillies à la station météo (TDR) et grâce aux sondes ECH₂O (b) Relation entre température et teneur en eau du sol présentée par Spaans and Baker (1996)

L'effet du gel du sol est analogue à l'assèchement apparent de celui-ci. La teneur en eau peut être prédite en fonction de la température du sol en fonction des caractéristiques de gel d'un sol (CGS). Ces caractéristiques sont souvent liées aux tensions matricielles agissant sur l'eau du sol de même qu'à la concentration de solutés présents dans la solution du sol (Spaans and Baker, 1996). La mesure de la teneur en eau libre du sol à l'aide de TDR est possible mais imprécise car les équations de conversion sont adaptées aux conditions de sols non gelés, où la constante diélectrique de l'air est différente de celle de la glace. Tel un sol qui se réhumecte, le dégel du sol présente un phénomène d'hystérèse, i.e. les teneurs en eau d'un sol en dégel seront inférieures à celles mesurées lors de l'implantation du gel pour des températures identiques (Spaans and Baker, 1996). Les teneurs en eau seront différentes pour chacun des cycles de gel-dégel puisque fonction des teneurs en eau lorsque le gel s'implante et dans la destruction des macropores causée par les gels antérieurs (figure 3b).

2.2.2. Mesures prises lors de la saisie des images

Une série de mesures au champ était synchronisée avec le passage du satellite afin de pouvoir saisir la variabilité spatiale de la donnée. Malheureusement, au cours de l'hiver 2008-09, beaucoup d'espoir était fondé sur les sondes ECH₂O qui n'ont pu fournir les données requises.

Tableau 1. Mesures d'humidité du sol aux points de contrôles du MBI

| FIELD ID | -5 cm | | | | -10 cm | | | | 15 cm | | | |
|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 2006-2007 | | | | | | | | | | | |
| | 27- janv- 07 | 20- févr- 07 | 16- mars- 07 | 29- mars- 07 | 27- janv- 07 | 20- févr- 07 | 16- mars- 07 | 29- mars- 07 | 27- janv- 07 | 20- févr- 07 | 16- mars- 07 | 29- mars- 07 |
| BCH1_3-1 | 0,14 | 0,10 | 0,10 | 0,17 | 0,10 | 0,10 | 0,07 | 0,17 | 0,14 | 0,14 | 0,10 | 0,17 |
| NF1_2-1 | 0,07 | 0,10 | 0,07 | 0,10 | 0,04 | 0,07 | 0,07 | 0,10 | 0,07 | 0,04 | 0,07 | 0,10 |
| NF1_10A-1 | 0,07 | 0,07 | - | 0,18 | 0,07 | - | 0,04 | 0,14 | 0,07 | 0,04 | 0,09 | 0,11 |
| NF1_6-3 | 0,10 | 0,12 | - | 0,10 | 0,10 | 0,04 | 0,14 | 0,17 | - | 0,10 | 0,00 | 0,17 |
| NF1_6-1 | 0,11 | 0,07 | - | 0,11 | 0,07 | 0,04 | 0,18 | 0,07 | 0,07 | 0,04 | 0,19 | 0,07 |
| DF1_12-1 | 0,07 | 0,10 | 0,07 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,07 | 0,10 | 0,07 | 0,07 | 0,10 | 0,25 |
| RO2-1 | 0,10 | 0,10 | 0,25 | 0,17 | 0,10 | 0,10 | 0,25 | 0,17 | 0,10 | 0,10 | 0,25 | 0,17 |
| NF2_41A-1 | 0,10 | 0,07 | 0,07 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,17 | 0,17 | 0,10 | 0,07 | - | 0,17 |
| NF2_40B-2 | 0,07 | 0,10 | - | 0,17 | 0,04 | 0,07 | - | 0,17 | 0,07 | 0,10 | - | 0,10 |
| NF1_4-3 | 0,11 | 0,10 | 0,11 | 0,14 | 0,07 | - | 0,14 | - | - | 0,07 | - | 0,11 |
| Moyenne | 0,09 | 0,09 | 0,11 | 0,14 | 0,08 | 0,08 | 0,13 | 0,14 | 0,09 | 0,08 | 0,11 | 0,14 |
| FIELD ID | 2007-2008 | | | | | | | | | | | |
| | 22- janv- 08 | 15- févr- 08 | 10- mars- 08 | 14- avr- 08 | 22- janv- 08 | 15- févr- 08 | 10- mars- 08 | 14- avr- 08 | 22- janv- 08 | 15- févr- 08 | 10- mars- 08 | 14- avr- 08 |
| | CH1_01_1 | 0,25 | 0,11 | 0,18 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,18 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,18 |
| CH1_04_1 | 0,11 | 0,11 | 0,45 | 0,33 | 0,11 | 0,11 | 0,45 | 0,39 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 |
| NF1_02_2 | 0,33 | 0,18 | 0,33 | 0,18 | 0,33 | 0,11 | 0,33 | 0,18 | 0,25 | 0,11 | 0,25 | 0,25 |
| NF1_02_3 | 0,30 | 0,25 | 0,25 | 0,18 | 0,11 | 0,18 | 0,25 | 0,33 | 0,11 | 0,18 | 0,11 | 0,11 |
| NF1_05_1 | 0,33 | 0,33 | 0,45 | 0,33 | 0,33 | 0,18 | 0,49 | 0,25 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 |
| NF1_06_3 | 0,25 | 0,25 | 0,45 | 0,18 | 0,25 | 0,18 | 0,33 | 0,25 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 |
| NF1_07_1 | 0,25 | 0,25 | 0,16 | 0,22 | 0,25 | 0,25 | 0,16 | 0,33 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| NF1_09_1 | 0,04 | 0,04 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,04 | 0,18 | 0,25 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 |
| NF1_10_2 | 0,30 | 0,25 | 0,16 | 0,22 | 0,18 | 0,18 | 0,33 | 0,33 | 0,25 | 0,11 | 0,25 | 0,25 |
| NF2_39_2 | 0,33 | 0,25 | 0,45 | 0,33 | 0,25 | 0,25 | 0,45 | 0,33 | 0,18 | 0,25 | 0,18 | 0,18 |
| NF2_40B_1 | 0,25 | 0,18 | 0,25 | 0,18 | 0,11 | 0,18 | 0,33 | 0,33 | 0,18 | 0,11 | 0,18 | 0,18 |
| NF2_41A_1 | 0,04 | 0,04 | 0,18 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,18 | 0,11 | 0,18 | 0,11 | 0,18 | 0,18 |
| DF1_11_1 | 0,04 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,04 | 0,11 | 0,04 | 0,11 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,11 |
| DF1_12_1 | 0,11 | 0,11 | 0,25 | 0,18 | 0,11 | 0,11 | 0,18 | 0,11 | 0,04 | 0,11 | 0,04 | 0,04 |
| DF1_16_1 | 0,25 | 0,25 | 0,16 | 0,22 | 0,33 | 0,18 | 0,16 | 0,22 | 0,33 | 0,18 | 0,16 | 0,22 |
| DF1_39_1 | 0,33 | 0,25 | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,18 | 0,45 | 0,33 | 0,18 | 0,04 | 0,18 | 0,18 |
| RO_03_1 | 0,25 | 0,25 | 0,16 | 0,22 | 0,11 | 0,18 | 0,16 | 0,25 | 0,04 | 0,18 | 0,04 | 0,04 |
| RO_13_1 | 0,11 | 0,04 | 0,16 | 0,22 | 0,04 | 0,04 | 0,16 | 0,22 | 0,04 | 0,04 | 0,16 | 0,22 |
| Moyenne | 0,22 | 0,18 | 0,25 | 0,21 | 0,18 | 0,15 | 0,27 | 0,25 | 0,15 | 0,13 | 0,15 | 0,16 |

En rouge- indication de sol non gelé; en gras sol non gelé ou partiellement gelé

Au cours de l'hiver 2006-2007, la majorité des mesures est demeurée inférieure à $0,20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, indiquant la prédominance du gel du sol sur l'ensemble du bassin. Seul un point de mesure (RO2-1) montre des signes de dégel de l'horizon 0-5 cm lors du passage du 16 mars. Les données de l'hiver 2007-2008 sont beaucoup plus contrastées. Étrangement, les données mesurées à -15 cm sont majoritairement inférieures aux données de -5 cm sur l'ensemble de l'hiver. Il est possible que les TDR aient été inversés. Pour cette raison, l'analyse se fera avec les données

mesurées à -10 cm. Ainsi, il est possible de noter des teneurs en eau supérieures à $0.30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, indiquant la présence de sol non gelé et que seule la date du 15 février semble indiquer la présence de gel sur la majorité du territoire. Pour l'ensemble des autres dates, les zones gelées et non gelées sont présentes en mosaïque.

Les données mesurées à la station météo du bassin versant d'intervention (tableau 2) peuvent également aider à l'interprétation des conditions générales du sol au moment du passage du satellite. Il est bien sûr impossible de bien saisir la variabilité spatiale du phénomène avec l'utilisation de ces données.

Tableau 2. Teneur en eau du sol et profondeur de gel mesurés à la météo de MBI

| Date | 30-45 | 15-30 | 0-15 | z Gel | Date | 30-45 | 15-30 | 0-15 | z Gel | Date | 30-45 | 15-30 | 0-15 | z Gel |
|------------------|-------|-------|------|----------|------------------|-------|-------|------|----------|------------------|-------|-------|------|----------|
| <i>2006-2007</i> | | | | | <i>2007-2008</i> | | | | | <i>2008-2009</i> | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | 11-nov | 0,36 | 0,34 | 0,32 | -2 cm | 22-nov | 0,23 | 0,26 | 0,23 | -5cm |
| 08-déc | 0,38 | 0,36 | 0,34 | -2 cm | 05-déc | 0,36 | 0,33 | 0,29 | -2 cm | 16-déc | 0,27 | 0,25 | 0,13 | -5cm |
| 27-janv | 0,29 | 0,11 | 0,10 | -15cm | 22-janv | 0,33 | 0,28 | 0,17 | 10cm | 09-janv | 0,27 | 0,07 | 0,10 | 15cm |
| 20-févr | 0,11 | 0,10 | 0,09 | -50cm | 15-févr | 0,25 | 0,12 | 0,12 | 15cm | 02-févr | 0,22 | 0,05 | 0,10 | 15cm |
| 16-mars | 0,12 | 0,11 | 0,11 | -50 cm | 10-mars | 0,16 | 0,13 | 0,13 | 10cm | 22-mars | 0,14 | 0,05 | 0,10 | 30cm |
| 29-mars | 0,13 | 0,12 | 0,12 | ~0 | 14-avr | 0,31 | 0,16 | 0,18 | NG | 14-avril | 0,30 | 0,13 | 0,26 | NG* |

* 1 thermocouple (-30cm) se situe autour de 0°C

Il est possible de constater que les données d'humidité de l'hiver 2006-2007 présentent une signature de sol gelé pour l'ensemble des dates du passage de RADARSAT-1, sauf lors du passage du 8 décembre. En 2007-2008, les données compilées à la station météo du Bras d'Henri semblent déceler la présence de gel à partir du 22 janvier dans l'horizon 0-15 cm, et du 15 février dans l'horizon 15-30 cm. Ce gel se maintient au-delà du 14 avril même si les thermocouples à ces profondeurs sont demeurés supérieurs à 0 à partir de cette date. Au cours de l'hiver 2008-2009, il est possible de constater une arrivée précoce du gel des horizons de surface (16 décembre). Le gel est demeuré en place jusqu'au 14 avril où seul l'horizon 15-30 cm présente la signature d'un sol gelé ($0.13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Cela est peut-être dû à la présence du front de gel de l'hiver.

2.3. Variation temporelle et spatiale des températures du sol

1.1.1. Mesures en continu

Au cours des 3 hivers, une série de thermomètres Hobos ont été installés à travers le micro-bassin d'intervention (MBI). Ainsi, 29 points de mesures furent instrumentés à -10 cm en 2006-2007, alors que 43 points furent instrumentés à -5, -10 et -15 cm au cours des hivers 2007-2008 et 2008-2009. Dans le bassin versant de Black Brook, 44 points furent instrumentés à -5, -10 et -15 cm avec des Hobos au cours de l'hiver 2007-2008 alors que la température du sol a été suivie grâce à des thermomètres CS-107L (Campbell Scientific, Utah, USA) installés à -5, -20 et -50 cm sur les 5 stations météorologiques du bassin en 2008-2009. Les profils moyens de températures mesurés au cours des hivers sont présentés à la figure 4. Un résumé des températures mesurées par les Hobos lors du passage du satellite est présenté à l'annexe 2a.

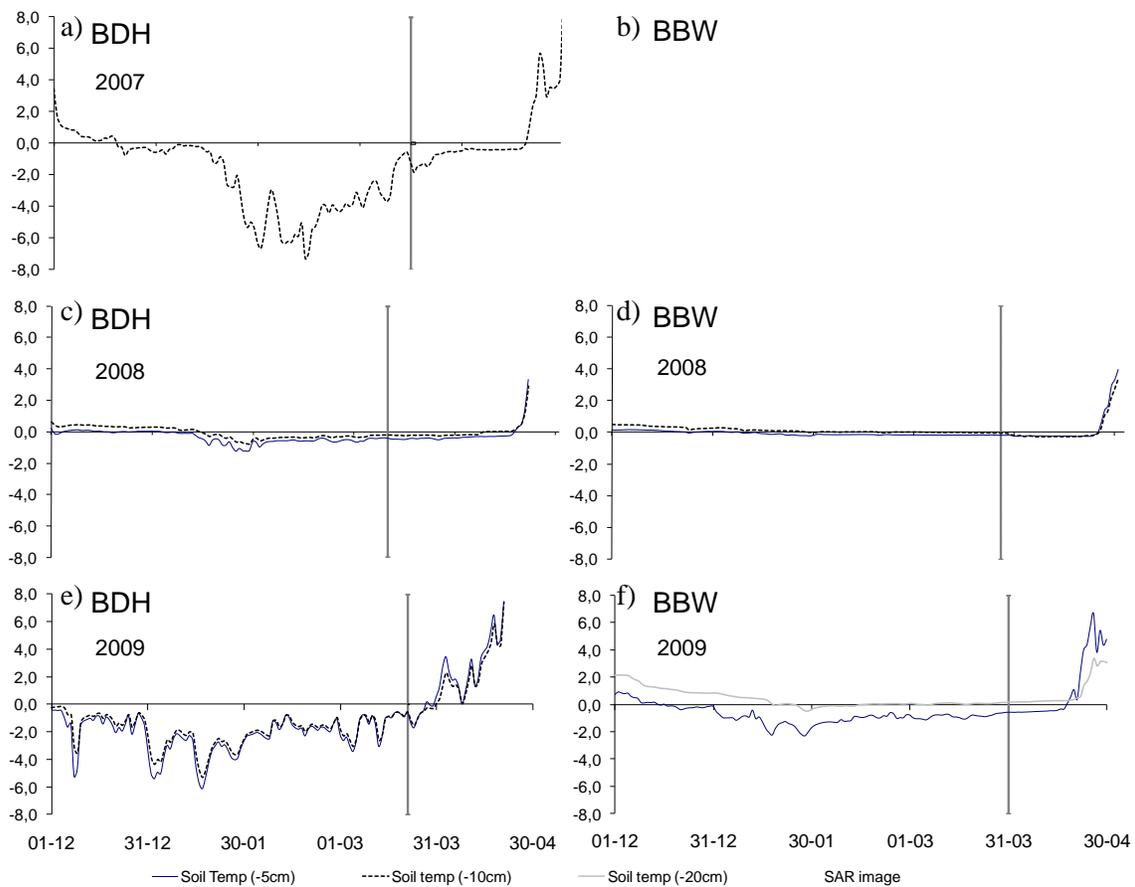


Figure 4. (a-f) Températures moyennes du sol mesurées à différentes profondeurs pour les bassins BDH et BBW pour les hivers 2007, 2008 et 2009

Cette figure illustre bien la variabilité temporelle intra et interannuelle de la température du sol au cours de l'hiver. Le couvert neigeux et les températures de l'air influencent fortement les patrons de températures observés.

2.3.3. Mesures prises lors de la saisie des images

Également au cours des 3 hivers, des données de températures du sol mesurées à l'aide de thermocouples à -1,-5, -10, -25 cm ont été recueillies lors des passages du satellite. Les points de contrôles ont été établis en fonction des caractéristiques du sol et de l'utilisation du sol dans le MBI. Un résumé des températures mesurée à -5 cm est présenté à l'annexe 2.

Dans le bassin versant de Black Brook, aucun dispositif ne permettait la saisie de données spécifiques au passage du satellite. Ainsi, seules les données de Hobos placés au cours de l'hiver 2007-08 permettent de vérifier la validité de la classification des images.

