

Université du Québec  
INRS Eau Terre Environnement

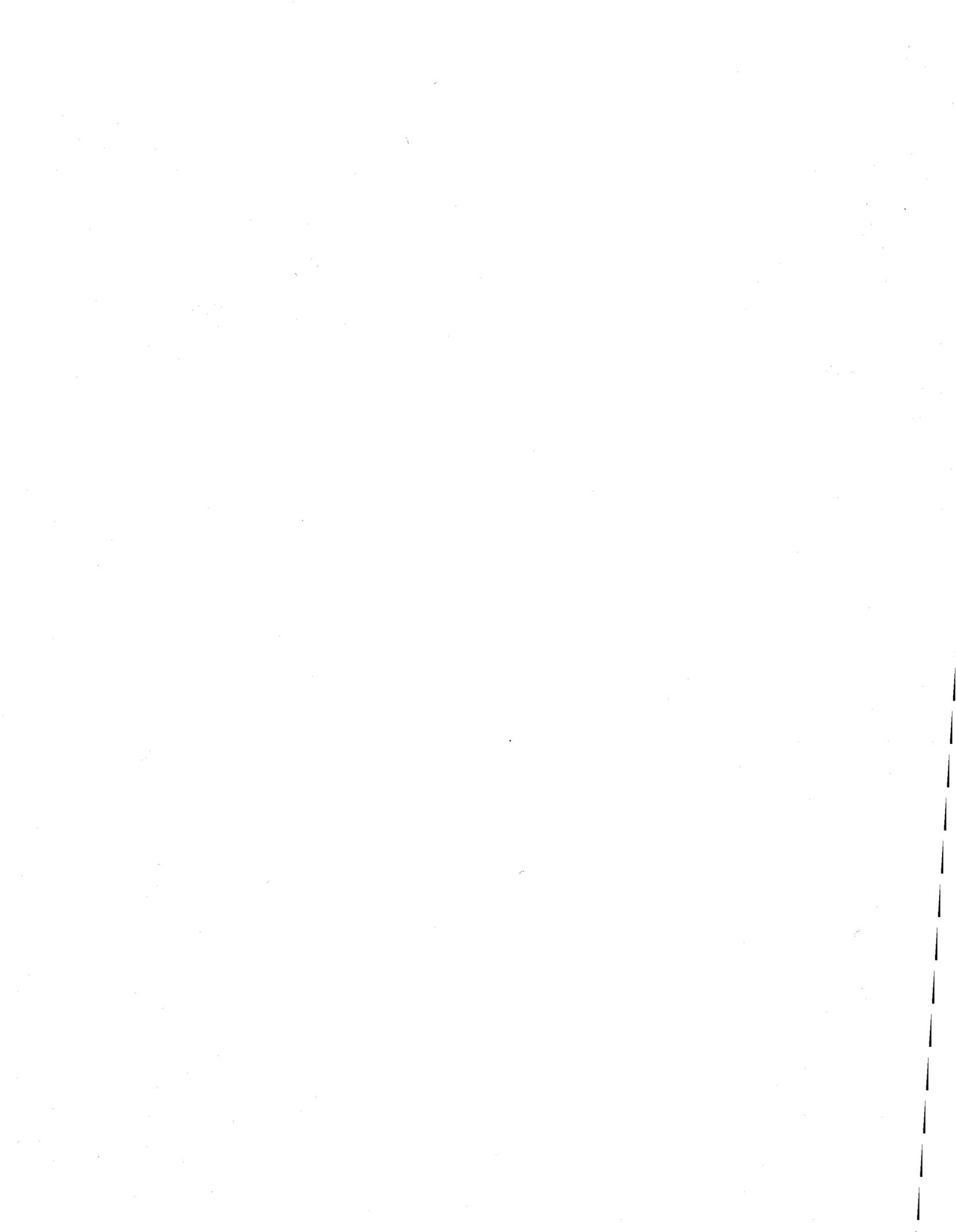
**CARTOGRAPHIE NUMÉRIQUE DE L'HUMIDITÉ DE SURFACE  
DES SOLS À L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE AGRICOLE À L'AIDE  
DE LA TÉLÉDÉTECTION ET DE LA PROSPECTION ÉLECTRIQUE**

Par  
Karine LABRECQUE

Mémoire présenté pour l'obtention  
du grade de *Magister Scientiæ*, M.Sc  
en sciences de l'eau

Jury d'évaluation

Examineur interne	André Saint-Hilaire INRS Centre Eau Terre Environnement
Examinatrice externe	Athyna Cambouris Agriculture et Agroalimentaire Canada
Directrice de recherche	Monique Bernier INRS Centre Eau Terre Environnement
Codirecteurs de recherche	Michel C. Nolin Laboratoires de pédologie et d'agriculture de précision Agriculture et Agroalimentaire Canada
	Daniel Cluis INRS Centre Eau Terre Environnement



## REMERCIEMENTS

Je remercie mon codirecteur Monsieur Michel C. Nolin de m'avoir suggéré le sujet de ce travail et d'avoir cru en mes capacités pour l'exécuter. Je tiens à lui exprimer ma plus profonde gratitude pour m'avoir fait bénéficier de ses vastes connaissances, sa générosité et sa patience. Tout cela m'a permis l'accès aux études supérieures.

Mes remerciements s'adressent aussi à ma directrice Madame Monique Bernier qui a accepté de me diriger pour ce mémoire. Je tiens à lui exprimer toute ma reconnaissance de m'avoir écoutée, supportée et facilitée la vie durant les moments plus difficiles. Merci d'avoir cru en moi.

Je souhaite remercier aussi mon codirecteur Monsieur Daniel Cluis pour son support financier ainsi que pour son temps passé à la correction de mes résumés et de mes affiches.

J'éprouve une reconnaissance toute spéciale envers Isabelle Perron qui fut tout au long de ce projet mon phare, mon guide. Elle a su aller chercher le meilleur de moi-même en temps opportun.

Je remercie toute l'équipe des Laboratoires de pédologie et d'agriculture de précision d'Agriculture et Agroalimentaire Canada d'avoir permis la récolte des données de terrain. En particulier, à Monsieur Mario Deschênes pour son sens de l'humour et son efficacité lors des sorties au champ. À mes collègues étudiants Karine Loranger et Jean-Daniel Sylvain pour leur participation au travail de terrain mais aussi pour leur dynamisme et leur humour qui ont rendu nos journées de travail agréables.

Bien sûr, je ne peux passer sous silence le soutien de mes proches (famille et belle-famille) qui ont posé au quotidien de petits gestes (repas, gardiennage, etc.) qui, au bout du compte, ont fait toute la différence.



# RÉSUMÉ

L'humidité du sol joue un rôle crucial pour les cultures. En effet, ce paramètre détermine la quantité d'eau et d'air disponible à la plante, deux éléments essentiels pour assurer la croissance des plantes. L'objectif de ce projet était de proposer une méthode de cartographie numérique de la teneur en humidité de la couche de surface des sols à l'échelle de la parcelle agricole à l'aide de la télédétection et de la prospection électrique des sols.

Le projet a été réalisé sur trois parcelles contiguës (15 ha) d'un micro-bassin expérimental du bassin versant du Bras d'Henri situées sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent. Des images satellitaires du secteur ont été acquises aux printemps 2007 et 2008 par deux types de signal, soit radar (RADARSAT-1) et optique (IKONOS). La conductivité électrique apparente (CEA) des sols a été mesurée en mode continu avec le conductivimètre VERIS 3100, dont le signal permet d'acquérir simultanément des données de conductivité électrique apparente pour des profondeurs de 0-30 et de 0-100 cm. Enfin, une caractérisation spatiale et temporelle de l'humidité de la surface du sol (0-10 cm), à partir de 164 points (grille non alignée de 30 m x 30 m) de mesure géoréférencés, a été effectuée à l'aide de l'appareil HydroSense CS620 à quatre reprises au cours du printemps 2007 (22, 25 et 28 mai ainsi que le 7 juin) et à huit reprises au cours du printemps 2008 (13, 15, 20, 22, 27, 30 mai ainsi que les 3 et 6 juin).

Dans un premier temps, l'analyse des coefficients de variation (CV) a montré que l'intensité de la variabilité spatiale et temporelle de l'humidité de surface des sols était généralement modérée (CV = 15-30%). L'analyse variographique des données d'humidité du sol a ensuite montré que cette variable présentait une structure spatiale dans les champs 1 et 2. Cette structure était particulièrement bien définie lors de deux relevés effectués en 2008 (27 mai et 3 juin). Ceci s'explique en partie par des conditions climatiques optimales, soit de faibles précipitations les jours précédant l'acquisition des mesures d'humidité de surface des sols. Parmi les variables auxiliaires étudiées, la réflectance associée à la bande spectrale du proche infrarouge ( $\rho$ -PIR) extraite d'une image IKONOS ( $r_s = 0,76$ ) de même que les valeurs de CEA mesurées entre 0-30 cm avec le VERIS 3100 ( $r_s = 0,73$ ) se sont révélées les variables les plus corrélées à l'humidité de surface du sol. Les corrélations les plus élevées ont été mesurées dans les champs 1 et 2 alors qu'elles étaient faibles dans le champ 3 dont les pratiques culturales et les divers aménagements ont modifié sensiblement les propriétés pédologiques intrinsèques. Ce sont également les données acquises lors du 27 mai et du 3 juin 2008 qui ont révélé les structures spatiales les plus intéressantes. Une carte numérique de la teneur en

humidité de la couche de surface des sols a donc été réalisée par krigeage ordinaire pour l'ensemble des trois parcelles pour ces mêmes dates.

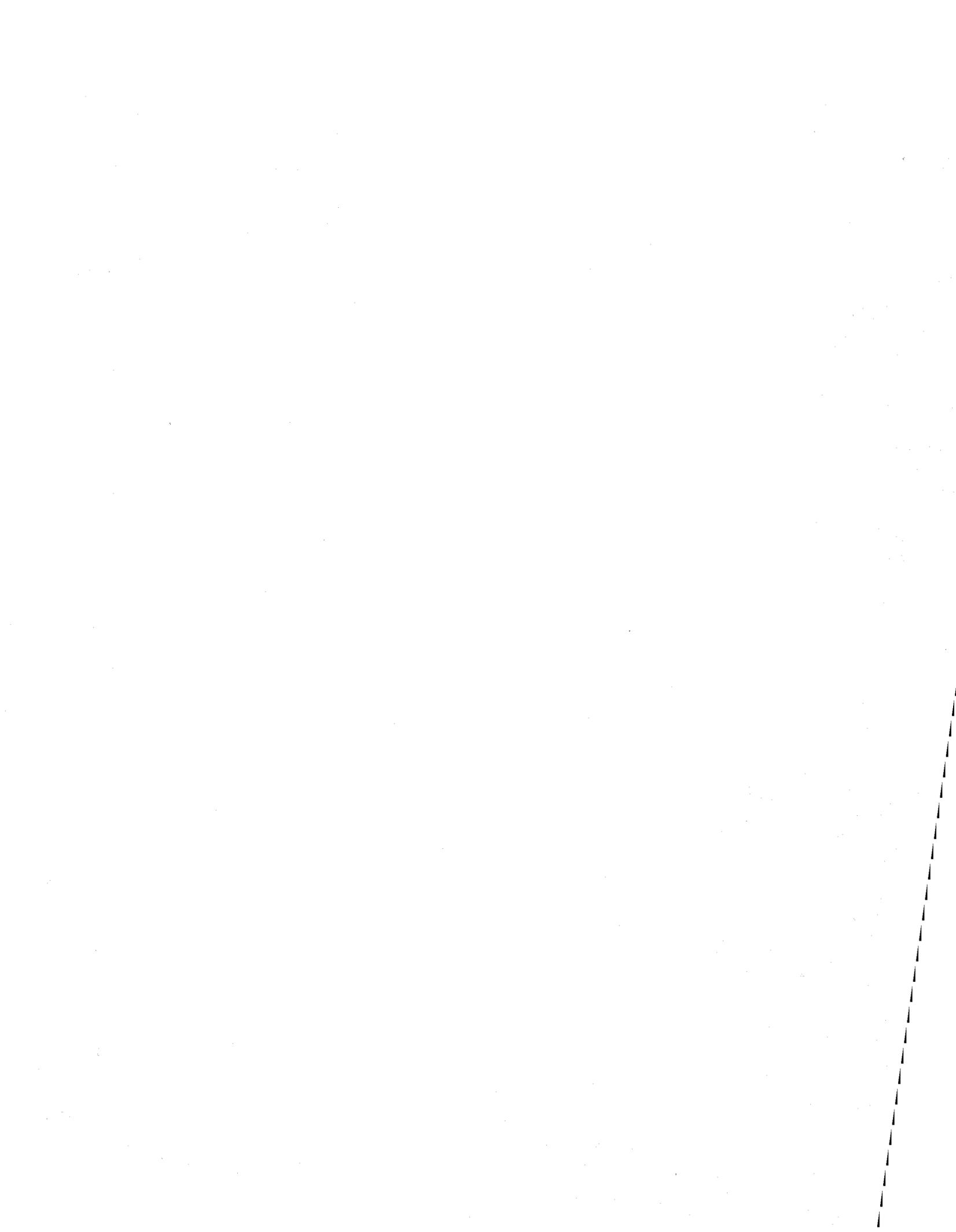
Les données de CEA de surface, la  $\rho$ -PIR ainsi que les coefficients de rétrodiffusion du signal HH ont été utilisés comme covariables pour effectuer les interpolations par cokrigeage. L'apport des variables auxiliaires de la CEA et du  $\rho$ -PIR ont permis d'améliorer la précision des modèles d'interpolation par rapport au krigeage ordinaire, plus particulièrement dans les champs 1 et 2 ainsi que pour les mesures d'humidité recueillies les 27 mai et 3 juin 2008. La télédétection et la prospection électrique des sols constituent donc des outils utiles pour améliorer la précision de la cartographie numérique de la teneur en humidité de surface des sols à l'échelle parcellaire mais l'efficacité de ces outils dépend des conditions météorologiques lors des prises de mesure au sol ainsi que l'état de pédoperturbation des parcelles lié aux pratiques culturales et travaux d'aménagement effectués.

# TABLE DES MATIÈRES

<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>iii</b>
<b>RÉSUMÉ</b> .....	<b>v</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES</b> .....	<b>vii</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>xi</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>xiii</b>
<b>CHAPITRE 1 : INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE</b> .....	<b>3</b>
2.1 Influence du climat sur la variabilité temporelle de l'humidité des sols .....	3
2.2 Influence du couvert végétal sur la variabilité spatio-temporelle de l'humidité des sols .....	3
2.3 Influence de la topographie sur la variabilité spatiale l'humidité des sols. ....	4
2.4 Influence des propriétés pédologiques sur la variabilité spatiale de l'humidité du sol .....	4
2.4.1 Texture .....	5
2.4.2 Contenu en matière organique .....	5
2.4.3 Structure du sol .....	5
2.4.4 Densité ou masse volumique apparente.....	6
2.5 Mesure de l'humidité du sol .....	7
2.5.1 Méthode gravimétrique .....	7
2.5.2 L'appareil TDR (Time Domain Reflectometry) .....	8
2.5.3 L'HydroSense CS620 .....	9
2.6 Cartographie de la variation spatio-temporelle de l'humidité du sol .....	10
2.6.1 Approche discrète et approche continue .....	10
2.6.2 Interpolation par krigeage isotrope et anisotrope .....	11
2.6.3 Interpolation par cokrigeage à l'aide de variables auxiliaires .....	13

2.7 Cartographie de l'humidité du sol à partir de la conductivité électrique apparente (CEA) .....	13
2.7.1 Instruments de mesure de la CEA des sols .....	14
2.7.2 VERIS 3100 .....	14
2.7.3 Geonics EM-38 .....	15
2.8 Cartographie de l'humidité de surface des sols à l'aide d'un modèle numérique d'altitude .....	16
2.9 Cartographie de l'humidité de surface des sols par télédétection .....	16
2.9.1 Imagerie satellitaire et aéroportée .....	16
2.9.2 Imagerie optique .....	17
2.9.3 IKONOS .....	18
2.9.4 Imagerie radar .....	19
2.9.5 Caractéristiques des images RADARSAT-1 .....	20
2.9.6 Caractéristiques des images RADARSAT-2 .....	20
<b>CHAPITRE 3 : MATÉRIEL ET MÉTHODES .....</b>	<b>23</b>
3.1 Description du territoire à l'étude .....	23
3.1.1 Localisation et description du site à l'étude .....	23
3.1.2 Climat .....	24
3.1.3 Région physiographique .....	26
3.1.4 Cadre pédologique régional .....	27
3.1.5 Cadre pédologique des trois parcelles étudiées .....	27
3.1.6 Cadre agronomique .....	35
3.2 Suivi spatial et temporel de la teneur en humidité des sols .....	36
3.2.1 Prospection électrique des sols .....	37

3.3 Stratégie d'acquisition et de traitement des images satellitaires .....	38
3.3.1 Acquisition et prétraitement des images Radarsat-1 .....	38
3.3.2 Acquisition et prétraitement de l'image IKONOS .....	40
3.3.3 Conversion des images radar et optique .....	42
3.4 Statistiques descriptives .....	42
3.4.1 Corrélations de Spearman .....	43
3.5 Geostatistiques .....	44
3.5.1 Variogramme .....	44
3.5.2 Validation croisée .....	46
<b>CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS .....</b>	<b>49</b>
4.1 Variabilité de la teneur en humidité de la couche de surface des sols .....	49
4.2 Analyse variographique de l'humidité des sols .....	57
4.3 Corrélation entre l'humidité de surface du sol et les variables auxiliaires .....	61
4.3.1 Relation entre l'humidité de surface et la CEA du sol .....	62
4.3.2 Relation entre l'humidité de surface et les mesures de réflectance extraites de l'image IKONOS ....	64
4.3.3 Relation entre l'humidité de surface et le coefficient de rétrodiffusion ( $\sigma^0$ ) du signal radar HH extraits de l'image Radarsat-1 .....	65
4.4 Krigeage et cokrigeage de l'humidité de surface des sols .....	67
4.5 Cartes numériques de l'humidité de surface des sols .....	69
<b>CHAPITRE 5 : CONCLUSIONS .....</b>	<b>73</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>77</b>
<b>DOCUMENTATIONS INTERNET .....</b>	<b>81</b>



## LISTE DES FIGURES

Figure 1 :	Structures de sol et écoulement.....	6
Figure 2 :	Mesure de l'humidité du sol avec le TDR : a) appareil, b) mesure en surface, c) calibration de l'appareil et d) mesure de l'humidité à différentes profondeurs du profil de sol.....	9
Figure 3 :	Appareil et HydroSense CS620 de Campbell Scientific.....	10
Figure 4 :	Modèle expérimental et théorique d'un variogramme et de ses paramètres.....	12
Figure 5 :	Instrument de mesure de la conductivité électrique apparente (CEA) VERIS 3100.....	14
Figure 6 :	a) Instrument de mesure de la CEA : le Geonics EM-38. b) Système de mesure en continue de la CEA des sols avec le Geonics EM-38 conçu et utilisé par les chercheurs des Laboratoires de pédologie et d'agriculture de précision d'Agriculture et Agroalimentaire Canada à Québec. ....	15
Figure 7 :	Diagramme du spectre lumineux et des longueurs d'onde.....	17
Figure 8 :	Échelle des longueurs d'onde (m) et des fréquences (Hz). ....	21
Figure 9 :	Exemple de polarisations offertes par trois satellites a) RADARSAT-1 polarisation simple HH; b) ERS polarisation simple VV; c) RADARSAT-2 et son capteur multi-polarisée et polarimétrique HH, VV, VH, HV. ....	22
Figure 10 :	Localisation du bassin versant du Bras d'Henri dans la région hydrologique de la basse Chaudière ainsi que des deux micro-bassins (en jaune) expérimentaux (micro-bassins d'intervention au sud et témoin au nord). ....	24
Figure 11 :	Précipitations journalières entre le 1 <sup>er</sup> mai et le 15 juin 2007 pour le secteur de Saint-Narcisse de Beaurivage.....	25
Figure 12 :	Précipitations journalières entre le 1 <sup>er</sup> mai et le 15 juin 2008 pour le secteur de Saint-Narcisse de Beaurivage.....	26
Figure 13 :	Carte pédologique très détaillée des trois parcelles à l'étude (Bossé 2007).....	29
Figure 14 :	Carte de la classe de drainage dominant les unités cartographiques établies par les pédologues suite aux travaux de prospection (Adaptée de Bossé (2007)).....	29
Figure 15 :	Stratégie d'échantillonnage des mesures de l'humidité de surface du sol avec l'appareil HydroSense CS620 aux printemps 2007 et 2008.....	37
Figure 16 :	Image RADARSAT-1 acquise le 15 mai 2008 du territoire à l'étude .....	39