3. Détermination des modèles de rétrodiffusion à l'échelle du micro-bassin d'intervention

3.4. Méthodologie employée

À partir de fichiers de coefficients de rétrodiffusion (dB) enregistrée en format TIFF, une analyse spatiale a été effectuée sur chacun des polygones du bassin à l'étude (contours des parcelles; unité cartographique de la pédologie; unité classifiée) au moyen de l'outil « Zonal Statistics » de ArcGIS 9.3. Cette analyse a permis d'établir la variance sur les modèles de régression entre la température mesurée au thermocouple (BDH) ou par les Hobos (BDH et BBW) et le coefficient de rétrodiffusion RADARSAT (polarisation HH).

Les modèles de régression ont été établis entre la température mesurée à -5 cm saisie le jour du passage du satellite et les valeurs moyennes (fenêtre 3x3) des coefficients de rétrodiffusion filtrés (Filtre de LEE, fenêtre 5x5). Les traitements utilisés visaient la réduction du chatolement; caractéristique propre aux images radar.

3.5. Résultats

a. Paramètres de terrain influençant le coefficient de rétrodiffusion

Une comparaison des moyennes des valeurs de dB a été effectuée pour chacun des polygones associés aux différents groupes liés à l'utilisation du sol (Culture; Labour; Résidus) ou liés à la pédologie (Drainage, Texture de surface) afin de dégager les groupes qui présentaient des différences significatives (tableau 3).

Les données extraites en fonction de la quantité de résidus attendus au sol sont sorties significatives pour l'ensemble des dates des hivers 2006-2007 et 2007-2008. Le classement en fonction du labour est sorti significatif pour l'hiver 2008-2009. Cela peut s'expliquer par la culture de maïs non récoltée dont l'ensemble des résidus a été laissé à la surface au cours de l'hiver 2008-2009. Cette dernière information permet de conclure que différents modes de gestion des résidus vont avoir un effet sur la rétrodiffusion de l'onde radar, observation également observée par McNairn (1996). Un classement adéquat *a priori* du traitement de l'image doit donc s'effectuer et le succès de classification sera influencé par l'homogénéité des pratiques à l'intérieur de chaque groupe. Cette affirmation peut également s'appuyer sur l'analyse effectuée à Black Brook, où les parcelles cultivées en pomme de terre semblent présenter une variation importante de coefficients de rétrodiffusion (figure 6). Cette forte variation pourrait s'expliquer par la présence de sillons de culture (forte rugosité des parcelles), de même que par la variation de l'orientation de ces derniers par rapport au signal radar.

Tableau 3. Test de signifiante de différents facteurs retrouvés dans le micro-bassin du Bras d'Henri

| GROUPES | | | | | | |
|------------|-------------|---------------------|-----------------------|---------------|---------------------|-------------------------|
| DRAINAGE | TEXTURE | GROUPE SIGNIFICATIF | LABOUR | RESIDUS | GROUPE SIGNIFICATIF | |
| 2006-2007 | | | | | | |
| 08-mai-06 | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 08-déc-06 | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 27-janv-07 | NS | NS | 0.0002682 *** | 3.56e-15 *** | | Beaucoup résidus |
| 20-févr-07 | NS | NS | 0.0002100 *** | < 2.2e-16 ** | | Beaucoup résidus |
| 16-mars-07 | NS | NS | 3.247e-05 *** | 4.342e-12 *** | | Beaucoup résidus |
| 29-mars-07 | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 2007-2008 | | | | | | |
| 11-nov-07 | 0.001580 ** | NS | NS | 2.611e-11 *** | | Beaucoup résidus |
| 05-déc-07 | 0.004283 ** | 0.02277 * | Très mal drainé | 2.088e-05 *** | 7.792e-11 *** | Beaucoup résidus |
| 22-janv-08 | 0.007 ** | 0.01680 * | Très mal drainé | 1.040e-06 *** | 6.813e-09 *** | Beaucoup résidus |
| 15-févr-08 | 0.08 | 0.05 | | 1.667e-06 *** | 6.375e-07 *** | Beaucoup résidus |
| 10-mars-08 | 0.03* | 0.04* | Très mal drainé | 0.002442 ** | 2.795e-05 *** | Beaucoup résidus |
| 14-avr-08 | --- | --- | --- | NS | 7.035e-05 *** | --- |
| 2008-2009 | | | | | | |
| 22-nov-08 | NS | NS | | 2.656e-12 *** | 1.046e-14 *** | Non labouré (champs DF) |
| 16-déc-08 | NS | NS | | 0.06028 . | 0.0768 . | Non labouré (champs DF) |
| 09-janv-09 | 0.004709 ** | 0.008922 ** | Imparfaitement drainé | 0.006494 ** | NS | Non labouré (champs DF) |
| 02-févr-09 | 0.09007 . | NS | Imparfaitement drainé | 0.008132 ** | NS | Non labouré (champs DF) |
| 22-mars-09 | NS | NS | | --- | --- | |

Une analyse de l'influence de l'orientation des parcelles a d'ailleurs été effectuée à l'échelle du Bras d'Henri sur 2 images de l'hiver 2006-2007. Pour ce faire, les contours des parcelles de l'ensemble du bassin ont été acquis de la *Basse de données sur les cultures généralisées* de la Financière Agricole du Québec. L'orientation des parcelles a été déterminée à l'aide du script VBA AS14234 (FindPolylineAngle.bas) après une conversion des polygones en polygones. L'angle déterminé a ensuite été réassigné aux contours des polygones et validés avec les orthophotos disponibles par le projet WEBS (AAC). L'angle de visée a été déterminé dans un quadrant (0-90°) en fonction de l'orbite du satellite (angle de la scène). Une représentation des angles déterminés est présentée à la figure 5.

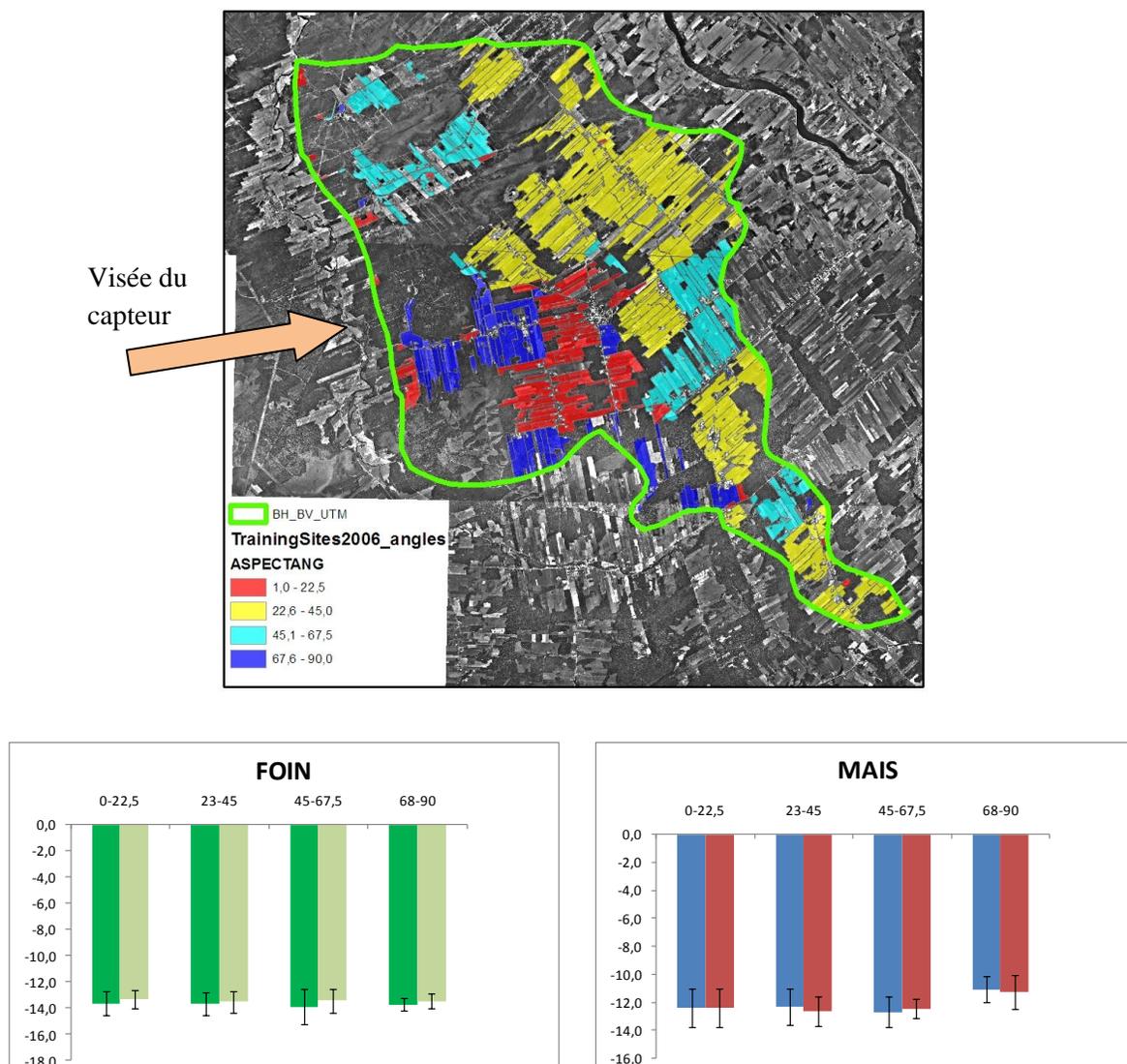


Figure 5. Angle de visée du satellite déterminé en fonction de l'orientation des parcelles et résultats de coefficients de rétrodiffusion moyens déterminés à partir des images filtrées (LEE 5x5) du 20 février 2007 et du 16 mars 2007.

Il ressort de cette analyse que l'effet de l'orientation des parcelles est non significatif sur les champs en fourrage. Il faut comprendre que la méthodologie ne pouvait isoler l'effet de la constante diélectrique de même que la rugosité locale des différents champs considérés. Toutefois, dans les parcelles de maïs, le coefficient de rétrodiffusion ressort significativement supérieur dans le groupe d'angle de 60 à 90°. Cette relation est explicable par la forte rugosité des champs de maïs (soit labourés ou laissé en chaume). Cette différence (environ 1.5 dB) est comparable à celle mentionnée par les travaux de Gautier et al (1998). Malheureusement, avec les données disponibles, il est impossible de proposer une approche pour corriger l'effet de l'orientation des parcelles. Ainsi, l'utilisateur doit être conscient que ce facteur pourrait entraîner des erreurs dans la classification du gel. Il est encore une fois primordial de bien classer a priori la rugosité de surface des champs afin d'améliorer les performances des modèles.

L'influence de l'orientation des parcelles pourrait servir à déterminer les zones labourées. En effet, plus la rugosité des parcelles est importante, plus la différence de signal des parcelles entre les deux images utilisant des angles de visée différents devrait être marquée.

b. Modèles de rétrodiffusion en fonction de la température mesurée (MBI)

Des modèles de rétrodiffusion ont été établis en considérant les paramètres d'utilisation du sol (Gestion des résidus) et pédologique (Drainage) qui ont un effet significatif sur le coefficient de rétrodiffusion (Figure 5). Les modèles mettent en relation la température mesurée à -5 cm par thermocouples (2006-07; 2007-08; 2008-09) et le coefficient de rétrodiffusion de l'image RADARSAT-1, méthodologie analogue à la thèse de doctorat de Jalal Khaldoune (2006) et en utilisant les mesures prises par des Hobos à -5 cm (2007-08; 2008-09) (Figure 6). Seules les données du 29 mars 2007; 14 avril 2008 et 22 mars 2009 ont été éliminées puisque les conditions météorologiques indiquent la présence de neige humide sur le bassin du Bras d'Henri (Annexe 1a 1b) alors que les données du 7 novembre 2007 et du 26 mars 2008 ont été éliminées pour le bassin de Black Brook pour les mêmes raisons (Figure 7).

La figure 6 présente les relations entre les températures mesurées et les coefficients de rétrodiffusion. Les principales différences entre les figures a, c et e et les figures b, d et f proviennent du fait qu'un nombre moins élevé de thermocouples ait été installé étant donné le temps associé à l'échantillonnage de chaque point. Également, certaines dates de passage du satellite furent non échantillonnées. Finalement, le volume d'échantillonnage des Hobos est significativement plus grand étant donné que les thermomètres étaient installés dans des capsules cylindriques.

Il est possible d'observer une grande dispersion des points à des températures <0 . Les coefficients de régression (r^2) observés varient de 0.05 à 0.17 dans le cas des mesures aux thermocouples (-5 cm) et 0.05 et 0.26 dans le cas des mesures prises aux Hobos. L'incertitude des modèles de régression peut être causée par plusieurs facteurs :

- a. Hétérogénéité du phénomène à l'intérieur du pixel;
- b. Différence dans les paramètres de rugosité des différents points de mesure à l'intérieur d'un même groupe ou entre les différentes années de mesures;
- c. Erreur associée à la mesure de la température (± 0.2 °C);
- d. Erreur associée aux différentes images produites par RADARSAT (± 1 dB);
- e. Mesures non synchronisées avec le passage du radar;
- f. Différences dans les volumes d'échantillonnages entre les points de contrôle (ponctuel) et le radar (9 x 9m).

MESURES AUX THERMOCOUPLES (-5cm)

MESURES AUX HOBOS (-5cm)

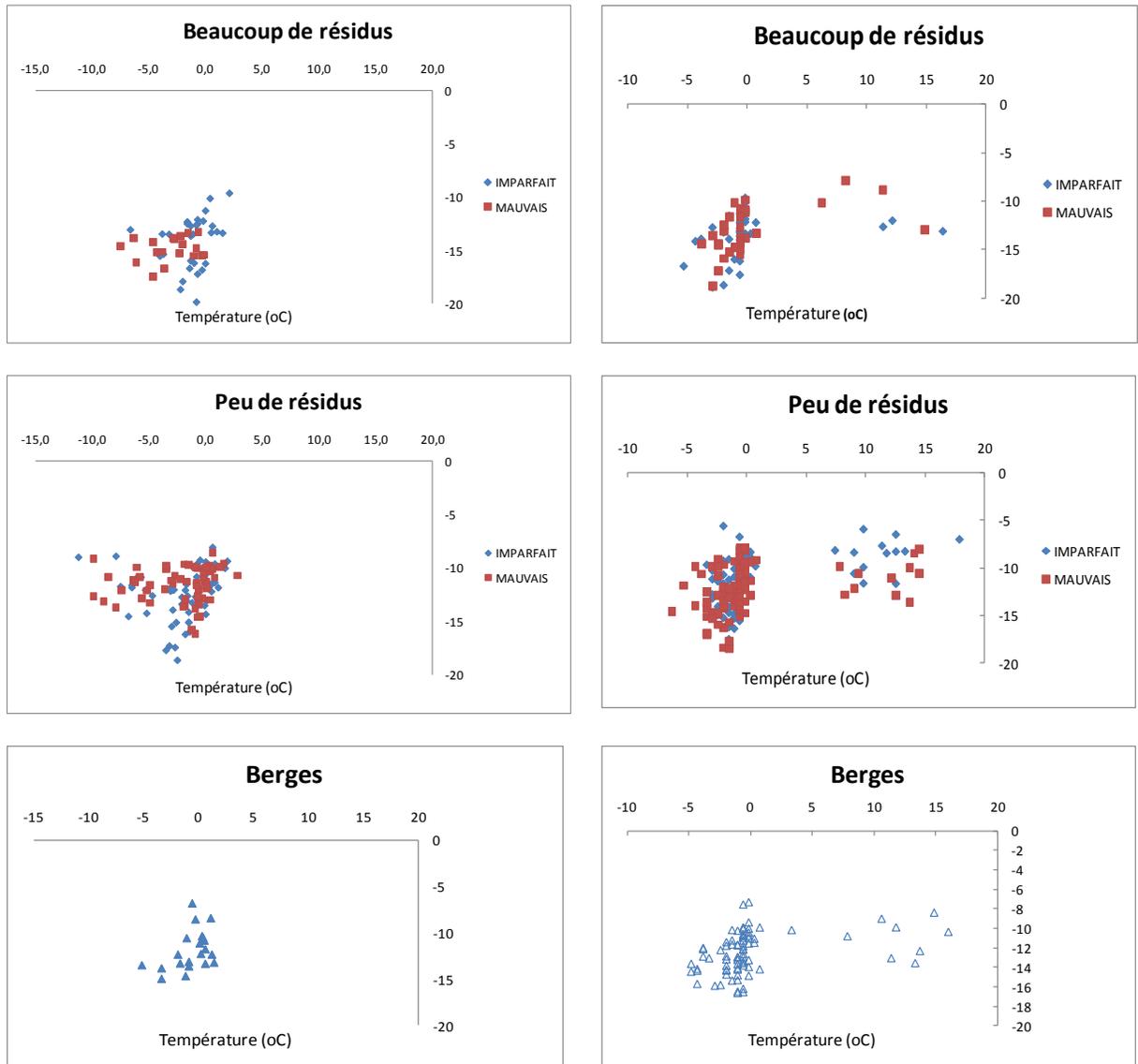


Figure 6. Régression entre température mesurée (°C; axe horizontal) et coefficient de rétrodiffusion (dB; axe vertical) selon différents groupes de points de mesure

Les données associées à l'image du 14 avril 2009 sont les seules données recueillies alors que les températures indiquent que le sol de surface était entièrement dégelé. Les données d'humidité volumétrique du sol et les données météo mesurée durant cette période (absence de précipitations depuis plus de 7 jours) permettent de constater que le sol de surface avait commencé à s'assécher. Cela peut donc expliquer que le nuage de points ne semble pas suivre une relation linéaire avec le nuage de points mesurés à des $T < 0^{\circ}\text{C}$. Les coefficients de régression quadratiques sont en effet constamment supérieurs à ceux d'une régression linéaire ($r^2 = [0.11; 0.43]$).

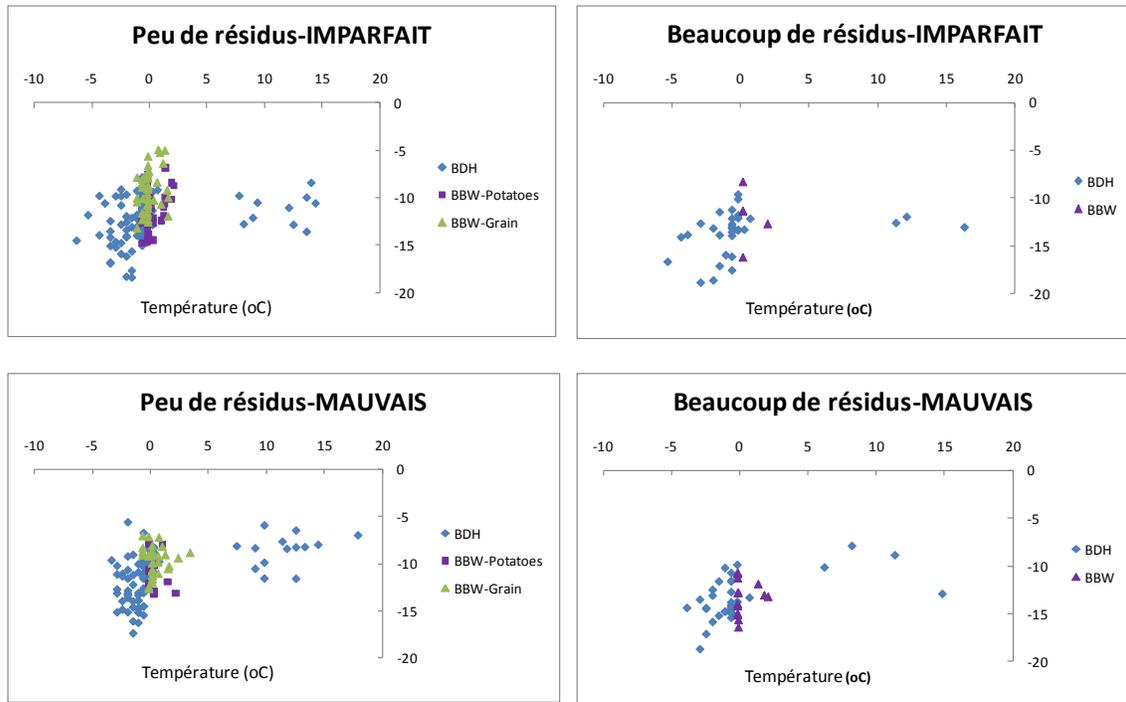
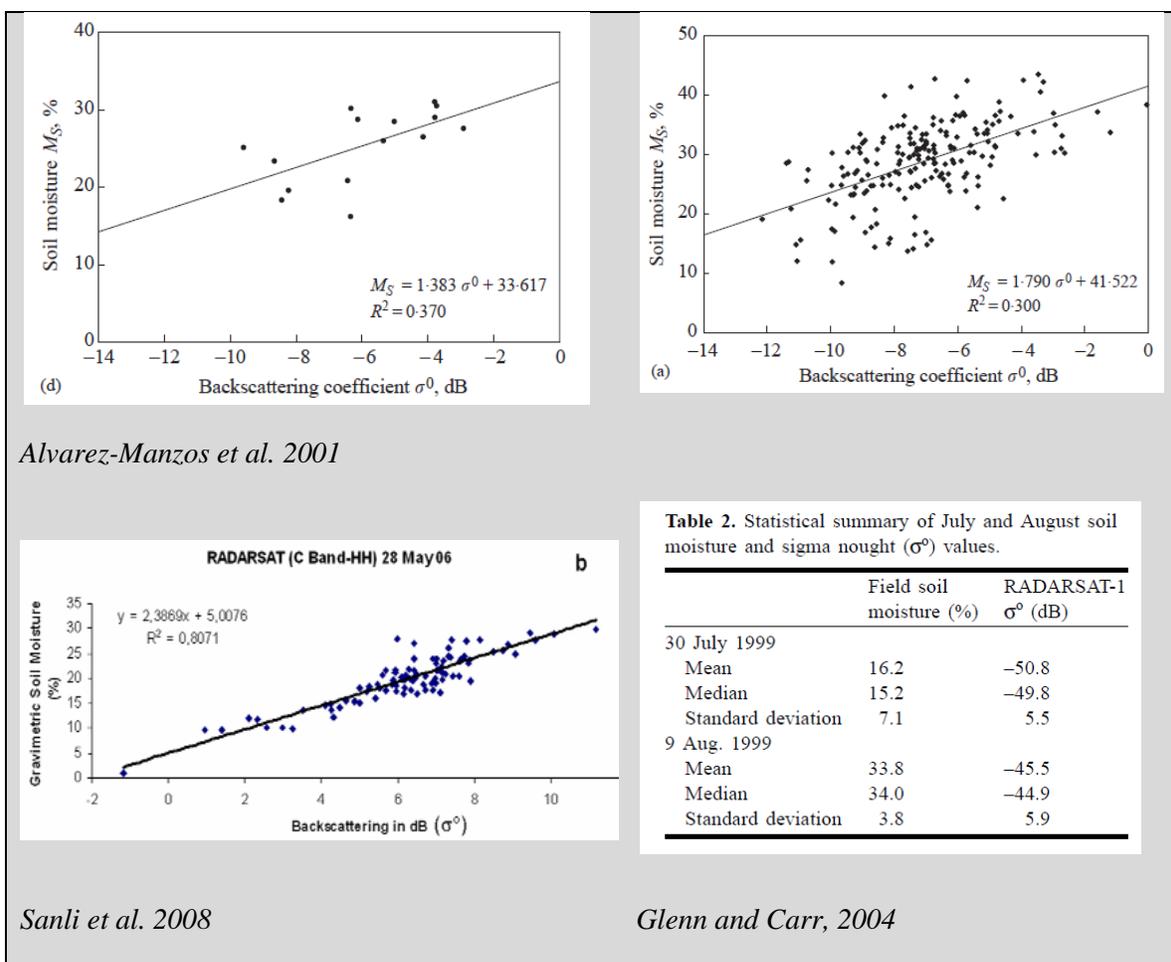


Figure 7. Comparaison entre température mesurée aux Hobos ($^{\circ}\text{C}$; axe horizontal) et coefficient de rétrodiffusion (dB; axe vertical) entre BDH et BBW

La figure 7 présente la distribution des points de contrôles mesurés dans le bassin de Black Brook. La carte pédologique couvrait une plus vaste gamme de drainage du sol. Pour comparer les points avec le classement établi dans le MBI, les groupes rapide, modéré et imparfaitement drainés ont été regroupés dans la classe «Imparfaitement», alors que les groupes «mauvais» et «très mauvais» ont été regroupés dans la classe «Mauvais». En terme d'utilisation du sol, aucune donnée traitant des dates et types de labours n'était disponible sur le territoire. Ainsi, le classement a été fait en fonction de grands groupes de cultures soit; Pommes de terre et maïs, Céréales (avoine, orge, blé) et Plantes fourragères (pâturage et foin). Il est possible d'observer la grande variabilité des coefficients de rétrodiffusion mesurés sur le territoire lors que la température avoisine le 0°C . La faible précision des groupes peut avoir influencé grandement cette variabilité quoique l'hiver 2007-2008 demeure difficile à interpréter par le fait que les températures soient demeurées constamment autour du point de congélation durant la majeure partie de l'hiver.

c. Modèles de rétrodiffusion en fonction de l'humidité mesurée au TDR

Afin de compléter l'analyse, une tentative de classification du gel par l'interprétation des mesures de teneur en eau volumétrique est présentée ici. Cette analyse est pertinente car la rétrodiffusion des ondes radar est grandement influencée par la constante diélectrique du sol et ainsi fortement liée à la teneur en eau. Plusieurs auteurs ont par le passé essayé d'estimer la teneur en eau des sols grâce aux données satellitaire afin d'améliorer la précision des modèles hydrologiques. Ces approches sont analogues à la cartographie du gel du sol étant donnée l'influence du gel sur les teneurs en eau volumétriques. Une brève revue de littérature sur l'évaluation des teneurs en eau grâce à RADARSAT montre à quel point les données sont influencées par la rugosité de terrain (Figure 8) et des angles de visée du satellite.



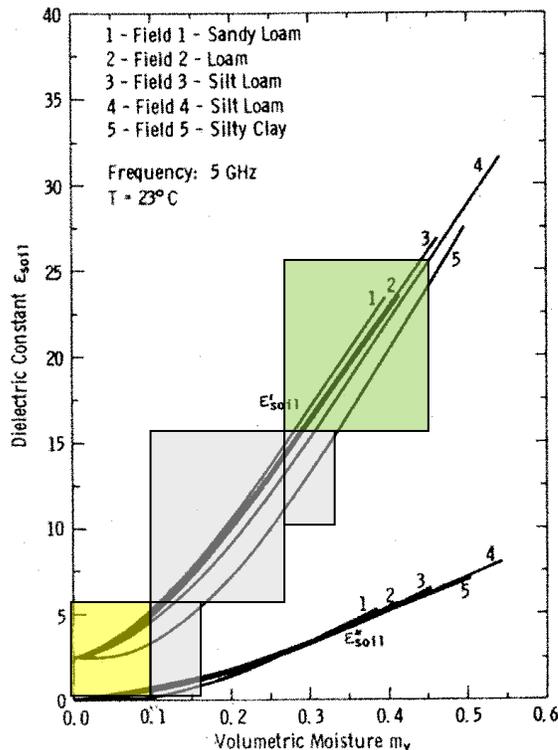
Alvarez-Manzos et al. 2001

Sanli et al. 2008

Glenn and Carr, 2004

Figure 8. Exemple de relation entre l'humidité du sol et les coefficients de rétrodiffusion mesurés

Ainsi, grâce aux relations présentées aux figures 1 à 3, la discrimination des zones de gel pourrait également se faire en fonction de grandes zones de confiances (Figure 9).



- A. (en jaune) $< 10\%$ teneur en eau;
 $< 5 \xi$: Forte probabilité de gel
 du sol
- B. (en gris) $10\text{-}25\%$ teneur en eau :
 Soit partiellement gelé; soit sols
 argileux gelé (pas de données);
 soit sol léger sec en surface
- C. (en vert) $>25\%$ % teneur en eau;
 $>15 \xi$: Forte probabilité que le
 sol soit non-gelé ou sol argileux
 partiellement gelé

Figure 9. Relation théorique entre (a) la teneur en eau volumétrique et la constante diélectrique du sol (Ulaby *et al.* 1986) et (b) le coefficient de rétrodiffusion

La figure 10 présente les relations entre les teneurs en eau mesurées au TDR (-10 cm) (tableau 1) et les coefficients de rétrodiffusion. Les données ont été groupées en fonction de l'utilisation du sol au point de mesures de la même façon que pour les modèles établis en fonction de la température. La classification liée aux classes de drainage du sol a été abandonnée puisque les 2 groupes se comportaient de manière identique et que le nombre de points de contrôle était limitant. Ces relations permettent de constater la forte variabilité des coefficients de rétrodiffusion (dB) lorsque les sols sont partiellement gelés. Ces figures représentent bien la très grande variabilité des teneurs en eau lorsque la température se situe aux alentours de 0°C . La figure 11 présente la différence entre les teneurs en eau mesurées et la température du sol mesurée aux thermocouples (-5 cm). Même si la tendance est similaire celle présentée à la figure 2, la dispersion des points est beaucoup importante. La différence de volume d'échantillonnage et la non-calibration des sondes TDR explique la grande variabilité des teneurs en eau mesurées aux alentours de 0°C (Spaans and Baker 1996). De plus, la variabilité illustre la grande hétérogénéité du phénomène au cours de l'hiver 2007-08, même à l'échelle locale.

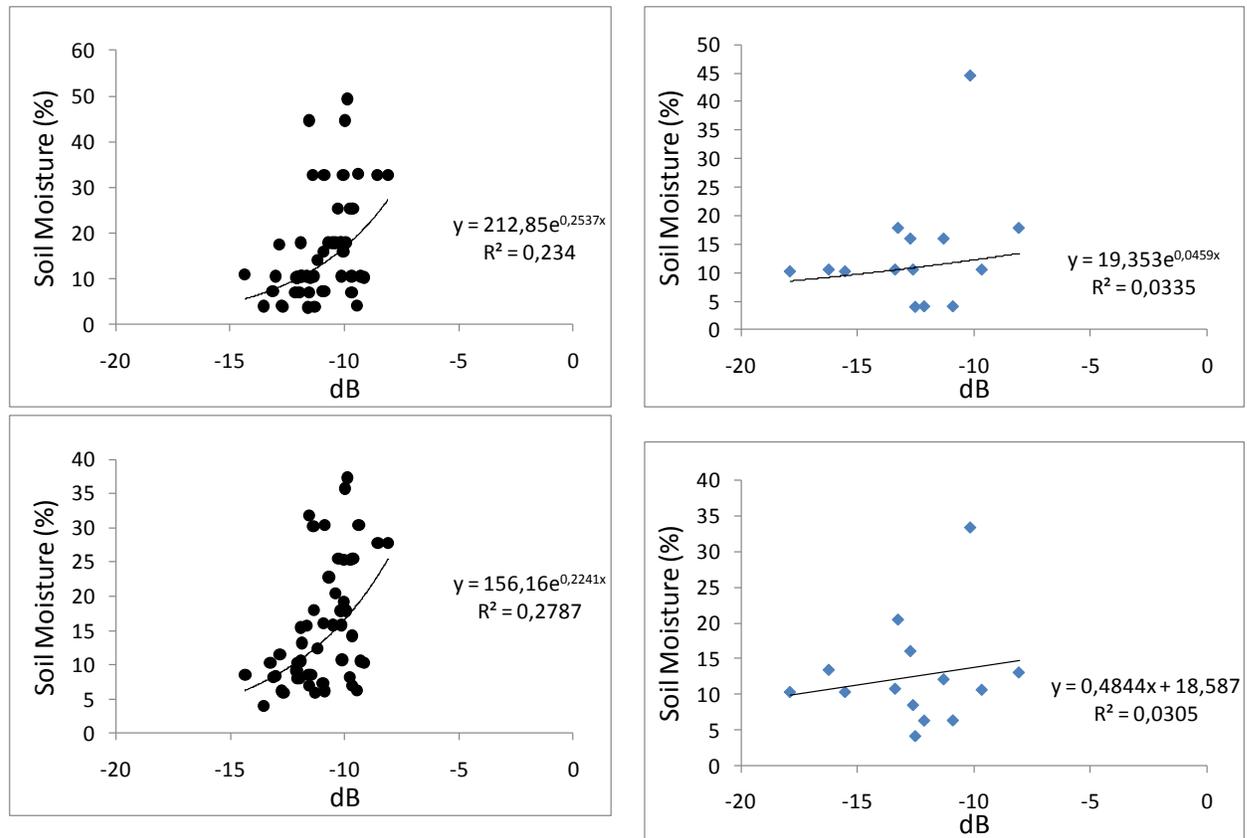


Figure 10. Relation entre % d'humidité du sol mesuré au TDR (-10 cm) et coefficient de rétrodiffusion RADARSAT-1 avec (a) peu de résidus (b) beaucoup de résidus.