Figure 17 :	Image IKONOS du 13 mai 2008 représentant le territoire étudié .....	41
Figure 18 :	Comparaison de la variabilité (CV, %) de la teneur en humidité de surface du sol mesurée à chaque date à l'échelle parcellaire à partir des 144 points de mesure (barre orange) et à l'échelle ponctuelle à partir des répétitions effectuées à chaque point de mesure dans les trois champs (barre verte) .....	56
Figure 19 :	Comparaison des cartes numériques d'humidité de surface des sols du 27 mai 2008 et du 3 juin 2008 obtenus par krigeage et cokrigeage à partir des données de CEA (0-30 cm ; VÉRIS 3100) et de réflectance de la bande du proche-infrarouge (IKONOS). .....	72

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 :	Longueur d'onde et résolution spatiale du satellite IKONOS.....	18
Tableau 2 :	Types de polarisation disponibles dans les diverses images radars.....	20
Tableau 3 :	Polarisations offertes selon le mode d'acquisition du satellite RADARSAT-2.....	22
Tableau 4 :	Caractéristiques des cinq séries de sols retrouvées dans les trois parcelles à l'étude.....	28
Tableau 5 :	Statistiques descriptives des teneurs en matière organique (M.O. %), sable, limon et argile (%) de la couche de surface (0-25 cm) des sols pour l'ensemble ainsi que pour chacun des champs étudiés.....	34
Tableau 6 :	Caractéristiques d'acquisition de l'image RADARSAT-1 au printemps 2008.....	39
Tableau 7 :	Caractéristiques d'acquisition de l'image IKONOS.....	41
Tableau 8 :	Classification des coefficients de variation (CV).....	50
Tableau 9 :	Statistiques descriptives des données d'humidité de surface des sols mesurées avec l'appareil HydroSense CS620 pour le champ 1.....	51
Tableau 10 :	Statistiques descriptives des données d'humidité de surface des sols mesurées avec l'appareil HydroSense CS620 pour le champ 2.....	52
Tableau 11 :	Statistiques descriptives des données d'humidité de surface des sols mesurées avec l'appareil HydroSense CS620 pour le champ 3.....	53
Tableau 12 :	Statistiques descriptives des données d'humidité prises avec l'appareil HydroSense CS620 pour l'ensemble des trois champs.....	55
Tableau 13 :	Échelle qualitative de la structure spatiale.....	57
Tableau 14 :	Analyse variographique isotrope intraparcellaire de l'humidité de surface du sol.....	60
Tableau 15 :	Analyse variographique isotrope de la teneur en humidité de surface des sols dans l'ensemble des trois parcelles.....	61
Tableau 16 :	Classification des coefficients de corrélation de Spearman ( $r_s$ ).....	62
Tableau 17 :	Résultats des coefficients de corrélation de Spearman ( $r_s$ ) obtenus entre les teneurs en humidité de surface des sols mesurées à différentes dates et les mesures de conductivité électrique apparente (CEA) des sols prises selon deux profondeurs (0-30 cm et 0-100 cm) le 12 mai 2008.....	63

Tableau 18 :	Résultats des coefficients de corrélation de Spearman ( $r_s$ ) obtenus entre l'humidité de surface des sols mesurés à différentes dates et les valeurs de réflectance du proche-infrarouge ( $\rho$ -PIR) extraites d'une image IKONOS acquise le 13 mai 2008. ....	65
Tableau 19 :	Résultats des coefficients de corrélation de Spearman ( $r_s$ ) obtenus entre l'humidité de surface des sols mesurés à différentes dates et les coefficients de rétrodiffusion ( $\sigma^0$ ) du signal radar HH extraits de l'image Radarsat-1 acquise le 15 mai 2008.....	66
Tableau 20 :	Comparaison des statistiques de validation-croisée pour chacun des champs pris individuellement ou ensemble en fonction de chacune des variables auxiliaires utilisées pour le cokrigage .....	71

## Chapitre 1 : Introduction

En agriculture, la distribution de l'humidité du sol a un impact sur les terres agricoles puisqu'elle détermine la disponibilité en eau et en air du sol (Baghdadi *et al.*, 2008), deux éléments essentiels à la production végétale. Un surplus ou un manque d'eau dans le sol a des répercussions non seulement sur les processus de croissance de la plante, mais aussi sur les processus microbiologiques et pédologiques.

D'un point de vue environnemental, la répartition de l'humidité du sol présente un intérêt tout aussi majeur, car elle aura un effet direct sur différents processus hydrologiques comme le ruissellement, l'infiltration, l'érosion ainsi que le lessivage, qui affecteront, à leur tour, la quantité et la qualité de l'eau de surface et/ou souterraine ainsi que la qualité des sols. Par ailleurs, la qualité de l'air peut elle aussi être affectée surtout lorsque le sol est gorgé d'eau. En effet, un sol saturé entraîne la dénitrification de l'azote résultant en formation de protoxyde d'azote ( $N_2O$ ), un gaz à effet de serre plus nocif que le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) (Brunelle, 2005).

À l'heure actuelle, les sources d'information sur les conditions d'humidité des sols sur le territoire québécois, se résument à quelques informations documentant le drainage et le régime hydrique des sols dans les études pédologiques, qui sont parfois obsolètes. Dans ces études, seule la variabilité spatiale de ces descripteurs est décrite, et ce à des échelles différant d'un comté à l'autre. D'ailleurs, l'information contenue dans ces études de comté, a été acquise par des pédologues, desquels l'interprétation (évaluation qualitative au toucher pour déterminer la granulométrie ou l'humidité du sol (Eilers, 1991) amène à des diagnostics qui peuvent diverger d'un expert à l'autre. De plus, l'étude pédologique d'un territoire donné a généralement été effectuée sur une longue période durant laquelle les conditions météorologiques ont sûrement différé d'une journée à l'autre, ce qui affecte encore une fois la fiabilité et la précision de l'information générée.

Aujourd'hui, l'ensemble des développements technologiques vient faciliter le monde de la recherche de diverses manières. Dans le cas de l'humidité du sol, on peut acquérir une densité de données en peu de temps pour un secteur précis grâce, entre autres, à la mesure en continue de la conductivité électrique apparente des sols. On peut aussi couvrir l'ensemble d'un bassin versant en très peu de temps grâce à l'acquisition de données satellites qui permettent d'acquérir un éventail d'information, dont l'humidité du sol. Ces développements technologiques permettent de diminuer la main-d'œuvre

requis pour un projet ou encore d'augmenter la superficie couverte tout en diminuant le temps et les coûts d'acquisition nécessaires à la couverture d'un territoire d'étude.

Ce nouveau savoir-faire fait évidemment partie intégrante de ce mémoire et permettra de mener à bien ce projet. L'objectif de ce projet était de proposer une méthode de cartographie numérique de la teneur en humidité de la couche de surface des sols à l'échelle de la parcelle agricole à l'aide de la télédétection et de la prospection électrique. Elle a pour fondement les hypothèses suivantes :

1. La mesure de l'humidité de surface des sols à l'aide de l'HydroSense CS620 de Campbell Scientific selon une grille d'échantillonnage systématique non alignée de 30 m x 30 m présente une structure spatiale à l'échelle de la parcelle agricole.
2. La conductivité électrique apparente (CEA) des sols, la réflectance spectrale ( $\rho$ ) extraite d'une image IKONOS ainsi que les coefficients de rétrodiffusion ( $\sigma^0$ ) du signal radar HH extraits d'une image RADARSAT-1 acquise en mode fin présentent de bonne corrélation avec la mesure de l'humidité de surface des sols.
3. L'utilisation de la CEA, de la  $\rho$  et des  $\sigma^0$  comme variables auxiliaires permettent de réduire l'erreur d'interpolation spatiale par cokrigage de l'humidité de surface des sols à l'échelle de la parcelle.

Le présent mémoire est constitué de cinq chapitres. Le premier chapitre est une introduction présentant la problématique concernant l'humidité du sol et l'objectif du projet. Le deuxième chapitre présente une revue bibliographique et fait état des différents paramètres qui influencent l'humidité du sol ainsi que des diverses approches méthodologiques disponibles pour la mesurer. Le troisième chapitre présente la démarche méthodologique choisie. On y fait une description du site étudié, sa localisation, son climat, son cadre pédologique et agronomique. De plus, on y décrit les différents appareils utilisés pour mesurer l'humidité du sol ainsi que les divers traitements géostatistiques et informatiques pour extraire l'information. Le quatrième chapitre fait état des résultats obtenus. Ils sont présentés de manière à répondre aux trois hypothèses pour ainsi atteindre l'objectif du projet. Enfin, le cinquième chapitre est la conclusion de cette étude et propose quelques améliorations pour de futures recherches.

## **Chapitre 2 : Revue de littérature**

La variabilité spatio-temporelle de l'humidité de surface des sols est influencée par : le climat, le sol ainsi que le mode d'occupation du sol (Eilers, 1991). Le climat fait référence au bilan hydrique de la zone étudiée. En ce qui concerne le sol, on y inclut les propriétés physiques du sol qui ont une influence sur la vitesse et la direction de l'eau et le temps de saturation. Pour le mode d'occupation, on fait référence aux effets des diverses pratiques agricoles sur la relation entre l'eau et le sol (Eilers, 1991).

### **2.1 Influence du climat sur la variabilité temporelle de l'humidité des sols**

L'apport d'eau au sol se fait sous forme de pluie, neige, rosée, brouillard, etc. Toute l'eau des précipitations n'atteint pas le sol : une partie de l'eau est évaporée pendant et après la pluie, les gouttes d'eau peuvent être interceptées en partie par le feuillage. L'eau qui atteint le sol ruisselle, s'infiltre et l'humidifie. S'il y a présence de végétation, les racines absorberont l'eau que la tige et les feuilles évaporent par transpiration. Un sol saturé en eau présentera un excès d'humidité sous forme de mares d'eau ou inondation.

### **2.2 Influence du couvert végétal sur la variabilité spatio-temporelle de l'humidité des sols**

La nature du couvert végétal influence le comportement de l'eau provenant des précipitations. En effet, la végétation s'oppose au ruissellement de surface et favorise l'infiltration. Les tiges constituent des obstacles à l'écoulement superficiel puisqu'elles diminuent la vitesse des filets d'eau. Quant aux racines, elles augmentent la perméabilité du sol. La présence et le type de culture influencent grandement les effets d'une précipitation sur un sol. En effet, selon Beauchamp (2006), les conséquences des précipitations seront plus importantes pour une parcelle sous culture de maïs, que pour une prairie. Il établit d'ailleurs qu'une prairie protégera le sol de sorte que seulement 5 % de celui-ci sera affecté par l'eau de pluie comparativement à 50 % pour la culture de maïs. Le choix d'une culture a aussi un effet sur la gestion du sol en modifiant certaines propriétés du sol, telles que sa structure. Une culture sur billons peut entraîner le compactage de la zone non cultivée, qui aura pour effet de créer des zones d'accumulation de l'eau ainsi que des surfaces de sol nues non protégées.