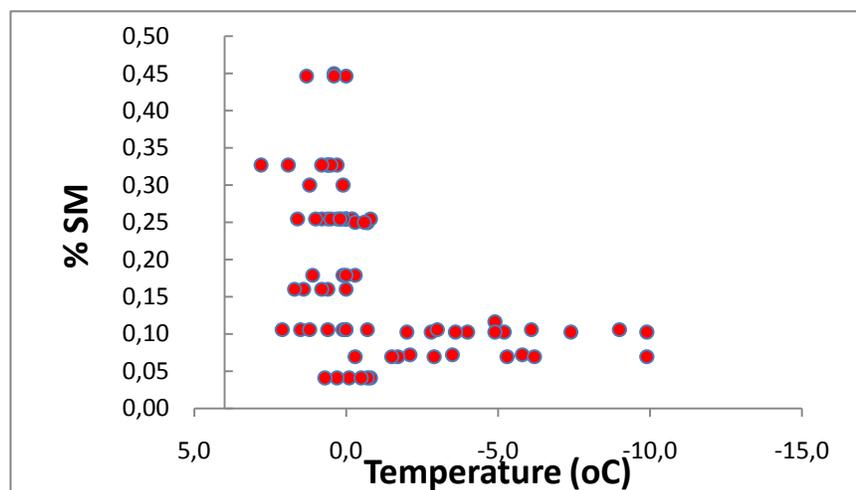


Figure 11. Relation entre la teneur en eau au TDR et la température mesurées aux thermocouples (-5cm) pour les hivers 2006-07 et 2007-08.

d. Comparaison des intervalles de confiances avec les autres seuils utilisés

Afin de représenter les incertitudes mentionnées précédemment, des intervalles de confiance ont été établies pour les différents groupes. Ainsi, avec les données mesurées aux thermocouples (-5 cm), les intervalles de confiances à $\alpha=0.05$ sur l'intervalle de température allant de $[-0,5; 0,5]$ sont présentés au tableau 4 (en bleu).

Tableau 4. Seuils possibles et intervalles de confiance selon différents scénarios testés. Les valeurs en bleu sont les valeurs utilisées dans la création des cartes

| alpha = 0,05 | | TOUTES LES DATES | | | | | DATE SUPPRIMÉES | | | | |
|-----------------|------|------------------|--------|--------|-------------|--------|-----------------|--------|--------|-------------|--------|
| | | Intercepte | | | [-0,5; 0,5] | | Intercepte | | | [-0,5; 0,5] | |
| | | modèle | 0.05 | 0.95 | 0.05 | 0.95 | modèle | 0.05 | 0.95 | 0.05 | 0.95 |
| Mauvais | High | -14,38 | -15,68 | -13,07 | -15,76 | -12,85 | --- | --- | --- | --- | --- |
| | Low | -11,11 | -11,71 | -10,51 | -11,75 | -10,38 | -10,74 | -11,28 | -10,19 | -11,36 | -10,04 |
| Imparfait | High | 13,99 | -15,21 | -12,76 | -15,34 | -12,37 | -13,68 | -15,01 | -12,35 | -15,63 | -11,53 |
| | Low | -12,16 | -12,94 | -11,39 | -12,98 | -11,27 | -12,06 | -12,75 | -11,36 | -13,18 | -10,76 |
| Berges | --- | -11,44 | -12,37 | -10,51 | -12,49 | -10,17 | -11,55 | -12,53 | -10,58 | -12,73 | -10,17 |

Lors que l'on compare les valeurs du tableau 4 avec les valeurs décrites dans le cadre du projet GRIP-1, il est possible de constater que l'ensemble des seuils présenté au tableau 5.1 de la thèse de doctorat (Khaloune, 2006) se situent dans l'intervalle de confiance, alors que 6/11 sont toujours à l'intérieur des intervalles de confiance lorsque les séries de sols sont utilisées pour établir les modèles. Cette situation est analogue aux seuils décrits en fonction des textures de surface (Tableau 7). Ainsi, plus les modèles sont généraux, plus ils intègrent la variabilité de la rugosité du terrain. Des modèles de régression précis facilitent l'interprétation des résultats mais risquent d'être valables seulement aux sites de mesures.

Tableau 5. Seuils déterminés dans le cadre de GRIP-I et vérification si ces seuils tombent dans l'intervalle de confiance des données déterminées dans le cadre de GRIP-II (MBI vs BDH).

DOCTORAT JALAL

| TABLEAU 5.1 (page 131) | | | TABLEAU 5.3 (page 152) | | | | |
|------------------------|------------|-------------------|------------------------|------------|------------|-------------|-------------------|
| SOIL | Intercepte | Inter [-0,5; 0,5] | SOIL | LAND USE | Intercepte | Inter Model | Inter [-0,5; 0,5] |
| Mauvais-Non Labour | -13,02 | Oui | Mawcook | Non Labour | -12,90 | Non | Oui |
| | | | LeBras | Non Labour | -13,10 | Oui | Oui |
| Mauvais--Labour | -10,63 | Oui | Mawcook | Labour | -10,50 | Oui | Oui |
| | | | LeBras | Labour | -11,80 | Non | Non |
| Imparfait-Non Labour | -13,20 | Oui | Neuboiss | Non Labour | -13,20 | Oui | Oui |
| | | | Beaurivage | Non Labour | -13,10 | Oui | Oui |
| | | | Woodridge | Non Labour | -13,00 | Oui | Oui |
| Imparfait -Labour | -11,22 | Oui | Neuboiss | Labour | -10,80 | Non | Non |
| | | | Beaurivage | Labour | -9,50 | Non | Non |
| | | | Woodridge | Labour | -9,90 | Non | Non |
| GENERAL-Non Labour | -13,20 | Oui | GENERAL | Non Labour | --- | --- | --- |
| GENERAL-Labour | -10,53 | Oui | GENERAL | Labour | | | |

Tableau 6. Seuils déterminés dans le cadre de GRIP-I (Khaloune et al, soumis

| SOIL | LAND USE | Intercepte | Inter Model | Inter [-0,5; 0,5] |
|-----------------|------------|------------|-------------|-------------------|
| loam-clay loam | Non Labour | -13,34 | Oui | Oui |
| loam-silty loam | Non Labour | -13,25 | Oui | Oui |
| loam-clay loam | Labour | -10,19 | Non | Non |
| loam-silty loam | Labour | -10,90 | Oui | Oui |
| loam-sandy loam | Non Labour | -13,18 | Oui | Oui |
| sandy loam-1 | Non Labour | -12,94 | Oui | Oui |
| sandy loam-2* | Non Labour | -14,54 | Non | Oui |
| loam-sandy loam | Labour | -10,41 | Non | Non |
| sandy loam-1 | Labour | -10,52 | Non | Non |
| sandy loam-2 | Labour | -9,45 | Non | Non |

* Deux figures mentionnées *Sandy Loam*

e. Discussion sur l'effet d'échelle

Les modèles présentés plus tôt sont une tentative de classer les paramètres qui influencent le coefficient de rétrodiffusion. Toutefois, comme mentionné précédemment, plusieurs sources de variation demeurent, influençant la taille de la zone d'incertitude. L'analyse effectuée au cours de GRIP-1 permettait de réduire un grand nombre de source de variations puisque les modèles étaient établis entre la moyenne des températures et la moyenne des dB de champs qui demeuraient constants sur la période de l'étude (Khalidoune, 2004). Ainsi, une seconde analyse effectuée sur les points de mesures demeurés constants au cours des années de saisies d'images RADARSAT-1 permet de vérifier la précision à l'échelle locale de la relation. Les résultats des régressions sont présentés en annexe 3 et résumés au tableau 8. Il est possible de constater que les relations peuvent être à la fois très fortes et très faibles à l'échelle locale. L'influence du chatoiement sur les valeurs filtrées, les différences locales dans la géoréférence de l'image (1 ou 2 pixels de décalage) ou d'autres paramètres de terrain peuvent influencer les relations observées.

Tableau 7. Modèles des régressions pour des points de mesures constants

| FIELD_ID | n | GROUPE | a | b | R2 | adjsR2 | p-Value |
|-----------|---|--------|-------|--------|------|--------|---------|
| CH1_01_1 | 6 | A | 1,309 | -10,47 | 0,75 | 0,68 | * |
| NF1_02_1 | 9 | A | 0,181 | -11,74 | 0,17 | 0,06 | NS |
| NF1_07_1 | 6 | A | 1,819 | -11,88 | 0,93 | 0,92 | ** |
| NF2_39_1 | 6 | A | 2,074 | -11,88 | 0,58 | 0,48 | . |
| NF2_40B_1 | 6 | A | 0,474 | -11,51 | 0,15 | -0,06 | NS |
| NF2_41A_1 | 9 | A | 0,351 | -11,16 | 0,22 | 0,10 | NS |
| DF1_11_1 | 6 | B | 1,127 | -12,40 | 0,34 | 0,17 | NS |
| DF1_12_1 | 6 | B | 1,86 | -11,82 | 0,78 | 0,72 | * |
| DF1_16_1 | 6 | B | 2,998 | -11,78 | 0,65 | 0,57 | . |
| DF1_39_1 | 6 | B | 2,734 | -11,00 | 0,83 | 0,78 | * |
| CH1_04_1 | 6 | C | 1,471 | -13,34 | 0,58 | 0,47 | . |
| RO_03_1 | 9 | C | 2,171 | -14,87 | 0,53 | 0,41 | . |
| RO_13_1 | 6 | C | 0,042 | -12,63 | 0,00 | -0,24 | NS |
| NF1_09_1 | 6 | C | 3,12 | -12,77 | 0,83 | 0,79 | ** |

GROUPE A: sols labourés, peu de résidus; GROUPE B; Sols non labourés, peu de résidus; GROUPE C sols en prairies (. p-Value < 0.10; * p-Value < 0.05; ** p-Value < 0.01)

4. Autres avenues à explorer

Différentes approches peuvent potentiellement être utilisées dans la cartographie du gel du sol. Premièrement, nous avons testé dans ce rapport la faisabilité d'utiliser la détection de changement afin de déterminer les zones gelées (section 4.1). Deuxièmement, il apparaît maintenant possible de résoudre l'équation radar en utilisant deux plans de polarisation de l'onde offerts par RADARSAT-2 (section 4.2). Cette méthodologie permettrait en théorie de déterminer directement la constante diélectrique du sol et ainsi de déterminer les zones gelées. Finalement, une troisième stratégie, non explorée dans le cadre de ce rapport, pourrait faire intervenir des paramètres de texture de l'image comme deuxième variable dans les équations de régression. En effet, il est possible de penser que lorsque le sol gel, l'effet de la rugosité de surface s'estompe étant donné que l'onde radar sera diffusée dans un plus grand volume de sol, diminuant ainsi la variance locale du coefficient de rétrodiffusion.

1.1. Vérification de l'hypothèse de l'utilisation de la différence en dB entre deux images d'une même année pour déterminer les zones de gel

La cartographie des zones de gel par la détection de changement à partir d'images de références (Lagacé *et al.* 2002) a été tentée pour 3 années sur le BDH. Les avantages d'une telle méthode résident dans l'hypothèse que, selon un angle d'incidence constant, seule l'influence de la constante diélectrique du sol fera varier le signal de rétrodiffusion. Ainsi, aucune pré-classification des images n'est nécessaire.

Une analyse préliminaire des moyennes de coefficients de rétrodiffusion sur l'ensemble du bassin du Bras d'Henri permet de constater la variation du signal lors des différentes dates du passage du satellite. Une discrimination des zones de gel possible en servant d'une image de référence prise en conditions de sols non gelés et lorsque durant la saison morte des travaux au champs. Ainsi, une analyse est possible pour les années 2005-2006 (14 avril 2006 : $T_{\text{air}} \approx 12^{\circ}\text{C}$); 2007-2008 (11 novembre 2007 : $T_{\text{air}} \approx 1.5^{\circ}\text{C}$) et 2008-2009 (15 avril 2009 : $T_{\text{air}} \approx 10^{\circ}\text{C}$ et 100% Hobo $> 0^{\circ}\text{C}$) dans le bassin du Bras d'Henri.

Pour les deux années de monitoring du bassin de Black Brook, la figure 12 permet de constater que les images sont très peu contrastées. En fait, seule l'image du 15 février 2008 présente un coefficient de rétrodiffusion moyen supérieur (environ +1 dB) aux autres images de l'année alors qu'en 2008-2009, la valeur du coefficient de rétrodiffusion moyen est demeuré quasi-constant quoique plus faible que l'année précédente (à l'exception des images du 22 novembre et 26 mars qui sont probablement causées par la présence de neige humide). La figure 12 permet de constater les différences associées aux orientations de parcelles, angles d'incidence locaux et à l'utilisation du territoire, ce qui entraîne une différence notable entre les signaux moyens de deux bassins.

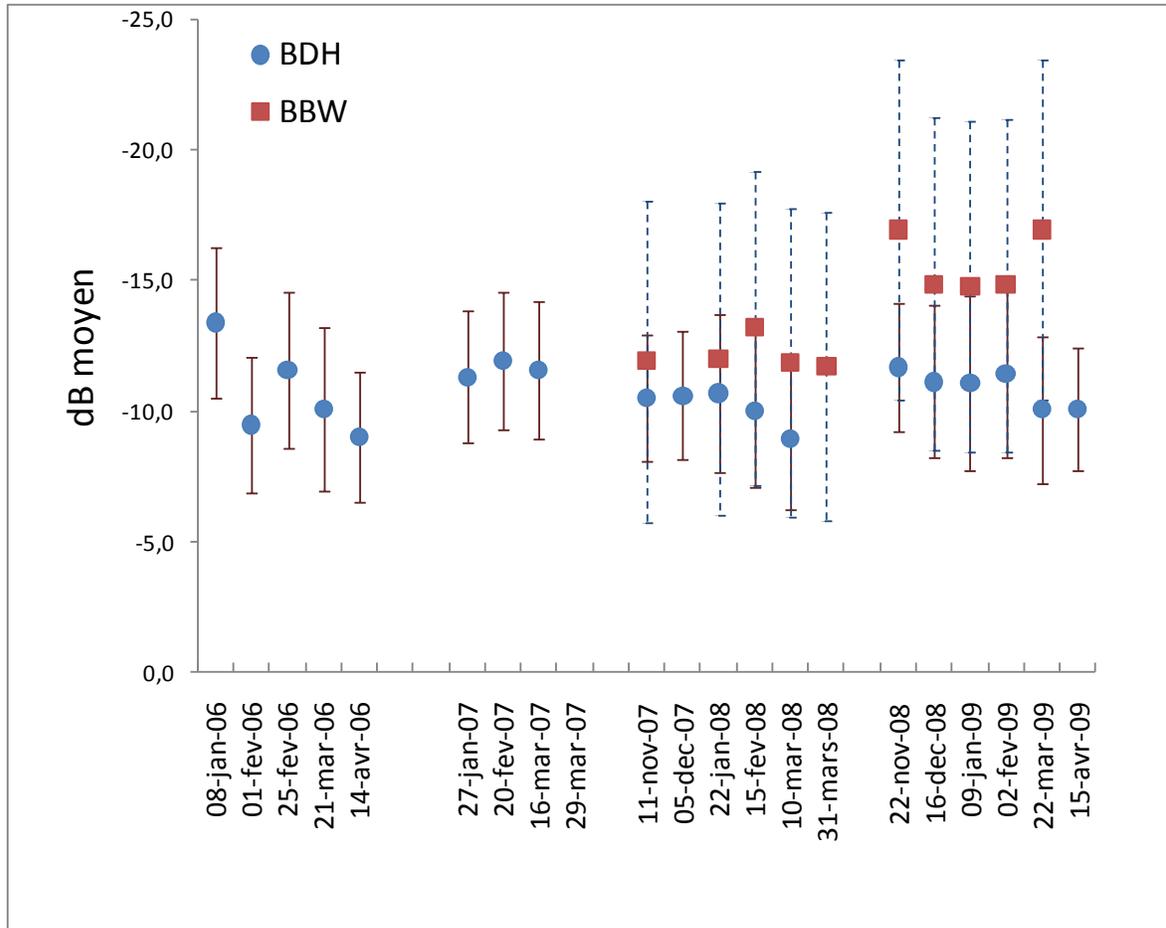


Figure 12. Coefficients de rétrodiffusion moyens mesurés sur l'ensemble du bassin versant du Bras d'Henri et de Black Brook

2005-2006

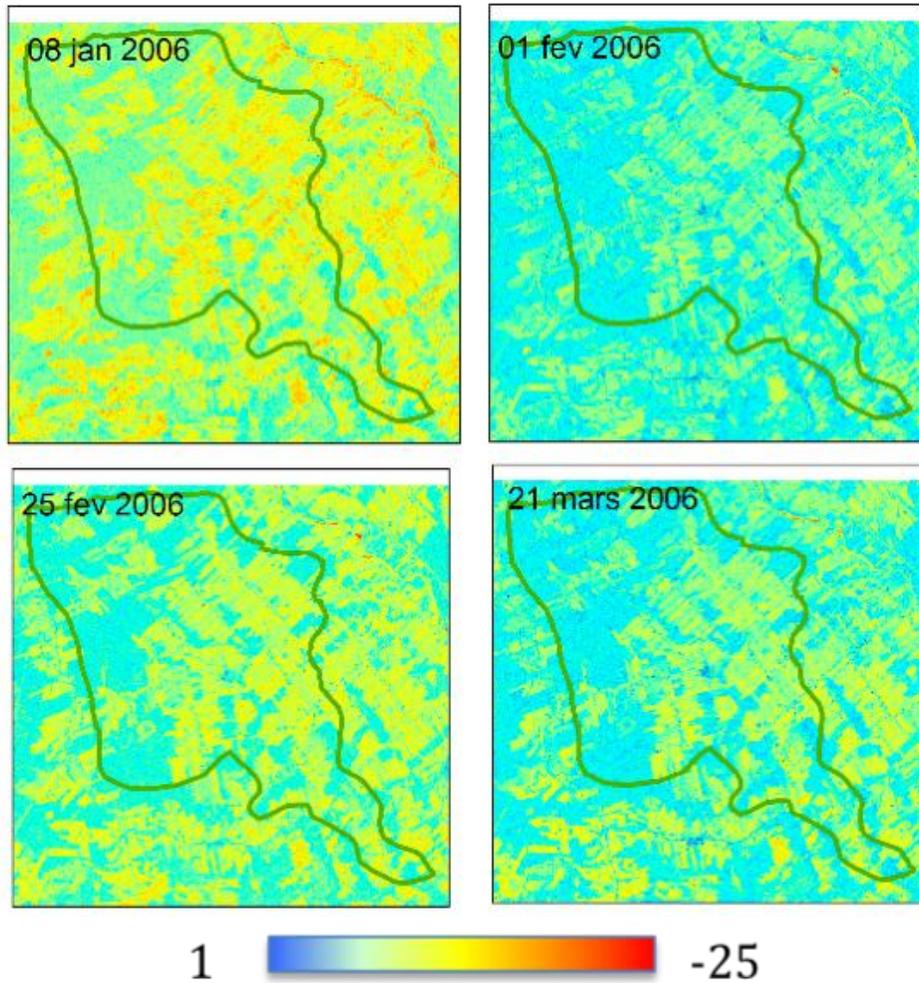


Figure 13 a. Évolution des coefficients de rétrodiffusion du BDH au cours de l'hiver 2005-06

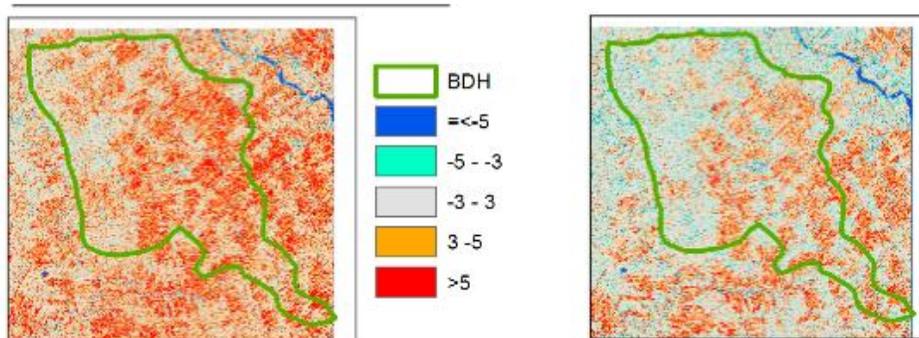


Figure 13 b. Différences des coefficients de rétrodiffusion du BDH en utilisant l'image de référence du 14 avril 2006

dB_14avr2006– dB_25Fév2006 :

- Rouge : Différence > 3dB
représentant 60 % des parcelles
cultivées

dB_14avr2006 – dB_21mars2006 :

- Rouge : Différence > 3dB
représentant 39 % des parcelles
cultivées

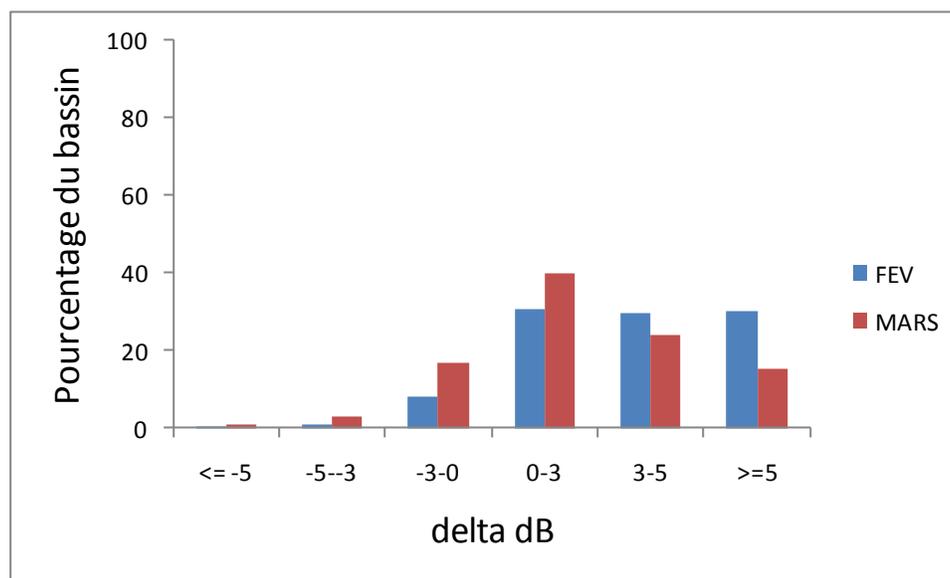


Figure 13c. Différence de classification par différences de dB au cours de l'hiver 2005-2006

Au cours de l'hiver 2005-2006 (Figure 13), il semble qu'une bonne partie du territoire (60%) était gelée en date du 25 février alors qu'au 21 mars cette proportion était de 39 %. Ces résultats suivent la tendance observée des proportions de points de contrôles au sol gelés (92 % et 50% respectivement).

En 2007-2008 (Figure 14), la majorité des pixels ont varié dans un ordre inférieur à 3 dB. Aussi, une proportion importante des images présente une augmentation du coefficient de rétrodiffusion (delta < -3 dB). Il est possible qu'il y ait eu présence de gel dans l'image du 11 novembre alors que la température de l'air était très près du point de congélation. De plus, l'analyse des données météo montre que la dernière pluie remontait à plus de 4 jours (annexe 1a). Ainsi, la teneur en eau du sol de surface peut avoir diminué à un teneur inférieure à ce que l'on retrouvait sous la neige.

Encore une fois la grande variabilité de la présence du gel de surface au cours de l'hiver 2007-2008 augmente la difficulté à discriminer les zones de gel en fonction d'une image de référence.

2007-2008

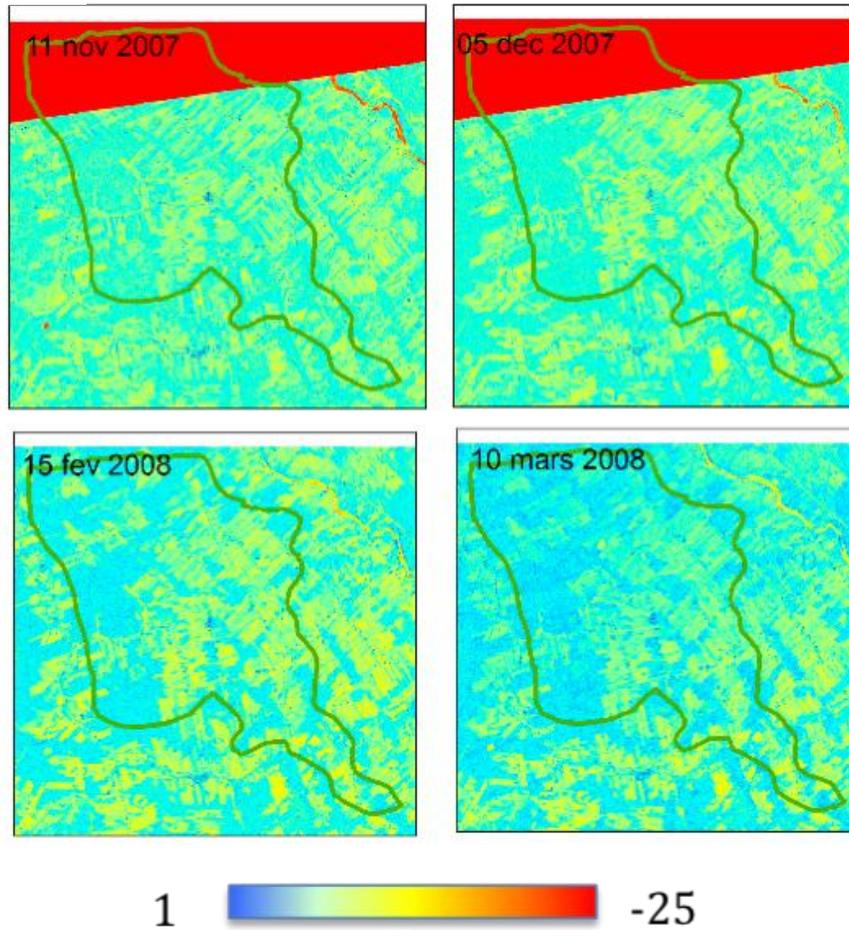


Figure 14 a. Évolution des coefficients de rétrodiffusion du BDH au cours de l'hiver 2007-08

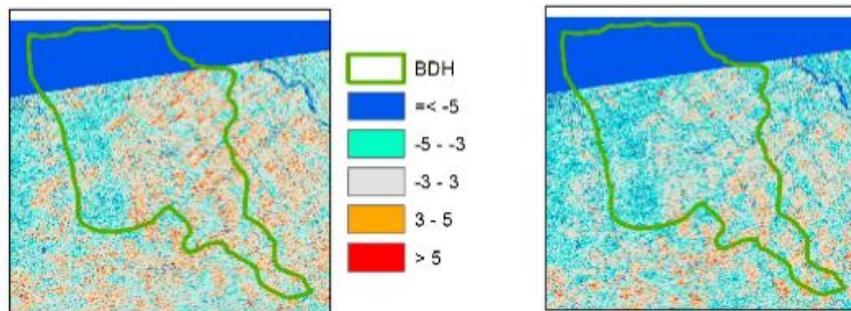


Figure 14 b. Différences des coefficients de rétrodiffusion du BDH en utilisant l'image de référence du 11 novembre 2007

dB_11nov2007– dB_15Fév2008 :

- Rouge : Différence > 3dB
représentant 19 % des parcelles
cultivées
- Bleu : Différence < -3 dB
représentant 19% des parcelles
cultivées

dB_11nov2007 – dB_10mars2008 :

- Rouge : Différence > 3dB
représentant 10 % des parcelles
cultivées
- Bleu : Différence < -3 dB
représentant 27% des parcelles
cultivées

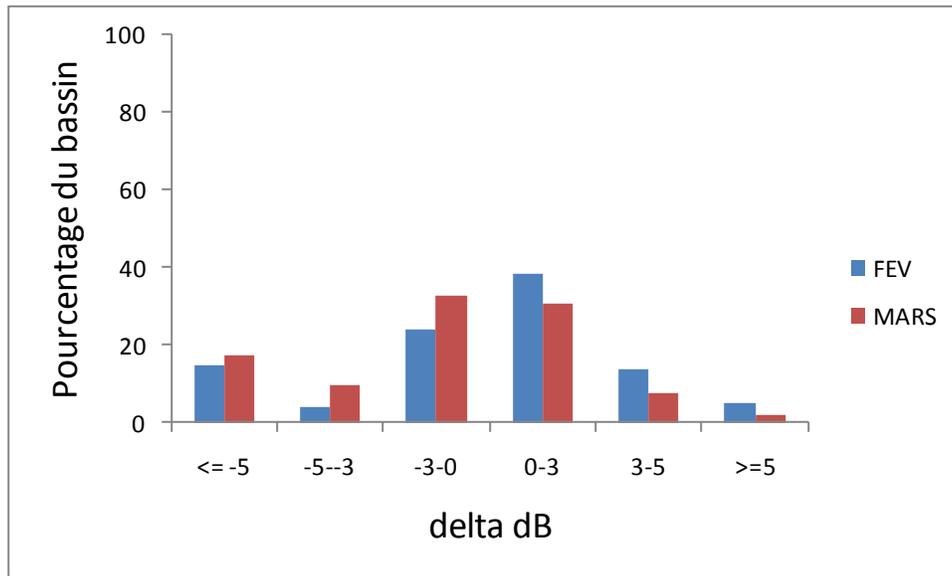


Figure 14. Différence de classification par différences de dB au cours de l'hiver 2007-2008

La figure 15a permet de visualiser la variabilité temporelle du signal de rétrodiffusion. On constate donc que dès novembre, une certaine portion du bassin présente des valeurs de rétrodiffusion assez faible (en jaune). Le signal faiblit graduellement au cours de l'hiver avec l'importance de l'implantation du gel du sol. En mars et avril les valeurs sont très contrastées et paraissent beaucoup plus élevées (bleu).

2008-2009

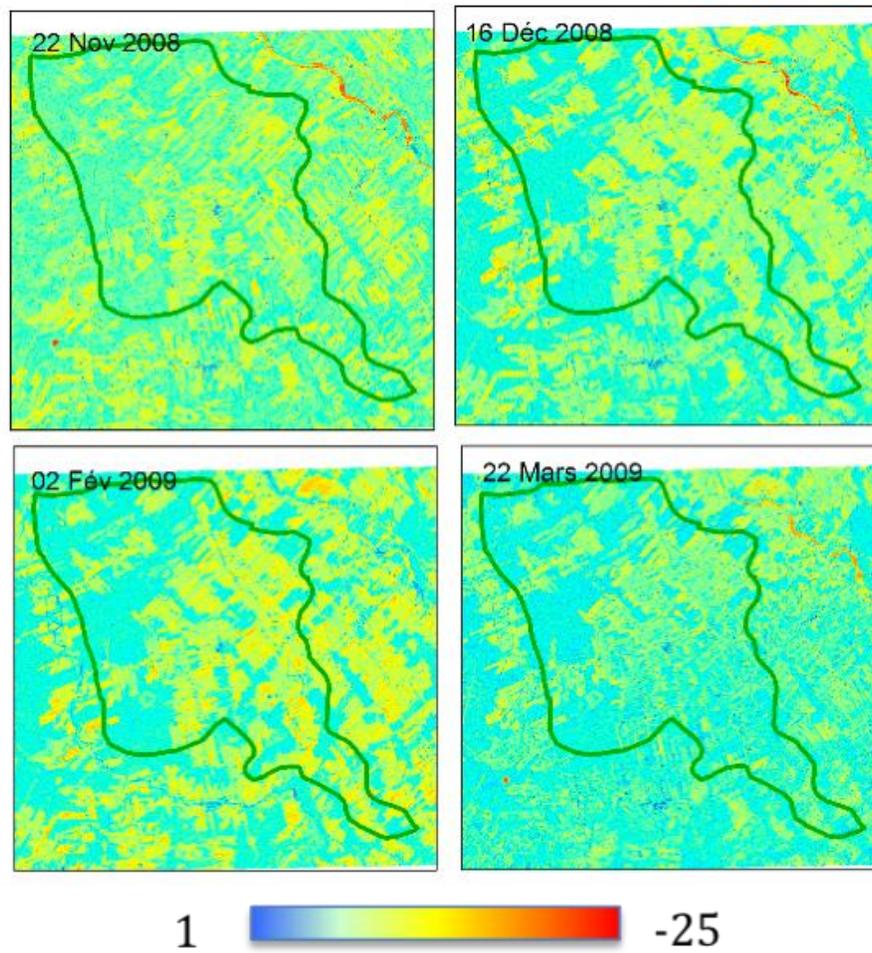


Figure 15 a. Évolution des coefficients de rétrodiffusion du BDH au cours de l'hiver 2008-09

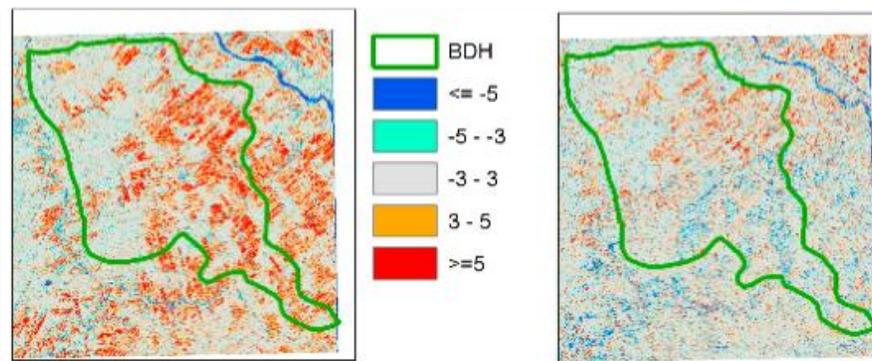


Figure 15 b. Différences des coefficients de rétrodiffusion du BDH en utilisant l'image de référence du 15 avril 2009

dB_15avril2009 – dB_02Fév2009 :