Une prairie permettra à un sol, lors de périodes de sécheresse, de conserver à plus long terme un plus haut taux d'humidité qu'une culture de maïs.

### **2.3 Influence de la topographie sur la variabilité spatiale l'humidité des sols.**

La topographie influence la variabilité spatiale de l'humidité de surface des sols. En effet, on peut observer qu'en haut de pente, l'humidité de surface est normalement plus faible et que plus on se dirige vers le bas, généralement plus l'humidité est élevée (Pater & McReynolds, 2005). Ce phénomène est dû au ruissellement ainsi qu'à l'écoulement hypodermique et souterrain le long du gradient de pente. De plus, on peut associer à ce processus un déplacement de particules, plus particulièrement celles de petite taille comme l'argile et le limon fin, qui s'accumulent au bas de la pente. Ces particules sont facilement compactables, ce qui entraîne une diminution de la porosité, une augmentation de la densité du sol et affecte la teneur en humidité du sol (NRCS, 1996).

Ce gradient de pente entraîne également une différence dans l'évolution des sols (Lafond, 1992). Ainsi, on retrouve souvent des podzols sur les crêtes et en haut de pente, des brunisols en milieu de pente et des gleysols ou sols organiques dans les dépressions, en bas ou dans le pied de pente. Le modèle peut être légèrement différent si le socle rocheux présente des ondulations, comme c'est fréquemment le cas dans les Appalaches (plissement appalachien). En bref, la topographie joue un rôle important dans la variabilité spatiale de l'humidité des sols (Lafond, 1992).

### **2.4 Influence des propriétés pédologiques sur la variabilité spatiale de l'humidité du sol**

Bien qu'à la surface du sol, la présence d'eau soit facilement percevable par la présence ou non de végétation ou encore par le type de végétation présent *i.e.* espèces hydrophiles (milieu humide) ou xérophiiles (milieu sec) (Day & McMenamin, 1982), il en est tout autrement sous la surface, dans la section de contrôle (généralement 1 m) que l'on appelle « le profil de sol ». Celui-ci présente une succession de couches ou d'horizons plus ou moins parallèles affichant des propriétés morphologiques particulières et diagnostiques de l'évolution génétique du sol (lessivage, podzolisation, gleyification, etc.). Toutefois, la présence de certains signes morphologiques peut fournir de l'information sur la présence d'eau dans le sol durant une période plus ou moins prolongée. C'est, par exemple, le cas de la couleur de la matrice et la présence de taches ou de marbrures aux

couleurs contrastantes par rapport au fond matriciel du sol. Certaines propriétés physiques ont un impact direct sur la variabilité spatiale de l'humidité de surface. C'est le cas de la texture, du contenu en fragments grossiers, de la teneur en matière organique, de la structure, de la densité apparente, de la porosité, etc. D'autres éléments pédologiques ont un impact indirect, tel que la capacité de rétention en eau, la perméabilité, etc.

### **2.4.1 Texture**

La texture (sable, loam, argile et toutes les autres classes texturales intergrades) du sol influence sa teneur en humidité (Fausey, 2002; Pater & McReynolds, 2005). Celle-ci joue à deux niveaux. Plus la texture est grossière, comme un sable ou un sable loameux, plus l'évacuation de l'eau sera facilitée, selon la position topographique du sol en question. De plus, contrairement aux sables, les argiles ont une bonne capacité d'échange cationique ce qui leur procure une meilleure capacité de rétention en eau (Fausey, 2002; Pater & McReynolds, 2005). Comme les fragments grossiers (> 2 mm) ne peuvent généralement pas retenir l'eau (cet énoncé peut parfois s'avérer faux pour certaines formations rocheuses), plus leur nombre est grand (exprimé en volume), moins grande sera la capacité de rétention en eau des sols.

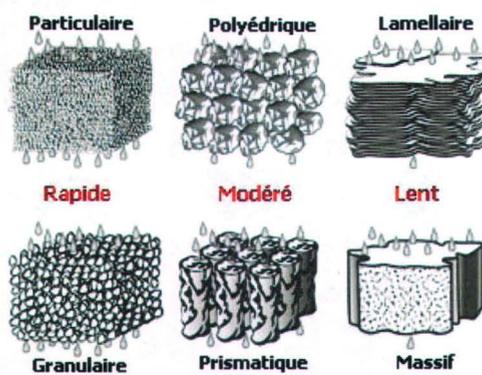
### **2.4.2 Contenu en matière organique**

La teneur en matière organique influe la teneur en humidité d'un sol, maintenant l'eau dans le sol par sa bonne capacité de rétention (NRCS, 1998). Certains sols ayant des teneurs en matière organique très élevées seront saturés en eau. C'est particulièrement le cas en milieu humide (v.g. tourbière, marécage, marais, etc.) caractérisé par l'accumulation de matières organiques qui se décomposent très lentement (> 17 % de C organique). Cependant, la matière organique peut, dans certain cas, améliorer les teneurs en humidité des sol, en liant d'autres particules de sols (limons, argiles) pour former des agrégats favorisant ainsi une meilleure structure et porosité du sol (Fausey, 2002).

### **2.4.3 Structure du sol**

La structure d'un sol a un impact direct sur la variabilité de la teneur en eau d'un sol puisqu'elle contrôle l'infiltration et la percolation de l'eau dans le sol ainsi que les réserves d'eau et de gaz (Shukla & Lal, 2002; Slater & Mancl, 2005). Une bonne structure est le fruit d'une activité biologique

(microfaune et mésofaune) intense tant sur le plan du nombre que de la variété et de la complémentarité des espèces présentes (Savoie, 2009). De plus, elle est aussi le résultat d'un assemblage des particules élémentaires sous forme d'agrégats (Ball, 2001; Slater & Mancl, 2005). Encore une fois, la teneur en argile et la teneur en matière organique du sol jouent un rôle essentiel dans le degré de structure du sol et sa stabilité temporelle. Un bon assemblage assure au sol une certaine stabilité, une bonne aération et un bon drainage. La Figure 1 illustre quelques exemples de structures de sol formées à partir de différents types de particules et met en comparaison l'écoulement associé à celles-ci.



**Figure 1 : Effet de la structure du sol sur la rapidité d'écoulement de l'eau dans le sol.**

Source : <http://ohioline.osu.edu/b905/0006.html>  
(page consultée le 19 juillet 2007)

#### **2.4.4 Densité ou masse volumique apparente**

La densité d'un sol a également une incidence sur la variabilité de la teneur en humidité d'un sol. Plus un sol est dense moins grands sont les espaces d'air disponibles pour le passage de l'eau. La cause la plus répandue du tassement est la force exercée par la machinerie agricole sur le sol. Ce tassement limite non seulement la croissance des racines de la culture en place mais aussi le mouvement vertical de l'eau et de l'air dans le sol. Les zones de pâturages peuvent aussi présenter des sols d'une densité élevée due à la circulation des animaux.

## 2.5 Mesure de l'humidité du sol

La section suivante présente des méthodes et des instruments utilisés pour mesurer la variabilité spatiale et temporelle de la teneur en humidité du sol.

### 2.5.1 Méthode gravimétrique

Cette méthode permet de mesurer la teneur en eau pondérale d'un sol en soustrayant tout simplement le poids sec du sol du poids humide, connaissant le poids du contenant utilisé pour le prélèvement du sol. Les échantillons sont récoltés au champ à des intervalles et des horizons spécifiques, puis placés dans des boîtes métalliques étanches, dont le poids est connu. Par la suite, les échantillons sont placés à l'étuve à 105°C pendant 24 à 48 heures pour éliminer l'eau contenue. Les résultats obtenus sont ensuite soumis à l'équation suivante (Topp, 1993; Jackson, 2002):

$$100 \left[ \frac{(sol\ humide + contenant) - (sol\ sec + contenant)}{poids\ sol\ sec} \right] \quad (1)$$

Cette méthode, quoique plutôt simple, demeure fastidieuse, particulièrement pour le suivi temporel de l'humidité du sol. De plus, elle laisse des marques importantes aux endroits où l'on fait des prélèvements (Jackson, 2002). Sur une longue période, cela peut occasionner un biais dans le suivi à long terme des propriétés des sols et des cultures. Pour comparer les échantillons entre eux sur le plan volumétrique, il faut connaître la masse volumique apparente du sol, laquelle varie selon la période de mesure et le sol. Il en est de même du contenu en fragments grossiers, dont on doit tenir compte dans le calcul. Ces mesures ont pour effet d'allonger sensiblement la procédure. Enfin, cette méthode n'est pas idéale pour les sols organiques étant donné que ces types de sols perdent, en plus de l'humidité, une partie de leur masse, résultat de l'oxydation et de la volatilisation qu'entraîne la procédure. La méthode gravimétrique reste malgré tout une méthode rapide d'estimation du contenu en eau du sol, particulièrement pour caractériser la variabilité spatiale du contenu en humidité des couches de sol situées en profondeur et plus difficilement accessibles lors des suivis.

## 2.5.2 L'appareil TDR (Time Domain Reflectometry) Tektronix 1502

L'appareil TDR Tektronix 1502 est pourvu d'une sonde composée de trois tiges que l'on implante dans le sol à la profondeur désirée (Figure 2) permettant ainsi de mesurer la conductivité électrique du sol et indirectement, la teneur en eau volumétrique du sol. Pour obtenir une mesure, l'appareil envoie un signal électrique dans les tiges parallèles de la sonde et calcule le temps que l'onde prend à revenir (Jackson, 2002). Cette donnée permet ensuite d'obtenir la constante diélectrique apparente ( $K_a$ ) selon l'équation suivante (Topp, 1993) :

$$K_a = \left( \frac{ct}{2L} \right)^2 \quad (2)$$

où  $K_a$  est la constante diélectrique apparente,  $c$  est la vitesse de propagation de l'onde radio,  $t$  est le temps et  $L$  représente la longueur des tiges.