- Différence > 0 dB sur la majorité des parcelles cultivées (67%) et >=3 sur 27 % des parcelles cultivées (en rouge)

dB_15avril2009 – dB_22mars2009 :

- Rouge : Différence > 3dB dans la partie nord représentant 14 % des parcelles cultivées
- Bleu : Différence < -3 dB dans la partie sud représentant 14% des parcelles cultivées

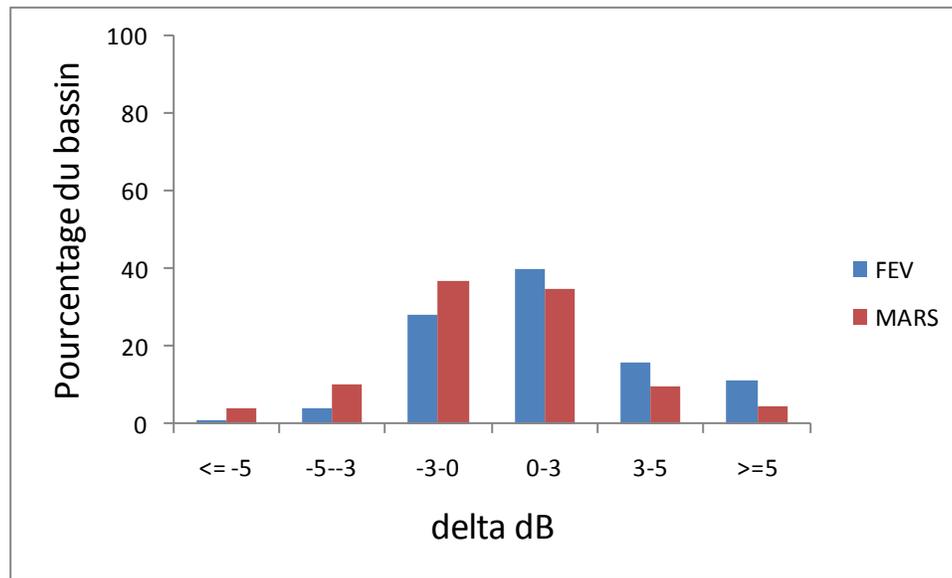


Figure 15c. Différence de classification par différences de dB au cours de l'hiver 2008-2009

Les figures 13, 14 et 15 démontrent bien l'importance d'obtenir une image de référence dont les niveaux d'humidité du sol sont connus. Par exemple, une image après une pluie importante à l'automne, ou peu de temps après la fonte des neiges permettrait d'avoir une image de sol humide qui pourrait permettre de discriminer l'apparence de sols secs lors de l'implantation du gel. Également, une analyse des conditions météo lors de la saisie des images est essentielle afin d'éviter une mauvaise interprétation des résultats de classification.

4.6. Utilisation de modèles semi-empiriques

La résolution par inversion des modèles de radar peut permettre de quantifier les paramètres qui influencent le retour de l'onde. Ainsi, dans la littérature un certain nombre de modèles d'inversion, basée sur des mesures terrains ont permis la résolution des équations. Les modèles souvent cités incluent ceux de Oh *et al.* 1992 et Dubois *et al.* 1995. Ce dernier modèle a d'ailleurs été ajusté sous les conditions québécoises dans une étude menée à l'Université de Sherbrooke (Sahebi and Angles, 2009). L'utilisation de plan de polarisation (HH et HV) permet la résolution complète de l'équation ce qui permettrait d'obtenir une évaluation de la constante diélectrique du milieu directement avec les données de RADARSAT-2.

$$\sigma_{hh}^0 = 10^{-2.75} \frac{\cos^{1.5} \theta}{\sin^5 \theta} 10^{0.028 \varepsilon \tan \theta} (kh \sin \theta)^{1.4} \lambda^{0.7}$$

Où les paramètres θ et λ réfèrent à l'angle d'incidence et à la longueur d'onde incidente, tandis que ε et kh réfèrent respectivement à la constante diélectrique et la hauteur moyenne de rugosité (*root mean square height*). La résolution de l'équation donne :

$$\varepsilon = \frac{C_{vv}(\Sigma_{hh} - A_{hh}) - C_{hh}(\Sigma_{vv} - A_{vv})}{\tan \theta (B_{hh} C_{vv} - B_{vv} C_{hh})}$$

$$h = \frac{\lambda}{2\pi \sin \theta} 10^{\{B_{hh}(\Sigma_{vv} - A_{vv}) - B_{vv}(\Sigma_{hh} - A_{hh})\} / (B_{hh} C_{vv} - B_{vv} C_{hh})}$$

Où :

$$A_{hh} = 1.5 \log(\cos \theta) - 5 \log(\sin \theta) + 0.7 \log(\lambda) - 2.75$$

$$A_{vv} = 3 \log(\cos \theta) - 3 \log(\sin \theta) + 0.7 \log(\lambda) - 2.35$$

$$B_{hh} = 0.028 B_{vv} = 0.046$$

$$C_{hh} = 1.4 C_{vv} = 1.1$$

$$\Sigma_{hh} = \log(\sigma_{hh}^0) \quad \Sigma_{vv} = \log(\sigma_{vv}^0)$$

Avec RADARSAT-1, la résolution d'un modèle peut être possible si l'on peut estimer soit la rugosité apparente ou la constante diélectrique. Une étude a réussi à utiliser le modèle de Dubois avec RADARSAT-1 en posant l'hypothèse que la rugosité était peu variable au cours d'une année et que la teneur en eau des sols directement après une pluie était uniforme sur l'ensemble d'un bassin. Une approche semblable pourrait être utilisée avec certains hivers où une des images nous présente un gel du sol sur la majorité du territoire (teneur en eau $\approx 10\%$). Il faut toutefois être conscient qu'à l'échelle locale, la résolution de ces équations a présenté des résultats très variables probablement dû par la variabilité locale des paramètres de rugosité et de teneur en eau alors qu'à une échelle régionale (champs ou bassins versants), les résultats étaient fortement corrélée avec les teneurs en eau mesurées (Leconte and Brissette, 2004).

5. Conclusion et recommandations

L'utilisation des données radar monopolarisées a été utilisée avec succès dans la cartographie du gel du sol à l'échelle d'un bassin versant. Les modèles proposés par Khaldoune ont été révisés afin d'inclure des intervalles où la cartographie du gel est incertaine. L'approche par détection de changement a également été testée. Cette méthode permet d'éliminer les défis liés à la classification des facteurs affectant le signal de rétrodiffusion. Toutefois, la détection de changement est affectée par les conditions prévalant lors de la saisie de l'image de référence. Une troisième approche, par la résolution de modèles semi-empirique, devrait être explorée afin de pouvoir exploiter les données polarimétriques de RADARSAT-2.

5.1. *Recommandations sur l'utilisation des modèles de régression en dehors des zones de calibration.*

1. Les modèles de régression permettent d'établir la relation entre l'état du sol et le signal mesuré par radar mais sont valables seulement lorsqu'on peut estimer tous les facteurs qui influencent le signal (rugosité, angle d'incidence, climat). Ainsi, il faut créer un modèle pour chaque groupe significatif (sol-culture-management) sans oublier l'influence des orientations des labours sur le signal de rétrodiffusion. Ces modèles demandent donc un minimum de données d'entrée pour être valides. L'utilisation de données telle que la *Base de Données des Cultures Assurées (BDCA)* peut permettre d'estimer au Québec les zones où le sol est nu de même que l'orientation des parcelles. Malgré l'utilisation de la BDCA, ces données ne fournissent pas l'information sur la gestion des résidus, le type de labour de même que la période du labour. Pour combler ce manque, il faudrait soit procéder à l'acquisition et au classement d'une image visible à haute résolution à l'automne de l'année à classer le territoire, ou de demander à l'utilisateur potentiel de collecter l'information. D'autres chercheurs d'Agriculture et Agroalimentaire Canada étudie présentement la possibilité de cartographier grâce à RADARSAR-II les quantités de résidus de culture laissés aux champs au cours de la période hivernale (McNairn *et al.*, 1996, McNairn *et al.*, 2001). En plus de permettre une meilleure discrimination des groupes de rugosités dans la classification du gel, cette information est cruciale dans l'analyse de risque d'érosion hydrique à la fonte, puisque les résidus permettent de ralentir la lame de ruissellement et ainsi de réduire sa capacité de transport en sédiment. Dans le cas de Black Brook, nos données préliminaires nous indiquent qu'il existe d'autres sources de variabilité qui devraient être prises en compte. Il est possible que les parcelles qui suivent les contours du terrain ajoutent à la difficulté de discriminer seulement en fonction du signal de rétrodiffusion.
2. L'utilisation d'intervalles de confiance sur les modèles de régression permet de réduire les risques d'introduire des artefacts de classification. Ainsi, il est recommandable de demeurer le plus conservateur possible pour les données qui n'appartiennent à aucun groupe. Malgré tout, l'utilisateur doit être conscient du risque potentiel d'erreur de classification. Selon notre analyse, une classification suivant les contours des parcelles agricoles est un bon indice classification partiellement erronée. Dans Balck Brook, l'utilisation des modèles établis dans le BDH peuvent permettre d'estimer les zones de gel, mais la zone d'incertitude associée à

ces modèles devraient être augmentée afin de considérer les effets liés aux variations d'angles d'incidence, de rugosité et d'orientation des parcelles.

5.2. *Autres avenues à explorer*

Une analyse des autres approches disponibles devrait être effectuée afin de comparer les résultats de la classification du gel du sol (voir section 4). Les images RADARSAT-II pourrait permettre de résoudre le modèle semi-empirique proposé Dubois (1995) par et ainsi obtenir directement une estimation de la constante diélectrique du milieu. Dans le but d'obtenir les probabilités de récurrence des zones de gel, l'analyse des images classifiées devrait être couplée à un modèle de bilan thermique du sol. Une analyse de la faisabilité d'utiliser de tels modèles sous nos conditions et de la performance de la prédiction du modèle devrait être effectuée avant de considérer l'inclure dans un système d'aide à la décision.

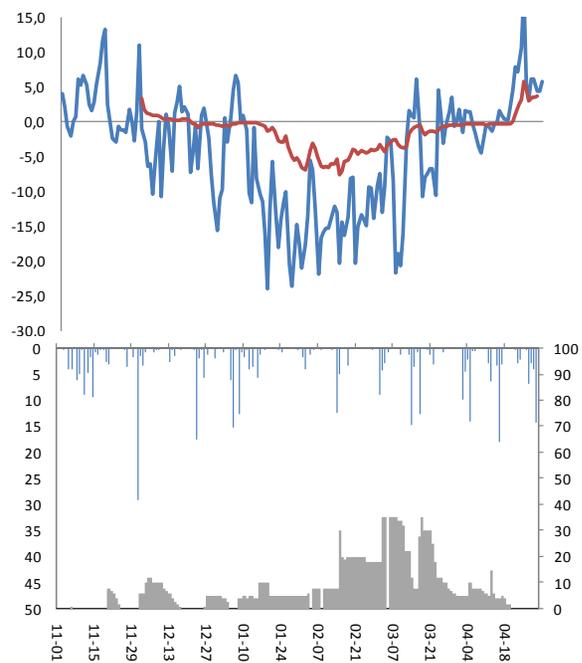
6. Références

- J. Alvarez-Mozos, J. Casali, M. Gonzalez-Audicana, N. Verhoest. 2005. Correlation between Ground Measured Soil Moisture and RADARSAT-1 derived Backscattering Coefficient over an Agricultural Catchment of Navarre (North of Spain). *Biosystems Engineering*. 92 (1) 119–133
- Y. Gauthier, M. Bernier and J.P. Fortin. 1998. Aspect and incidence angle sensitivity in ERS-1 SAR data. *Int. J. Remote Sensing*. 19(10) 2001-2006
- N.F. Glenn and J.R. Carr. 2004. Establishing a relationship between soil moisture and RADARSAT-1 SAR data obtained over the Great Basin, Nevada, U.S.A. *Can. J. Remote Sensing*. 30(2) 176–181
- J. Khaldoune 2006. Développement d'une méthode de mesure et de cartographie du gel du sol en milieu agricole à l'échelle d'un bassin versant à partir d'images radar monopolarisées (RADARSAT-1), multipolarisées (ENVISAT) et polarimétriques (RADARSAT-2, CONVAIR). Thèse de doctorat
- J. Khaldoune, M. Bernier, M.C. Nolin, E. vanBochove. 2009. Mapping agricultural frozen soil on the watershed scale using remote sensing data. Submitted to *Remote sensing of Environment*.
- K. Lagacé, M. Bernier, Y. Gauthier. 2002. Cartographie du gel saisonnier du sol en zone de taïga à partir d'images RSO de RADARSAT-1 et SSM/I de DMSP F-8. *Téledétection*. 2 (3) 161-175
- R. Leconte and F. Brissette. 2004. Mapping near-surface soil moisture with RADARSAT-1 synthetic aperture radar data. *WATER RESOURCES RESEARCH*. 40 W01515, doi:10.1029/2003WR002312.
- H. McNairn, J.B. Boisvert, D.J. Major, Q.H.J. Gwyn, R.J. Brown and A.M. Smith. 1996. Identification of Agricultural Tillage Practices From C-Band Radar Backscattering, *Can. J. Remote Sens.* 22 154-162.
- H. McNairn, C. Duguay, J.B. Boisvert, E. Huffman, B. Brisco. 2001. Defining the Sensitivity of Multi-frequency and Multi-polarized Radar Backscatter to Post-Harvest Crop Residue; *Can. J. of Remote Sens.* 27(3) 247-263
- F.T. Ulaby, M.K. Moore and A.K. Fung. 1986. *Microwave Remote Sensing, Active and Passive*. Vol. 3. Artech House. Norwood. MA
- F.B. Sanli, Y. Kurucu, M. T. Esetlili, S. Abdikana. 2008. SOIL MOISTURE ESTIMATION FROM RADARSAT -1, ASAR AND PALSAR DATA IN AGRICULTURAL FIELDS OF MENEMEN PLANE OF WESTERN TURKEY. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B7. Beijing 2008

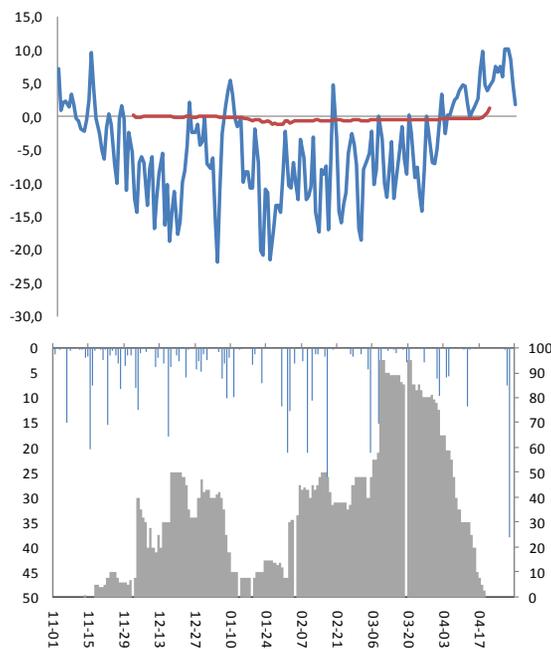
M. R. Sahebi and J. Angles. 2009. An inversion method based on multi-angular approaches for estimating bare soil surface parameters from RADARSAT-1 Hydrol. *Earth Syst. Sci. Discuss.* 6 207–241

ANNEXE 1a. BDH- Analyse des conditions météos lors de prise de l'image RADARSAT

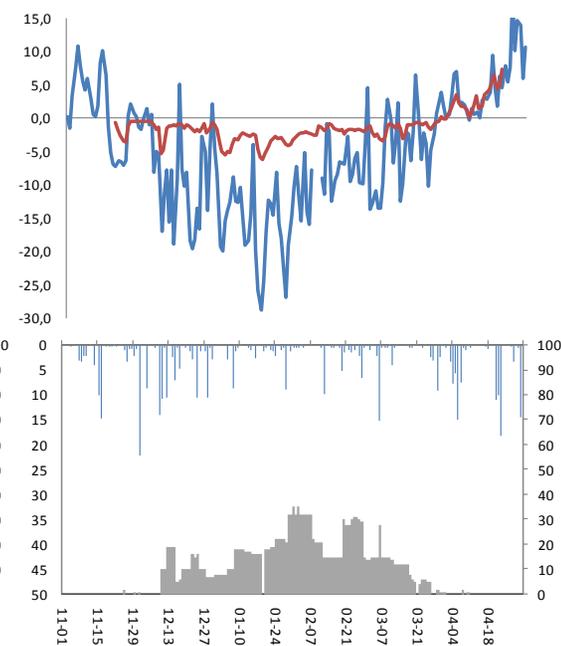
2006-2007



2007-2008



2008-2009



ANNEXE 1b.

BDH- Analyse des conditions météos lors de prise de l'image RADARSAT

| Date acquisition | Heure | Conditions atmosphériques | | | | | | nb j sans pluie | Commentaires |
|-------------------|--------------|---------------------------|-------------|--------------|----------------|-----------|--------------|-----------------|---|
| | | T moy | T max | T min | Précipitations | H Neige | | | |
| 2006-2007 | | | | | | | | | |
| 08-déc-06 | 17:35 | -10,7 | -7,9 | -12,3 | 0 | 14 | 1 | | |
| 27-janv-07 | 17:35 | -19,1 | -15,1 | -23,0 | 0 | 14 | >7 | | |
| 20-févr-07 | 17:35 | -14,9 | -11,4 | -20,6 | 0 | 13 | >7 | | |
| 16-mars-07 | 17:35 | -10,7 | -9,0 | -14,9 | 1 | 5 | 1 | | |
| 29-mars-07 | 17:35 | 0,22 | 6,89 | -6,32 | 0 | 0 | >7 | | Fonte de neige, faible couverture restante |
| 2007-2008 | | | | | | | | | |
| 11-nov-07 | 17:35 | -2,2 | 1,4 | -5,9 | 0 | 0 | 4 | | |
| 05-déc-07 | 17:35 | -6,9 | -5,4 | -10,3 | 1 | 14 | >7 | | |
| 22-janv-08 | 17:35 | -11,0 | -8,5 | -18,9 | 7 | 22 | 4 | | Neige fraîche |
| 15-févr-08 | 17:35 | -7,5 | -1,8 | -17,5 | nd | 45 | >7 | | Neige fraîche (3mm à Scott) |
| 10-mars-08 | 17:35 | -12,1 | -6,0 | -19,5 | nd | 57 | 3 | | |
| 14-avr-08 | 17:35 | 1,4 | 6,1 | -3,2 | 0 | 31 | 2 | | Fonte de neige, Couverture importante |
| 2008-2009 | | | | | | | | | |
| 22-nov-08 | 17:35 | -6,6 | -4,9 | -8,4 | 0 | 2 | 6 | | |
| 16-déc-08 | 17:35 | -7,6 | 0,2 | -12,0 | 0 | 0 | 1 | | 7 mm avec + 10oC le 15 déc froid lors du passage |
| 18-déc-08 | 17:34 | -8,1 | -6,3 | -10,3 | 0 | 22 | | | Neige fraîche |
| 09-janv-09 | 17:35 | -14,8 | -13,1 | -16,6 | 0 | 31 | >7 | | Neige fraîche de 2 jours |
| 25-janv-09 | 17:25 | -22,5 | -17,1 | -33,8 | -1 | 42 | >7 | | |
| 02-févr-09 | 17:35 | -5,2 | -0,9 | -15,7 | 0 | 36 | >7 | | Neige fraîche de 2 jours |
| 21-févr-09 | 17:38 | -8,5 | -6,4 | -10,5 | -1 | 23 | ? | | Neige fraîche de 2 jours |
| 07-mars-09 | 17:30 | 2,9 | 5,3 | 1,1 | 0 | 22 | 1 | | NEIGE HUMIDE!! |
| 22-mars-09 | 17:35 | -3,8 | 0,0 | -10,3 | 0 | nd | >7 | | 1 mm pluie/neige le 21 mars |
| 31-mars-09 | 17:30 | 0,5 | 3,3 | -1,2 | 0 | nd | 1 | | |
| 15-avr-09 | 17 :30 | 2.3 | 10.8 | -4.1 | 0 | 0 | >7 | | |

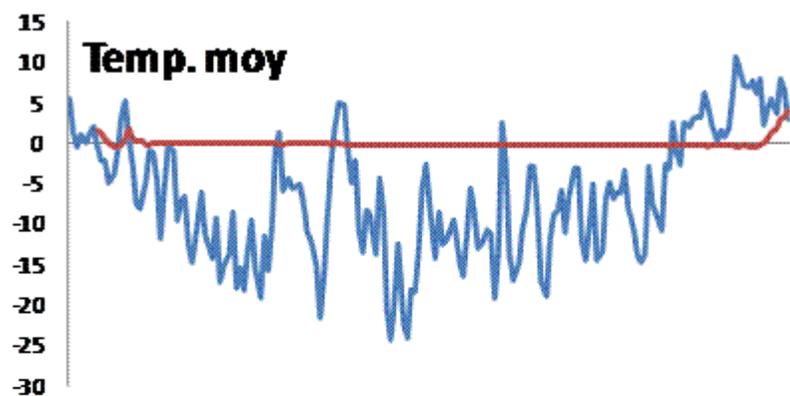
En rouge : Présence de neige humide sur le territoire

En gris : image RADARSAT-2

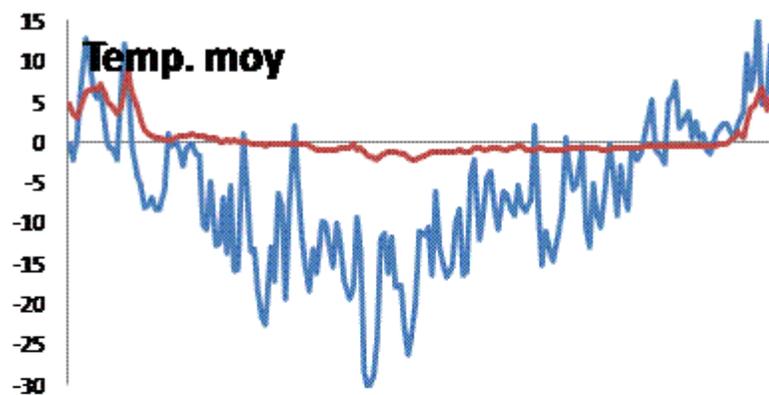
ANNEXE 1c.

BBW - Analyse des conditions météo lors de prise de l'image RADARSAT

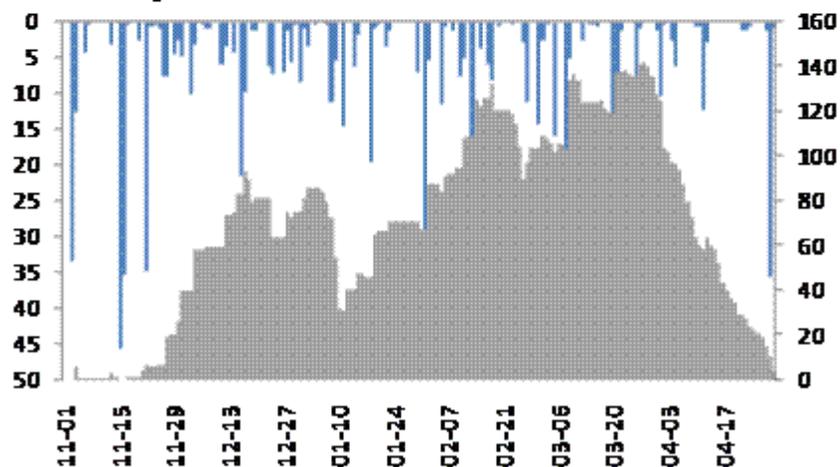
2007-2008



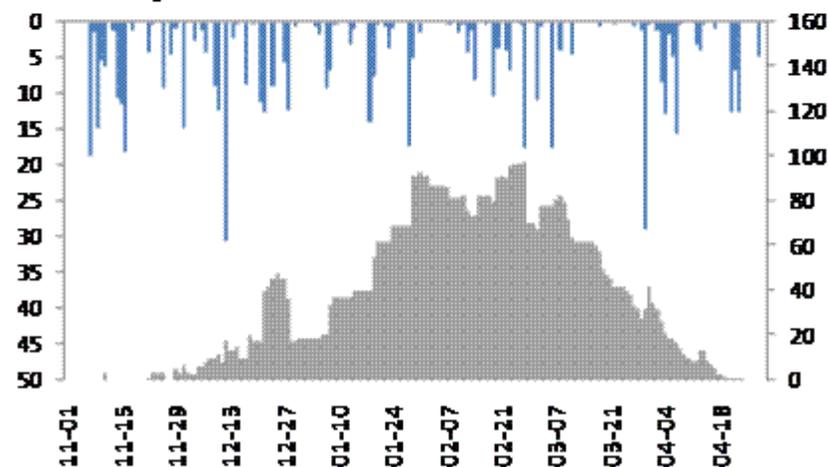
2008-2009



Précipitations



Précipitations



ANNEXE 1d.

BBW - Analyse des conditions météo lors de prise de l'image RADARSAT

| | | Conditions atmosphérique | | | | | | | |
|------------------|-------|--------------------------|-------|-------|----------------|---------|-----------------|--|--|
| Date acquisition | Heure | T moy | T max | T min | Précipitations | H Neige | nb j sans pluie | Commentaires | |
| 2007-2008 | | | | | | | | | |
| 08-nov-07 | 17:22 | -0,4 | 1,4 | -2,1 | 0,0 | T | 1 | Fort probablement Non-Gelé!! | |
| 19-janv-08 | 17:22 | -8,1 | -4,1 | -12,1 | 0,8 | 65 | >7 | Neige fraîche | |
| 05-févr-08 | 17:22 | -10,8 | -4,4 | -17,2 | 11,4 | 84 | 6 | Neige fraîche | |
| 07-mars-08 | 17:22 | -3,0 | 4,6 | -10,6 | 0,0 | 106 | 4 | Trace de pluie 4 jours + tôt, légère fonte | |
| 31-mars-08 | 17:22 | -3,0 | 4,2 | -10,2 | 1,0 | 128 | >7 | Début fonte | |
| 2008-2009 | | | | | | | | | |
| 18-nov-08 | | -4,1 | -1,2 | -7,0 | 1,0 | T | 2 | | |
| 26-nov-08 | 17:22 | 1,2 | 3,2 | -0,9 | 9,2 | 4 | 0 | Fonte de la neige au sol | |
| 15-déc-08 | | 1,2 | 7,2 | -4,9 | 0,4 | 15 | | Forte probabilité de neige humide | |
| 20-déc-08 | 17:22 | -21,7 | 15,6 | -27,8 | 0,0 | 18 | >7 | | |
| 05-janv-09 | | -9,9 | -4,9 | -14,9 | 1,6 | 19 | | Neige Fraîche | |
| 13-janv-09 | 17:22 | -9,4 | -2,3 | -16,5 | 3,0 | 37 | >7 | | |
| 06-févr-09 | 17:22 | -15,5 | -8,3 | -22,6 | 0,0 | 87 | >7 | | |
| 22-févr-09 | | -9,1 | -3,3 | -14,8 | 4,0 | 91 | | Neige Fraîche | |
| 02-mars-09 | 17:22 | -10,9 | -8,8 | -13,0 | 10,8 | 68 | 3 | Neige fraîche; 17 mm de pluie le 27 fév. | |
| 26-mars-09 | 17:22 | -1,4 | 8,0 | -10,7 | 0,0 | 38 | >7 | Fonte forte probabilité de neige humide | |
| 28-mars-09 | | 3,1 | 10,8 | -4,7 | 0,0 | 32 | | Fonte forte probabilité de neige humide | |

En rouge : Présence de neige humide sur le territoire

En gris : image RADARSAT-2

ANNEXE 2a.

BDH- Analyse des températures du sol lors de prise de l'image RADARSAT

| | <i>Hobos</i> | | | | | <i>Thermocouples</i> | | | | |
|------------|--------------|-------|------|-----|------|----------------------|-------|--------|-----|------|
| | T-5cm | min | max | nb | nb<0 | T-5cm | min | max | nb | nb<0 |
| 2006-2007* | | | | | | | | | | |
| 08-déc-06 | 0,7 | 0,0 | 1,6 | 29 | 1 | 1,0 | -0,2 | 3,5 | 25 | 3 |
| 27-janv-07 | -5,5 | -11,6 | -0,6 | 29 | 29 | -6,6 | -11,2 | -2,0 | 25 | 25 |
| 20-févr-07 | -4,6 | -10,5 | -1,5 | 29 | 29 | -3,7 | -6,5 | -0,7 | 25 | 25 |
| 16-mars-07 | -1,3 | -4,3 | -0,2 | 29 | 29 | -1,3 | -3,8 | 0,5 | 25 | 21 |
| 29-mars-07 | -0,5 | -0,8 | -0,1 | 29 | 29 | -0,1 | -1,5 | 3,8 | 25 | 16 |
| 2007-2008 | | | | | | | | | | |
| 11-nov-07 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 05-déc-07 | 0,0 | -0,7 | 0,7 | 41 | 25 | 0,9 | 0,0 | 2,9 | 18 | 0 |
| 22-janv-08 | -0,8 | -2,7 | 0,3 | 41 | 40 | 0,3 | -0,8 | 2,1 | 18 | 5 |
| 15-févr-08 | -0,6 | -1,1 | -0,2 | 41 | 41 | 0,4 | -0,7 | 2,8 | 18 | 6 |
| 10-mars-08 | -0,4 | -0,9 | -0,2 | 41 | 41 | 0,6 | -0,3 | 1,7 | 17 | 1 |
| 14-avr-08 | -0,3 | -0,6 | 0,1 | 41 | 40 | 0,2 | -0,8 | 2,3 | 17 | 7 |
| 2008-2009 | | | | | | | | | | |
| 22-nov-08 | -2,5 | -5,0 | -0,6 | 43 | 43 | --- | --- | --- | --- | --- |
| 16-déc-08 | -0,9 | -3,5 | -0,2 | 43 | 43 | -1,2 | -3,4 | 2,6 | 18 | 16 |
| 18-déc-08 | -0,9 | -2,1 | -0,2 | 43 | 43 | --- | --- | --- | --- | --- |
| 09-janv-09 | -2,1 | -4,4 | -0,6 | 43 | 43 | -1,4 | -3,4 | 2,6** | 18 | 17 |
| 25-janv-09 | -3,3 | -9,3 | -0,6 | 43 | 43 | -2,8 | -10,5 | 0,0*** | 18 | 17 |
| 02-févr-09 | -2,1 | -6,4 | -0,6 | 43 | 43 | -2,1 | -6,8 | 1,1** | 18 | 17 |
| 21-févr-09 | -1,7 | -6,1 | -0,6 | 43 | 43 | -1,5 | -4,2 | 0,3 | 18 | 17 |
| 07-mars-09 | -1,2 | -2,1 | -0,6 | 43 | 43 | -2,2 | -6,1 | 0,7 | 18 | 16 |
| 22-mars-09 | -0,5 | -0,7 | 0,4 | 43 | 42 | -1,2 | -2,9 | 0,5 | 18 | 17 |
| 31-mars-09 | 0,6 | -0,6 | 3,0 | 43 | 20 | 3,4 | -0,2 | 7,6 | 18 | 1 |
| 15-avr-09 | 3,9 | 0,8 | 6,4 | 43 | 0 | --- | --- | --- | --- | --- |

* Les HOBOS de 2006-2007 étaient installés à -10 cm; ** NF1_05_1; *** NF1_06 Bank