On obtient ensuite la teneur en eau volumétrique ( $\theta$ ) en remplaçant  $K_a$  dans l'équation suivante (Topp, 1993):

$$\theta = -5,3 \times 10^{-2} + 2,92 \times 10^{-2} K_a - 5,5 \times 10^{-4} K_a^2 + 4,3 \times 10^{-6} K_a^3 \quad (3)$$

La précision sur la mesure est de  $\pm 0,01 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ . Le résultat obtenu est en relation directe avec la constante diélectrique du sol. Plus celle-ci est élevée, plus le retour du signal sera lent. La constante diélectrique de l'air est de 1, celle de l'eau est de 80 et celle de la matrice d'un sol se situe entre 2 et 5 (Topp, 1993; Gupta & Wang, 2002). Toutefois, pour obtenir les meilleurs résultats possibles, il faut s'assurer que la résine qui entoure les tiges ne soit pas endommagée et qu'il n'y ait pas d'infiltration d'eau. De plus, une fois insérées dans le sol, les tiges doivent rester parallèles pour ne pas fausser les données.

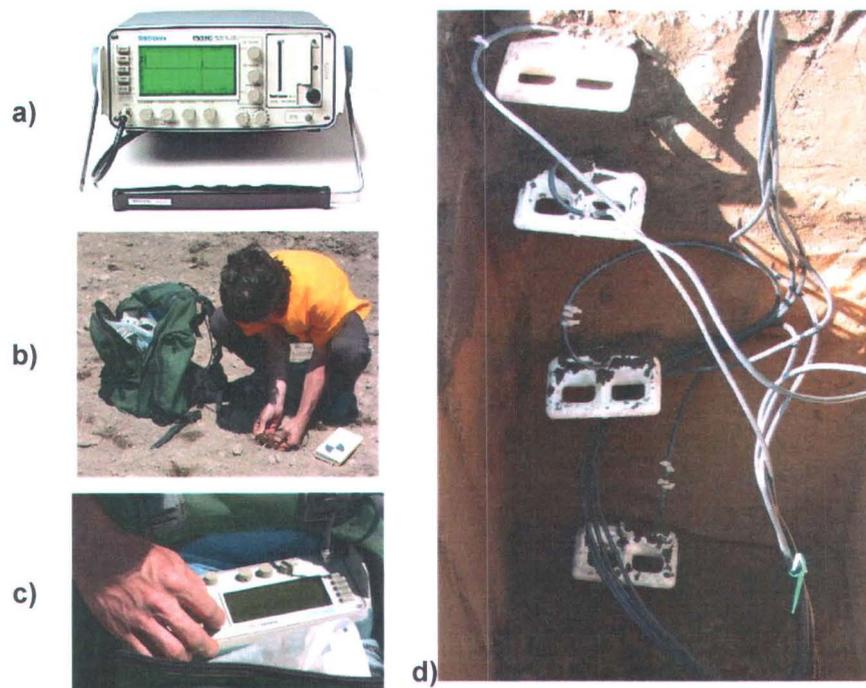


Figure 2 : Mesure de l'humidité du sol avec le TDR : a) appareil, b) mesure en surface, c) calibration de l'appareil et d) mesure de l'humidité à différentes profondeurs du profil de sol.

### 2.5.3 L'HydroSense CS620

L'HydroSense CS620 est un autre instrument qui mesure l'humidité de surface du sol et fonctionne sur le même principe que le TDR Tektronix 1502. Il est pourvu d'une sonde munie de deux tiges métalliques (acier inoxydable) de 12 ou 20 cm de long (Figure 3) et d'un diamètre de 5 mm. Contrairement au TDR, l'HydroSense est petit, léger, facile d'utilisation et à lecture rapide, ce qui en fait l'instrument idéal pour le suivi spatial et temporel d'une grande superficie. Les valeurs obtenues sont en pourcentage et la précision moyenne de cet appareil est de  $\pm 3\%$  sans calibration spécifique. Le volume de sol mesuré avec les tiges de 12 cm est d'environ  $650 \text{ cm}^3$  alors qu'avec les tiges de 20 cm, il est de  $1100 \text{ cm}^3$  (Campbell Scientific, 2001).



Figure 3 : Appareil HydroSense CS620 de Campbell Scientific.

Source : <http://www.campbellsci.co.uk/images/cs620.jpg>

## 2.6 Cartographie de la variation spatio-temporelle de l'humidité du sol

Être en mesure de localiser les différentes variations d'humidité du sol revêt une grande importance afin de mieux comprendre et prédire les processus hydrologiques, dont les impacts sont majeurs en agriculture et en environnement (Bardossy & Lehmann, 1998; Romshoo, 2004). Pour ce faire, il faut planifier la meilleure stratégie de prospection et d'échantillonnage des sols pour optimiser les coûts, le temps de travail et la qualité des données acquises, afin d'obtenir une bonne représentation de la variabilité spatiale et temporelle de l'humidité du sol sur l'ensemble du territoire étudié. Afin d'y arriver, l'utilisation de cartes pédologiques est incontournable puisqu'elles sont réalisées à partir des caractéristiques morphologiques et physico-chimiques du sol, deux aspects influençant sans contredit l'humidité du sol. Les développements technologiques ont mené au développement de systèmes d'information géographique (SIG) permettant de réaliser à partir de base de données pédologiques ou autres des cartes de haute précision. Jumelés à des logiciels de statistique et de géostatistique, ces SIG permettent à l'utilisateur de prédire par interpolation spatiale la distribution des propriétés pédologiques ou autres et ainsi de rehausser l'exactitude des cartes.

### 2.6.1 Approche discrète et approche continue

La cartographie de la variabilité spatiale de l'humidité du sol peut être effectuée selon deux approches (Heuvelink & Webster, 2001) L'approche discrète par classe consiste à découper le territoire étudié en polygones de sols présentant le même pourcentage d'humidité (unité simple) ou une gamme de pourcentage (unité complexe) (McBratney *et al.*, 2003). L'approche continue, par contre, cherche à illustrer la variation de la teneur en humidité selon un continuum en utilisant une ou des variables quantitatives indicatrices des conditions d'humidité (McBratney *et al.*, 2003) comme la teneur en humidité de la couche de surface ou toutes autres variables auxiliaires présentant une relation directe ou indirecte avec la teneur en humidité des sols (v.g. conductivité électrique apparente du sol,

téledétection, etc.) (Heuvelink & Webster, 2001). Dans cette approche, les techniques géostatistiques comme l'analyse variographique, utilisée pour modéliser les structures d'organisation spatiale de ces descripteurs, ainsi que le krigeage et cokrigeage, méthodes d'interpolations spatiales se basant sur le calcul, l'interprétation et la modélisation du variogramme, semblent très prometteurs.

## 2.6.2 Interpolation par krigeage isotrope ou anisotrope

L'interpolation par krigeage est une technique géostatistique basée sur des méthodes d'estimation stochastiques, permettant de prédire la valeur d'une propriété à un point géographique donné avec la meilleure précision possible, en tenant compte des valeurs avoisinantes ainsi que leur contexte environnemental (Arnaud & Emery, 2000). En d'autres mots, on utilise les mesures ponctuelles récoltées pour prédire la valeur d'un endroit non-échantillonné.

Pour obtenir la valeur la plus précise possible, il faut d'abord faire une étude variographique. L'étude variographique est le cœur du krigeage; elle est non seulement primordiale pour prédire une valeur inconnue, mais aussi pour estimer son erreur de précision (Gratton, 2002; Arnaud & Emery, 2000). Le variogramme (Figure 4) est l'outil qui permet de faire un constat sur la dissemblance entre les paires d'échantillons (Arnaud & Emery, 2000). Il se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$\gamma(h) = \frac{\sum_{(i,j)|h_{ij}=h} (v_i - v_j)^2}{2N_h} \quad (4)$$

où (i, j) correspond aux échantillons séparés par une distance représentée par le vecteur  $h$ . Le  $v$  représente les valeurs des paires d'échantillons séparées par le vecteur  $h$ .  $N_h$  est le nombre de paires d'échantillons compris dans le vecteur  $h$ .

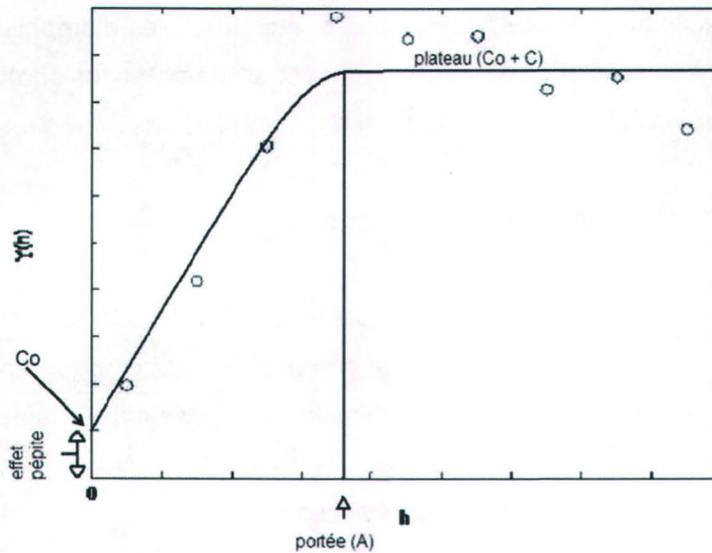


Figure 4 : Modèle expérimental et théorique d'un variogramme et de ses paramètres.

Une fois le variogramme bien établi, trois éléments importants s'y dessinent soit le plateau, la portée et l'effet pépité. Le plateau ou palier ( $C_0 + C$ ) est l'endroit de la courbe où la semi-variance ( $\gamma(h)$ ) plafonne. La portée ( $A_0$ ) est la distance  $h$  à partir de laquelle débute le palier. Cette distance permet de déterminer l'espacement au-delà duquel les échantillons n'exercent plus d'influence sur les autres. L'effet pépité ( $C_0$ ) est l'intervalle entre l'ordonnée à l'origine et correspond à la partie de la variation spatiale due à l'erreur d'échantillonnage ou de la variation dont la structure est plus fine que le pas d'échantillonnage.

La semi-variance ( $\gamma(h)$ ) dépend de  $h$  qui est un vecteur tenant compte de la distance et de la direction. Lorsque le phénomène étudié, par exemple l'humidité du sol, a la même variabilité peu importe la direction choisie, on parle d'isotropie (Gratton, 2002). La nature étant très irrégulière d'une position à l'autre, les variations étant souvent différentes d'une direction à l'autre, on assiste alors au phénomène d'anisotropie (Arnaud & Emery, 2000) certains facteurs ayant une orientation privilégiée.