ANNEXE 2b.
**BDH- Températures mesurées aux thermocouples
(-1 et -5 cm) lors des passages de RADARSAT-1**

| NAME | -1 cm | | | | | -5 cm | | | | |
|----------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 08- déc- 06 | 27- janv- 07 | 20- févr- 07 | 16- mars- 07 | 29- mars- 07 | 08- déc- 06 | 27- janv- 07 | 20- févr- 07 | 16- mars- 07 | 29- mars- 07 |
| | 2006-2007 | | | | | | | | | |
| RO_02-1 | -0,1 | -4,6 | -2,3 | -0,9 | -0,2 | 0,7 | -4,0 | -2,0 | -0,7 | -0,3 |
| RO_02-2 | -0,1 | -5,9 | -3,4 | -3,3 | -0,6 | 0,3 | -4,6 | -3,6 | -2,8 | -0,6 |
| RO_03-1 | 1,2 | -4,3 | -3,1 | -1,9 | -0,8 | 1,4 | -3,8 | -3,2 | -1,6 | -1,5 |
| RO_03-2 | 2,8 | -6,6 | -5,0 | -3,7 | -0,4 | 3,5 | -6,1 | -4,6 | -2,7 | -0,5 |
| CH_02-1 | -0,8 | -8,3 | -5,0 | -4,0 | -0,1 | -0,1 | -7,5 | -4,3 | -3,8 | -0,1 |
| RO_13-1 | 0,3 | -1,8 | -0,9 | -2,4 | 0,1 | 1,6 | -2,0 | -0,8 | -1,5 | 0,2 |
| NF1_02-1 | 0,9 | -7,4 | -3,3 | -3,8 | 0,4 | 0,7 | -6,2 | -3,6 | -1,5 | -0,6 |
| NF1_02-2 | -0,2 | -8,9 | -3,4 | 0,2 | -0,6 | 0,0 | -7,5 | -3,1 | 0,5 | -0,4 |
| NF1_04-1 | -1,2 | -10,9 | -2,6 | -2,1 | 0,1 | -0,2 | -11,2 | -6,5 | -1,1 | -0,4 |
| NF1_04-2 | 0,0 | -10,0 | -5,9 | -2,2 | 0,3 | 0,8 | -7,9 | -6,5 | 0,2 | 0,6 |
| NF1_04-3 | -1,2 | -9,2 | -4,7 | -3,8 | 3,9 | 0,0 | -9,0 | -4,9 | -3,0 | 0,1 |
| NF1_06-1 | -0,2 | -8,5 | -1,7 | -0,9 | 0,2 | 1,0 | -6,1 | -2,1 | -0,9 | 0,2 |
| NF_06-3 | -1,0 | -11,3 | -4,7 | -4,0 | 0,8 | 0,7 | -9,9 | -4,9 | 0,4 | -0,4 |
| NF1_10A-1 | 0,3 | -6,0 | -3,9 | -0,4 | -0,5 | 0,9 | -5,8 | -3,5 | -0,6 | -0,2 |
| NF1_10A-2 | 0,8 | -6,6 | -5,7 | -3,8 | -1,2 | 1,4 | -5,7 | -5,2 | -3,2 | -0,8 |
| NF1-11-1 | -0,7 | -6,7 | -2,6 | -2,2 | 0,3 | -0,1 | -6,3 | -2,3 | -2,2 | -1,2 |
| NF1_11-2 | -0,1 | -7,3 | -4,0 | -1,3 | -1,7 | 0,7 | -6,6 | -3,7 | -1,3 | -1,2 |
| DF1_11-1 | 0,7 | -6,1 | -2,0 | -0,5 | -0,7 | 0,7 | -4,7 | -1,8 | -0,8 | -1,1 |
| DF1_12-1 | 1,2 | -6,1 | -3,3 | -2,5 | -0,5 | 2,2 | -5,3 | -2,8 | -1,7 | -0,7 |
| NF2_40A-1 | -0,3 | -8,7 | -6,1 | -0,6 | 0,4 | 0,5 | -7,9 | -6,1 | -0,8 | 0,2 |
| NF2_40A-2 | 0,4 | -4,4 | -1,5 | -0,4 | -0,4 | 1,0 | -3,5 | -0,7 | -0,1 | -0,8 |
| NF2_40B-1 | 2,1 | -9,6 | -6,0 | -1,7 | -0,1 | 2,6 | -8,6 | -5,6 | -1,9 | 0,0 |
| NF2_40B-2 | 0,3 | -9,9 | -5,0 | 0,2 | 0,8 | 1,1 | -9,9 | -5,2 | 0,4 | 0,9 |
| NF2_41A-1 | 0,3 | -8,2 | -3,4 | -0,4 | 3,7 | 1,0 | -7,4 | -2,9 | -0,3 | 3,8 |
| NF2_41B-1 | 1,3 | -7,1 | -3,0 | -1,9 | 1,6 | 1,8 | -6,4 | -2,7 | -0,9 | 1,6 |
| Moyenne | 0,3 | -7,4 | -3,7 | -1,9 | 0,2 | 1,0 | -6,6 | -3,7 | -1,3 | -0,1 |
| | 2007-2008 | | | | | | | | | |
| field_ID | 05- déc- 07 | 22- janv- 08 | 15- févr- 08 | 10- mars- 08 | 14- avr-08 | 05- déc- 07 | 22- janv- 08 | 15- févr- 08 | 10- mars- 08 | 14- avr-08 |
| CH1_01_1 | 1,3 | -1,4 | 0,1 | 0,0 | 0,1 | 1,8 | -0,8 | 0,6 | 0,0 | -0,2 |
| CH1_04_1 | 1,9 | 1,8 | 1,3 | 0,4 | | 2,1 | 2,1 | 1,5 | 0,4 | 0,0 |
| NF1_02_2 | 1,0 | 1,0 | 0,4 | 0,8 | 1,1 | 1,4 | 1,9 | 1,1 | 0,8 | -0,1 |
| NF1_02_3 | 0,2 | -0,1 | -0,4 | 0,0 | 0,5 | 0,5 | 0,1 | -0,6 | 0,2 | -0,6 |
| NF1_05_1 | 1,4 | 0,7 | 2,0 | 0,8 | -0,5 | 1,2 | 0,6 | 2,8 | 1,3 | 0,0 |
| NF1_06_3 | 0,4 | 0,6 | 0,0 | -0,5 | -0,8 | 0,6 | 0,6 | 0,3 | 0,4 | 0,8 |
| NF1_07_1 | -0,1 | -0,3 | 0,8 | 1,7 | -0,3 | 0,6 | 0,2 | 0,8 | 1,7 | 0,1 |
| NF1_09_1 | -0,4 | 0,0 | -0,5 | 0,9 | -0,5 | 0,0 | 0,3 | -0,7 | 1,2 | 0,4 |
| NF1_10_2 | 0,6 | 0,4 | -0,3 | 1,3 | -0,1 | 1,1 | 1,2 | -0,3 | 1,4 | |
| NF2_39_2 | 2,6 | 0,3 | 1,8 | 0,1 | 0,1 | 2,9 | 0,3 | 1,6 | 0,0 | 2,3 |

ANNEXE 2b. (Suite)

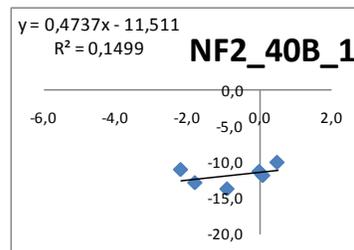
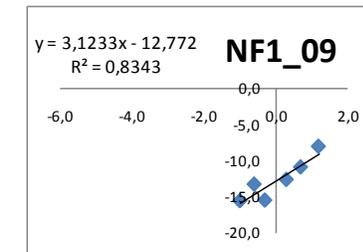
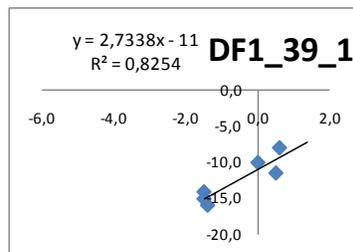
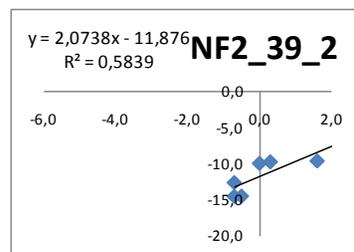
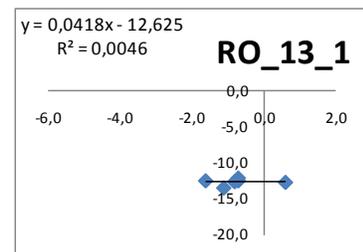
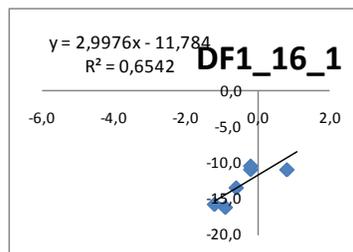
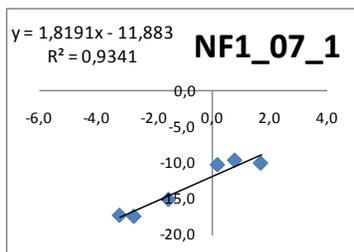
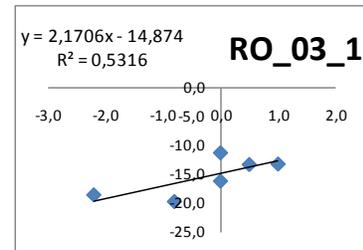
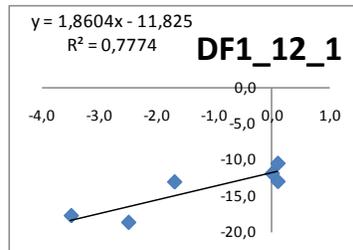
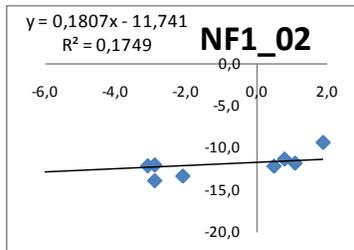
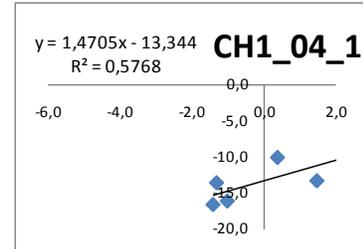
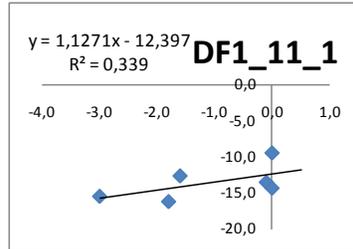
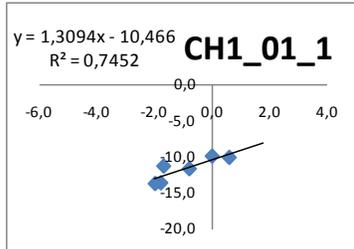
BDH- Températures mesurées aux thermocouples (-1 et -5 cm) lors des passages de RADARSAT-1

| field_ID | 2007-2008 | | | | | | | | | |
|----------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| | 05- déc- 07 | 22- janv- 08 | 15- févr- 08 | 10- mars- 08 | 14- avr-08 | 05- déc- 07 | 22- janv- 08 | 15- févr- 08 | 10- mars- 08 | 14- avr-08 |
| NF2_40B_1 | -0,5 | -0,3 | 0,0 | 0,8 | -0,2 | 0,3 | 0,0 | 0,1 | 0,5 | -0,4 |
| NF2_41A_1 | -0,2 | -1,2 | -0,6 | 2,0 | -0,1 | 0,2 | -0,8 | -0,5 | -0,3 | 0,4 |
| DF1_11_1 | 0,4 | -0,4 | -0,2 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | -0,1 | 0,0 | 0,0 | 1,1 |
| DF1_12_1 | 0,0 | -0,3 | -0,2 | -0,3 | 2,0 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,1 | 0,8 |
| DF1_16_1 | 0,8 | -0,4 | -0,2 | 0,7 | -0,4 | 1,1 | -0,2 | -0,2 | 0,8 | -0,4 |
| DF1_39_1 | 0,7 | 0,2 | -0,2 | 0,3 | 0,3 | 1,4 | 0,6 | 0,0 | 0,5 | -0,6 |
| RO_03_1 | 1,0 | -0,1 | 0,3 | 1,5 | | 1,0 | 0,0 | 1,0 | | 1,1 |
| RO_13_1 | 0,0 | -0,7 | -1,0 | 0,5 | -0,3 | 0,1 | -0,7 | -0,7 | 0,6 | -0,8 |
| Moyenne | 0,6 | 0,0 | 0,2 | 0,6 | 0,1 | 0,9 | 0,3 | 0,4 | 0,6 | 0,2 |

| NAME | 2008-2009 | | | | | | | | | |
|----------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| | 15- déc- 08 | 09- janv- 09 | 02- févr- 09 | 23- mars- 09 | 15- avr-09 | 15- déc- 08 | 09- janv- 09 | 02- févr- 09 | 23- mars- 09 | 15- avr-09 |
| CH1_01_1 | -2,0 | -1,9 | -2,2 | -2,5 | --- | -1,8 | -1,7 | -2,0 | -1,6 | --- |
| CH1_04 | -1,5 | -1,2 | -1,1 | -1,0 | --- | -1,3 | -1,0 | -1,4 | -1,3 | --- |
| DF1_11_1 | -2,0 | -2,1 | -2,9 | -1,6 | --- | -1,6 | -1,8 | -3,0 | -1,0 | --- |
| DF1_12_1 | -1,9 | -2,7 | -3,8 | -0,6 | --- | -1,7 | -2,5 | -3,5 | -0,5 | --- |
| DF1_16 | -0,8 | -1,1 | -1,6 | -0,2 | --- | -0,6 | -0,9 | -1,2 | -0,2 | --- |
| DF1_39 | -1,7 | -2,0 | -1,9 | 0,3 | --- | -1,5 | -1,4 | -1,5 | 0,5 | --- |
| NF1_02_2 | -3,0 | -3,0 | -2,3 | -1,1 | --- | -2,9 | -2,9 | -2,1 | -1,2 | --- |
| NF1_2BB1 | -3,9 | -3,9 | -5,5 | -3,7 | --- | -3,4 | -3,4 | -5,2 | -2,9 | --- |
| NF1_05_1 | 2,2 | 2,2 | 0,9 | -1,4 | --- | 2,6 | 2,6 | 1,1 | -1,5 | --- |
| NF1_06_B5 | -1,0 | -1,0 | -0,5 | -1,2 | --- | -0,9 | -0,9 | -1,1 | -0,9 | --- |
| NF1_07_1 | -2,0 | -3,2 | -3,6 | -2,6 | --- | -1,5 | -2,7 | -3,2 | -2,8 | --- |
| NF1_09 | -0,5 | -0,8 | -1,1 | -0,1 | --- | -0,3 | -0,6 | -1,0 | -0,1 | --- |
| NF1_10BB2 | -1,9 | -2,0 | -1,3 | -3,2 | --- | -1,7 | -1,9 | -1,2 | -2,9 | --- |
| NF2_39_3 | -0,8 | -0,9 | -0,9 | -2,1 | --- | -0,7 | -0,7 | -0,5 | -1,5 | --- |
| NF2_40B_2 | -2,3 | -1,6 | -0,3 | -1,0 | --- | -2,2 | -0,9 | -1,8 | -1,3 | --- |
| NF2_41A_3 | -1,9 | -2,8 | -6,6 | -1,3 | --- | -1,2 | -2,6 | -6,8 | -2,6 | --- |
| RO_03 | 0,4 | -1,0 | -1,9 | 0,6 | --- | 0,5 | -0,8 | -2,2 | -0,3 | --- |
| RO_13_1 | -1,2 | -1,9 | -0,9 | 0,0 | --- | -0,8 | -1,6 | -1,1 | -0,2 | --- |
| Moyenne | -1,4 | -1,7 | -2,1 | -1,3 | | -1,2 | -1,4 | -2,1 | -1,2 | |

ANNEXE 3.

BDH- Régression entre les différents points de mesures et la température mesurée au thermocouple



ANNEXE 4.

Classification des images RADARSAT grâce à EASI modelling de PCI geomatic

*** Creation of 3 distinct classes:

<= threshold : Frozen soil color #190 (red)

>= threshold : Unfrozen soil color # 55 (blue)

Within thresholds: Uncertain state soil color # 100 (gray)

%3=0

*** Classification des NODATA ***

if %1=0 then

 %3=255

Else

*** GROUP 1 : High residues, well to imperfectly drained ***

if (%1=1) then

 if (%2<=-15.34) then

 %3=190

 endif

 if (%2>=-12.37) then

 %3=55

 endif

 if (%2>-15.34) and (%2<-12.37) then

 %3=100

 endif

endif

*** GROUP 2 : High residues, badly to very badly drained ***

if (%1=2) then

 if (%2<=-15.76) then

 %3=190

 endif

 if (%2>=-12.85) then

 %3=55

 endif

 if (%2>-15.76) and (%2<-12.85) then

 %3=100

 endif

endif

*** GROUP 3: Low residues, well to imperfectly drained ***

if (%1=3) then

```
if (%2<=-12.98) then
%3=190
endif
if (%2>=-11.27) then
%3=55
endif
if (%2>-12.98) and (%2<-11.27) then
%3=100
endif
endif
```

*** GROUP 4: Low residues, badly to very badly drained ***

```
if (%1=4) then
if (%2<=-11.75) then
%3=190
endif
if (%2>=-10.38) then
%3=55
endif
if (%2>-11.75) and (%2<-10.38) then
%3=100
endif
endif
```

*** GROUP 5: Unclassified soils ***

```
if (%1=5) then
if (%2<=-13.66) then
%3=190
endif
if (%2>=-11.41) then
%3=55
endif
if (%2>-13.66) and (%2<-11.41) then
%3=100
endif
endif
endif
```

ANNEXE 5. Cartes de gel pour les hivers 2006-2007-2008