### 2.6.3 Interpolation par cokrigage à l'aide de variables auxiliaires

Cette méthode utilise une covariable (ou plusieurs covariables) présentant une relation linéaire avec la variable d'intérêt comme c'est souvent le cas pour l'humidité et la conductivité électrique du sol (Tarr *et al.*, 2005). L'avantage de la variable auxiliaire est que l'on peut sous-échantillonner la variable d'intérêt en l'occurrence l'humidité du sol dont la mesure est plus longue et coûteuse. L'utilisation du cokrigage permet souvent d'obtenir de meilleurs résultats que le krigeage (Tarr *et al.*, 2005; Sullivan, Shaw & Rickman, 2005). De plus, les cartes générées à partir de cette méthode sont plus définies qu'avec la méthode du krigeage, éliminant ainsi le phénomène d'effet circulaire, c'est-à-dire l'aspect d'auréole créé autour de chacun des points échantillonnés lors du krigeage (Tarr *et al.*, 2005).

## 2.7 Cartographie de l'humidité du sol à partir de la CEA

La CEA est depuis un bon moment utilisée en agriculture de précision non seulement pour sa facilité à manipuler et son coût d'utilisation très bas, mais aussi parce qu'il est possible d'établir des liens directs avec certaines propriétés du sol influençant la croissance des plantes comme la matière organique, la texture du sol, la profondeur du gley, la CEC (capacité d'échange cationique), ainsi que l'humidité du sol. (Doerge, Kitchen & Lund, 2004). En effet, en plus d'être composée de molécules polaires, l'eau une fois dans le sol se mélange à différents sels et minéraux qui en font une solution capable de bien conduire le courant électrique. Voilà donc pourquoi, l'humidité du sol est étroitement liée à la CEA des sols (Nugteren *et al.*, 2000; Friedman, 2005; Tarr *et al.*, 2005). En règle générale, l'habileté qu'a l'eau (ainsi que d'autres matériaux) à conduire l'électricité se mesure en millisiemens par mètre ( $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$ ) (Doerge, Kitchen & Lund, 2004).

La cartographie basée sur les mesures de CEA dévoile bien les différentes zones (exprimées par différentes caractéristiques morphologiques) d'une parcelle de champ (pour certain terrain) comparativement à la cartographie traditionnellement faite par les pédologues (Doerge, Kitchen & Lund, 2004). Cela s'explique en outre par le fait que le véhicule, qui arpente le terrain, est équipé d'un DGPS (*Differential Global Positioning System*), qui permet de localiser de façon précise (coordonnées x, y et z) les données récoltées par l'instrument de mesure.

### 2.7.1 Instruments de mesure de la CEA des sols

Il existe deux méthodes pour mesurer la CEA au champ soit par induction électromagnétique (« *electromagnetic induction* ») tel qu'utilisé par le EM-38 ou soit par contact d'électrodes tel qu'utilisé par le VERIS 3100. Les deux types de senseur utilisent le sol comme une partie intégrante de leur circuit électrique (Adamchuk *et al.*, 2007). Les deux méthodes donnent, selon Doerge, Kitchen & Lund (2004) et Farahani & Buchleiter (2004), des résultats équivalents.

### 2.7.2 VERIS 3100

Le VERIS 3100 est un appareil qui permet de mesurer à une profondeur de 0-30 et 0-100 cm la CEA du sol grâce aux coutres circulaires galvanisés (43 cm de diamètre environ) qui pénètrent la surface du sol (2 à 5 cm de profondeur). Cet instrument, qui a l'apparence d'une petite herse à disques (Figure 5), possède six électrodes dont deux qui envoient le courant électrique à travers le sol et deux autres qui le reçoivent. Le VERIS doit être tiré par un véhicule tout-terrain et peut circuler au champ à une vitesse maximale de 10-15 km·h<sup>-1</sup>. Le contact des électrodes avec le sol permet de faire circuler le courant électrique à travers ce dernier et la profondeur atteinte dépendra de la distance entre les coutres et leur orientation (horizontale vs verticale) (Adamchuk *et al.*, 2007).

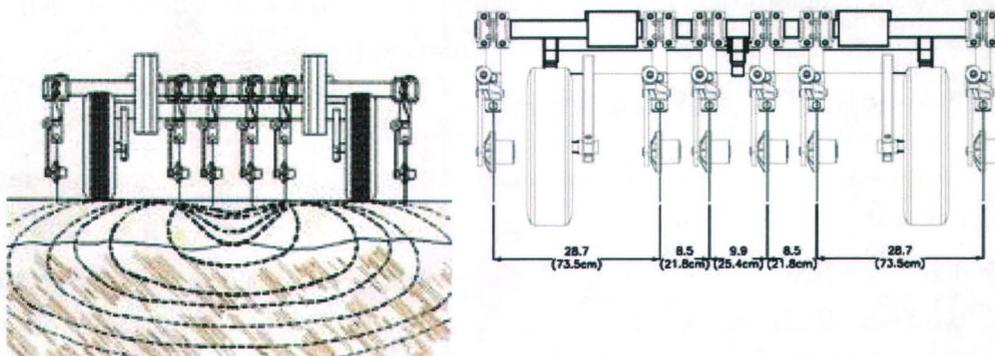


Figure 5 : Instrument de mesure de la conductivité électrique apparente (CEA) VERIS 3100.

Source : <http://www.veristech.com/products/soilec.aspx>

### 2.7.3 Geonics EM-38

Le Geonics EM-38 (Figure 6a) est aussi un appareil qui permet de cartographier la CEA des sols à l'échelle de la parcelle. Cet appareil, parfois monté sur un petit chariot remorqué par un véhicule tout-terrain (Figure 6b), est muni de deux solénoïdes. Le solénoïde émetteur envoie un flux magnétique, qui varie avec la profondeur du sol vers un solénoïde récepteur, généralement situé à une distance d'un mètre. Ce processus se déroule sans qu'il n'y ait contact physique avec le sol (Adamchuk *et al.*, 2007). Le EM-38 mesure l'effet de la concentration des ions par rapport à un volume de sol rencontré. La profondeur du signal dans le sol dépend de la hauteur de l'instrument au-dessus du sol et de l'espacement entre les solénoïdes. Chaque donnée récoltée est directement associée à une adresse de positionnement (coordonnées en x, y et z) grâce à un système DGPS. Les valeurs de CEA ainsi acquises sont principalement influencées par la structure, la texture, la température ainsi que la teneur en eau du sol.

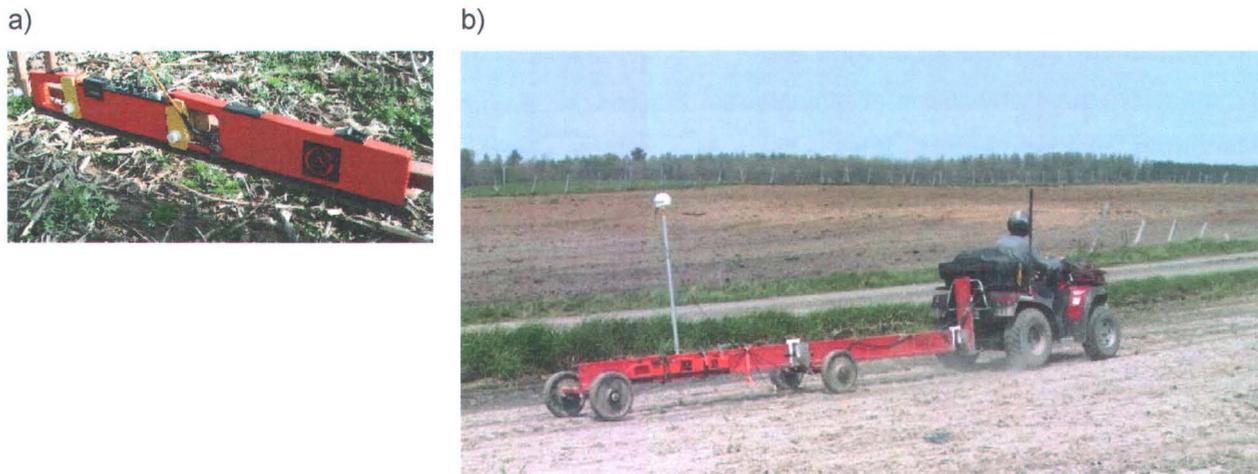


Figure 6 : a) Instrument de mesure de la CEA : le Geonics EM-38. b) Système de mesure en continu de la CEA des sols avec le Geonics EM-38 conçu et utilisé par les chercheurs des Laboratoires de pédologie et d'agriculture de précision d'Agriculture et Agroalimentaire Canada à Québec.

## **2.8 Cartographie de l'humidité de surface des sols à l'aide d'un modèle numérique d'altitude**

Comme il est décrit précédemment les déplacements de l'eau et la variabilité de l'humidité du sol sont en relation directe avec la topographie. Le modèle numérique d'altitude (MNA), qui fournit une représentation graphique 3D du relief, constitue donc un élément clé pour prédire et cartographier des processus hydrologiques comme, entre autres, le drainage, les zones de surplus ou de déficits hydriques (Kravchenko *et al.*, 2002; Thompson, Bell & Butler, 2001). La précision du MNA dépend de plusieurs facteurs comme : l'appareil de mesure, l'échantillonnage, la résolution horizontale et verticale, les algorithmes de calcul, etc. (Thompson, Bell & Butler, 2001). Il existe plusieurs qualificatifs pour décrire le type d'échelle utilisé pour la couverture d'une superficie : la macrotopographie (échelle du km) la mésotopographie (échelle de 10 à 100 m) et la microtopographie (échelle inférieure à 10 m) (Perron, 2002).

## **2.9 Cartographie de l'humidité de surface des sols par télédétection**

La télédétection regroupe « l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci. Ainsi, à l'aide de différents capteurs optiques ou radar, on acquiert de l'information sur une cible située à une distance variant selon la plateforme utilisée. La télédétection ressemble à une photographie prise à très petite échelle. Comme dans le cas de la photographie, on compte sur les différents contrastes entre le sol humide et le sol sec ainsi que les différentes longueurs d'ondes du rayonnement pour établir la cartographie d'un territoire donné. Une description des différentes plateformes couramment utilisées pour l'acquisition de données numériques ainsi que les différents capteurs utilisés (radar ou optiques) sera élaborée à la section suivante.

### **2.9.1 Imagerie satellitaire et aéroportée**

Les plateformes aéroportées ainsi que satellitaires permettent d'acquérir de l'information selon différentes échelles, ce qui permet de couvrir de plus petites ou grandes superficies, en fonction de l'éloignement des capteurs par rapport à la terre (Bonn & Rochon, 1992). Logiquement les capteurs aéroportés couvrent un territoire plus petit que les capteurs satellitaires mais offrent par contre des informations plus détaillées. Aujourd'hui, avec le développement des technologies, ce raisonnement

est plus ou moins vrai, c'est-à-dire que certains capteurs satellitaires atteignent des précisions équivalentes voir meilleures que l'aéroporté (Bonn & Escadafal, 1996). En règle générale, avant qu'un capteur se retrouve au niveau satellitaire, il passe par les plateformes au sol et aéroportées. L'avantage du satellite est qu'il n'est pas contraint au relief terrestre, c'est-à-dire qu'il peut acquérir de l'information partout sur la terre, même là où l'homme n'a pu accéder et travaille peu importe les conditions climatiques (Cashion *et al.*, 2005) bien que les résultats (surtout pour l'optique) pourrait laisser à désirer. L'information perçue par capteur qu'il soit aéroporté ou satellitaire est transmise en général sous forme d'image en format numérique dont l'unité de base est le pixel (CCT, 2007). Un pixel montre sous forme de valeur numérique l'énergie électromagnétique perçue. Une image est la représentation graphique d'un ensemble de plusieurs pixels.

### 2.9.2 Imagerie optique

Lorsqu'on parle d'imagerie optique on fait référence à des capteurs capables d'enregistrer le rayonnement réfléchi dans la partie du spectre électromagnétique allant du bleu au proche infrarouge ce qui correspond respectivement à des longueurs d'onde de 0,4 à 0,7  $\mu\text{m}$  pour le visible et de 0,7 à 0,9  $\mu\text{m}$  pour l'infrarouge (Figure 7). Lorsqu'on travaille avec des capteurs optiques, on est dépendant des conditions météorologiques. En effet, ce type de capteur a besoin de la lumière du soleil puisque c'est la réflexion du rayonnement solaire dans le visible ainsi que de l'infrarouge sur les cibles qui sera perçue par ce dernier. De plus, cette région du spectre lumineux ne peut passer au travers d'un couvert nuageux ou d'une brume trop importante, car les longueurs d'onde sont inférieures à la grosseur des particules atmosphériques (solide ou humide).

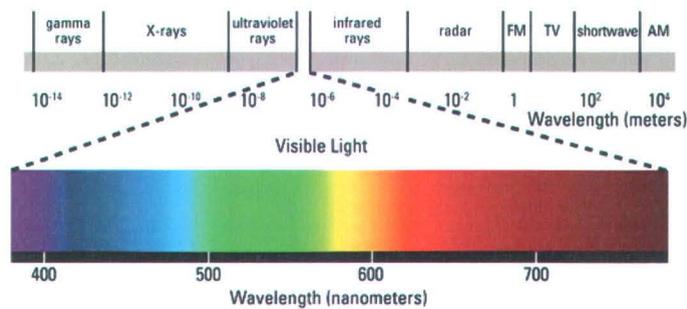


Figure 7 : Diagramme du spectre lumineux et des longueurs d'onde.

Source : <http://www.theledlight.com.cn/led-light-img/304-wavelength.jpg>

En général, lorsque les conditions climatiques sont idéales, il est possible de distinguer un sol nu humide d'un sol sec avec un capteur optique, le sol humide ayant un albédo<sup>1</sup> plus bas que le sol sec (Egman, 1991). Toutefois les mesures d'humidité obtenues seront fortement influencées par le contenu en matière organique, la rugosité, la texture, l'angle d'incidence ainsi que la couleur du sol (Egman, 1991). Le capteur optique n'est donc pas l'instrument idéal pour évaluer l'humidité du sol, bien que les longueurs d'ondes du bleu, du rouge et du proche-infrarouge (PIR) présentent une bonne corrélation avec l'humidité et peuvent constituer des variables auxiliaires à la cartographie. Ils existent plusieurs capteurs optiques ayant des caractéristiques qui leur sont propres (ex : Landsat, Spot, Quikbird, IKONOS, etc.). Toutefois, dans le cadre de ce mémoire, seulement IKONOS a été utilisé car la résolution spatiale et spectrale des images étaient bien adaptées à l'échelle de l'étude.

### 2.9.3 IKONOS

IKONOS est un satellite optique qui permet d'obtenir des images numériques dans le panchromatique (PAN) et le multispectral (Tableau 1). Situé à 680 km de la surface de la terre, ce satellite peut capter simultanément dans les deux spectres (PAN et le visible (VIS)). Le PAN se situe dans les longueurs d'onde de 0,45 à 0,90  $\mu\text{m}$  et s'exprime que dans les teintes de noir et blanc. Le multispectral comprend quatre bandes (bleu, vert, rouge et PIR). La précision du PAN est meilleure puisqu'on peut obtenir une résolution spatiale d'un mètre comparativement à quatre mètres pour le multispectral. Le satellite est en orbite héliosynchrone ce qui signifie que sa rotation autour de la terre coïncide avec la rotation du soleil (Bonn & Escadafal, 1996) de sorte qu'il repasse toujours au-dessus d'un point donné de la surface terrestre à la même heure solaire locale. IKONOS fait partie des capteurs satellitaires à haute résolution spatiale comme Orbview, Quickbird, IRS et HRG de SPOT-5.

**Tableau 1: Longueur d'onde et résolution spatiale du satellite IKONOS.**

Longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ )	Spectre	Résolution spatiale (m)
0,45-0,52	Bleu	4
0,52-0,60	Vert	4
0,63-0,69	Rouge	4
0,76-0,90	Proche-infrarouge (PIR)	4
0,45-0,90	Panchromatique (PAN)	1

Source : Sullivan *et al.*, 2005.

<sup>1</sup> L'albédo est le rapport entre l'énergie solaire réfléchiée par une surface et l'énergie incidente. Les valeurs de ce rapport sont comprises entre 0 et 1, la valeur de 0 représenterait un corps noir parfait et une valeur de 1 serait obtenue avec un miroir parfait.

## 2.9.4 Imagerie radar

Le mot RADAR signifie "Radio Detection and Ranging" (CCT, 2007). Le satellite radar émet sa propre énergie électromagnétique sous forme de micro-ondes (hyperfréquences) à l'aide d'une antenne qui émet et reçoit la série d'impulsions. Étant donné que les longueurs d'onde du radar sont grandes, les ondes émises sont très peu influencées par les différentes particules (eau, gaz et poussières) qui composent l'atmosphère (Cashion *et al.*, 2005). De plus, comme il émet sa propre énergie, le radar a l'avantage de pouvoir travailler en tout temps, peu importe les conditions climatiques au moment de l'acquisition et ce, à toute heure du jour où de la nuit, contrairement à un capteur optique (Egman, 1991). Chaque pixel d'une image radar représente un coefficient de rétrodiffusion ( $\sigma^0$ ) représenté sous forme de ton de gris, les faibles valeurs du coefficient de rétrodiffusion correspondant à des tons foncés. Les mesures d'humidité du sol à partir du radar reposent sur les propriétés diélectriques de l'eau. En effet, la constante diélectrique de l'eau est de 80 alors que celle d'un sol sec est d'environ 3 à 5 (Egman, 1991). Il faut toutefois prendre conscience que l'humidité du sol est en lien direct avec la texture du sol. Ainsi, un sable retient moins bien l'eau et possède une constante diélectrique moins élevée qu'un sol contenant une certaine quantité de limon (sols loameux) ou d'argile (sols argileux). Selon Dobson *et al.*, (1992), pour une condition de sol donnée (rugosité de surface et texture), on a constaté que la rétrodiffusion radar était linéairement dépendante de l'humidité volumétrique présente dans les 2 à 5 cm supérieurs du sol avec une corrélation ( $r$ ) variant de 0,8 à 0,9 (CCT, 2007). Parmi les facteurs influençant la qualité des mesures d'humidité du sol, notons l'angle d'incidence et la polarisation. Ainsi, on recommande de collecter les images à un faible angle d'incidence pour estimer l'humidité du sol afin de réduire les contributions de la rugosité du sol à la rétrodiffusion et l'atténuation du signal due à la biomasse au-dessus du sol. De même, on a constaté que la bande C en polarisation HH est la plus sensible à l'humidité du sol et la moins sensible à la rugosité de surface en présence d'une faible biomasse (CCT, 2007). La polarisation correspond à la position d'une onde électromagnétique qui est transmise et reçue selon l'axe que l'on trace entre le radar et sa cible. La propagation de l'onde électromagnétique peut-être horizontale (H) ou verticale (V) (CCT, 2007). Donc, le signal radar peut être transmis et capté dans une polarisation simple (ou parallèle) comme HH ou VV, c'est-à-dire transmis et capté horizontalement ou transmis et capté verticalement. Dans le cas de HV ou VH, on parle plutôt de polarisation croisée.

Le Tableau 2 donne quelques exemples de combinaisons de polarisation (CCT, 2007) :

**Tableau 2 : Types de polarisation disponibles dans les diverses images radars.**

Polarisation simple	HH ou VV (éventuellement HV ou VH)
Bipolarisation	HH et HV; VV et VH; HH et VV
Polarisation alternée	HH et HV alternant avec VV et VH
Polarisation multiple	HH, VV, HV et VH

### 2.9.5 Caractéristiques des images RADARSAT-1

C'est en 1995 qu'a été lancé RADARSAT-1, un satellite canadien dont la durée de vie prévue était de cinq ans. Jusqu'à maintenant, il est toujours en opération. RADARSAT-1 possède un radar à synthèse d'ouverture (RSO) fonctionnant en bande C, c'est-à-dire dans des longueurs d'onde entre 3,5 à 7,5 cm (Figure 8). Plus précisément, il émet un signal ayant une fréquence de 5,3 GHz ce qui correspond à une longueur d'onde de 5,6 cm. Ce satellite possède une polarisation simple HH, ce qui signifie que la transmission et la réception des ondes se fait à l'horizontal entre le capteur et sa cible. Il a une résolution spatiale qui joue entre 10 et 100 m ainsi qu'un angle d'incidence qui varie de 20 à 50°. Il prend 24 jours pour revisiter un point donné (Moran *et al.*, 2004). Grâce à ses sept modes de couverture (*Haute résolution, Standard, Large, ScanSAR étroit, ScanSAR large, Faisceau étendu haute résolution, Faisceau étendu faible incidence*) il est possible d'obtenir des informations sur une largeur de surface d'environ 925 km. RADARSAT-1 est en orbite héliosynchrone et se situe à environ 798 km d'altitude.

### 2.9.6 Caractéristiques des images RADARSAT-2

Le successeur de RADARSAT-1 a été lancé en décembre 2007. RADARSAT-2 a une durée de vie estimée à sept ans. Ce satellite est situé sur la même orbite héliosynchrone que son prédécesseur, soit à 798 km d'altitude et offre lui aussi un cycle de répétitivité de 24 jours. Par contre, le fait qu'il ait la capacité de pivoter de gauche à droite ainsi qu'une large fauché favorisent l'acquisition multitemporelle d'images radar. Son radar à synthèse d'ouverture (RSO) opère aussi en bande C mais dans une fréquence légèrement différente de son prédécesseur, soit 5,405 GHz.

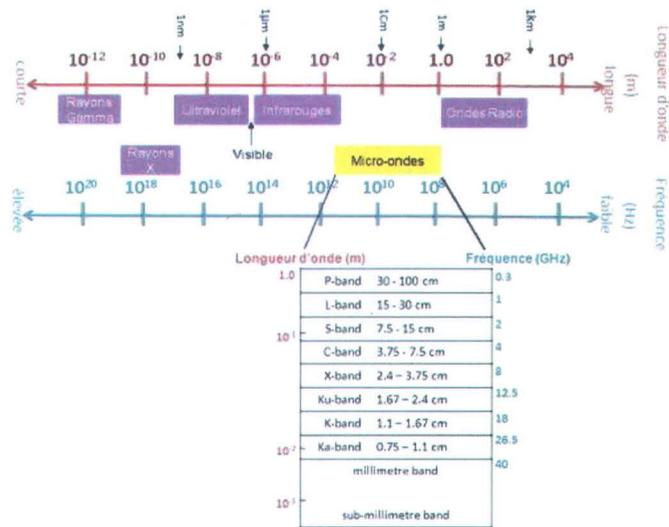


Figure 8 : Échelle des longueurs d'onde (m) et des fréquences (Hz).

Source : <http://www.aviso.oceanobs.com/typo3temp/pics/767e53759d.jpg>

L'antenne de ce RSO permet d'acquérir des données multipolarisées, c'est-à-dire que le satellite effectue la transmission de signaux en mode H et V de façon alternée et reçoit les signaux en mode H et/ou V. Tout cela permet en bout de ligne d'avoir diverses options de polarisation (simple, double, quadruple) qui permettront de mieux distinguer les différentes surfaces et d'établir une signature polarimétrique propre à chaque cible. La Figure 9 illustre les polarisations offertes pour trois capteurs RSO : RADARSAT-1, ERS et RADARSAT-2.

RADARSAT-2 offre plusieurs modes d'acquisition qui permettent d'obtenir une résolution spatiale de 3 à 100 m selon le mode choisi (Tableau 3). Toutes ces caractéristiques confèrent à RADARSAT-2 la capacité de générer des signatures polarimétriques précises et spécifiques pour diverses cibles terrestres comme les sols humides et les sols secs.

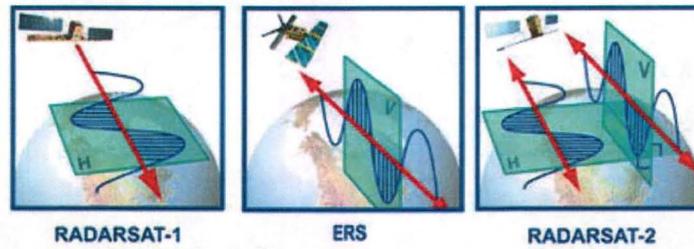


Figure 9 : Exemple de polarisations offertes par trois satellites  
 a) RADARSAT-1 polarisation simple HH; b) ERS polarisation simple VV; c) RADARSAT-2 et son capteur multi-polarisée et polarimétrique HH, VV, VH, HV.

Source : <http://www.radarsat2.info/about/polar/index.asp>

Tableau 3 : Polarisations offertes selon le mode d'acquisition du satellite RADARSAT-2.

Mode d'acquisition	Résolution spatiale	Superficie couverte	Polarisation						
			Simple				Double		Quad-Pol
	m	km x km	H	V	H	V	HH+H	VV+V	HH+VV+HV+VH
			H	V	V	H	V	H	
Ultra-fin	3	20 x 20	✓	✓	✓	✓			
Fin à multivisé	8	50 x 50	✓	✓	✓	✓			
Fin	8	50 x 50	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Standard	25	100 x 100	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Large	30	150 x 150	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
ScanSAR Étroit	50	300 x 300	✓	✓	✓	✓			
ScanSAR Large	100	500 x 500	✓	✓	✓	✓			
Haute Incidence	25	75 x 75	✓						
Quad-Pol fin	8	25 x 25							✓
Quad-Pol standard	25	25 x 25**							✓

Source : [www.radarsat2.info](http://www.radarsat2.info)

\*\*Couverture de 50 km x 50 km disponible depuis l'automne 2010.

## **Chapitre 3 : Matériel et méthodes**

### **3.1 Description du territoire à l'étude**

Le territoire étudié a été choisi dans le cadre d'un projet national, dirigé par Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) et financé en partie par Canards Illimités Canada, dont l'objectif principal était d'évaluer les pratiques de gestions bénéfiques (PGB) en agriculture à l'échelle des bassins hydrographiques. Plusieurs équipes multidisciplinaires ont mené à bien leur projet sur ces terres agricoles, afin d'évaluer les effets des PGB sur l'environnement ainsi que sur les économies à la ferme. Contrôle du ruissellement, gestion du fumier et du lisier, rotation des cultures et réduction de l'emploi de pesticides sont des exemples de PGB qui ont été mises en place afin de diminuer l'apport d'éléments polluants (sédiments, éléments nutritifs) dans les plans d'eau.

#### **3.1.1 Localisation et description du site à l'étude**

Le projet a été réalisé sur trois parcelles contiguës (15 ha) d'un micro-bassin expérimental de 3 km<sup>2</sup> du bassin versant du Bras d'Henri située sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent, près de la municipalité de Saint-Narcisse. La rivière Bras d'Henri est un tributaire de la rivière Beaurivage qui fait partie, à son tour, du réseau hydrographique de la rivière Chaudière. L'exutoire, de cette dernière, est situé sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent entre Saint-Romuald et Saint-Nicolas. Le bassin versant du Bras d'Henri couvre une superficie de drainage d'environ 167 km<sup>2</sup> dont l'amont est tout près de Saint-Elzéar et l'aval est situé à la hauteur de Saint-Gilles.

À la Figure 10, le trait en bleu délimite le bassin hydrographique de la rivière Bras d'Henri (au sud-ouest) ainsi que celui du ruisseau Fourchette (au nord-est). Dans le bassin versant du Bras d'Henri les deux polygones jaunes représentent les limites des deux micro-bassins expérimentaux; celui plus au nord étant le micro-bassin témoin et celui plus au sud étant le micro-bassin d'intervention. C'est ce dernier qui a servi à étudier l'impact des PGB sur la qualité de l'eau de surface et dans lequel se trouvent les trois parcelles à l'étude.

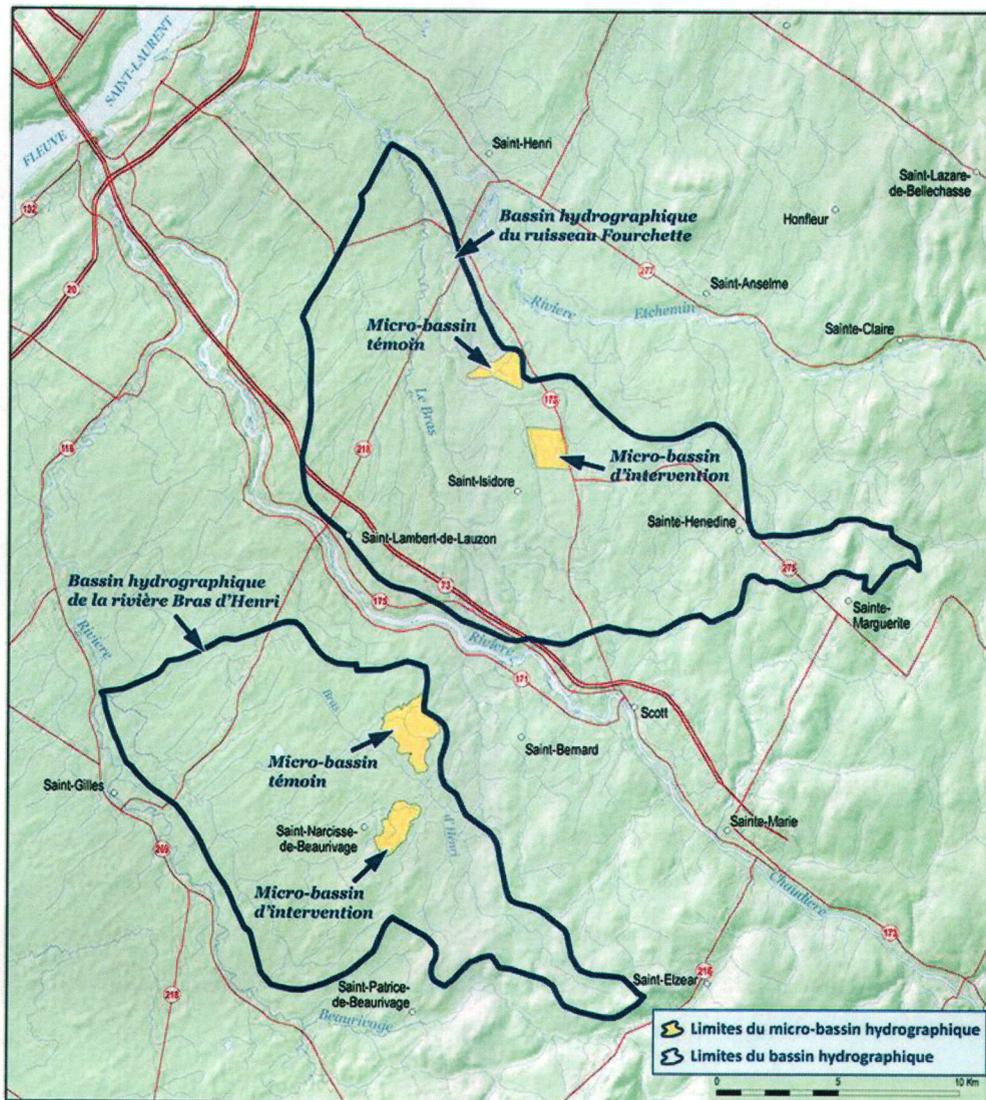


Figure 10 : Localisation du bassin versant du Bras d'Henri dans la région hydrologique de la basse Chaudière ainsi que des deux micro-bassins (en jaune) expérimentaux (micro-bassins d'intervention au sud et témoin au nord).

Source : <http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/display-afficher.do?id=1228862393658&lang=fra>

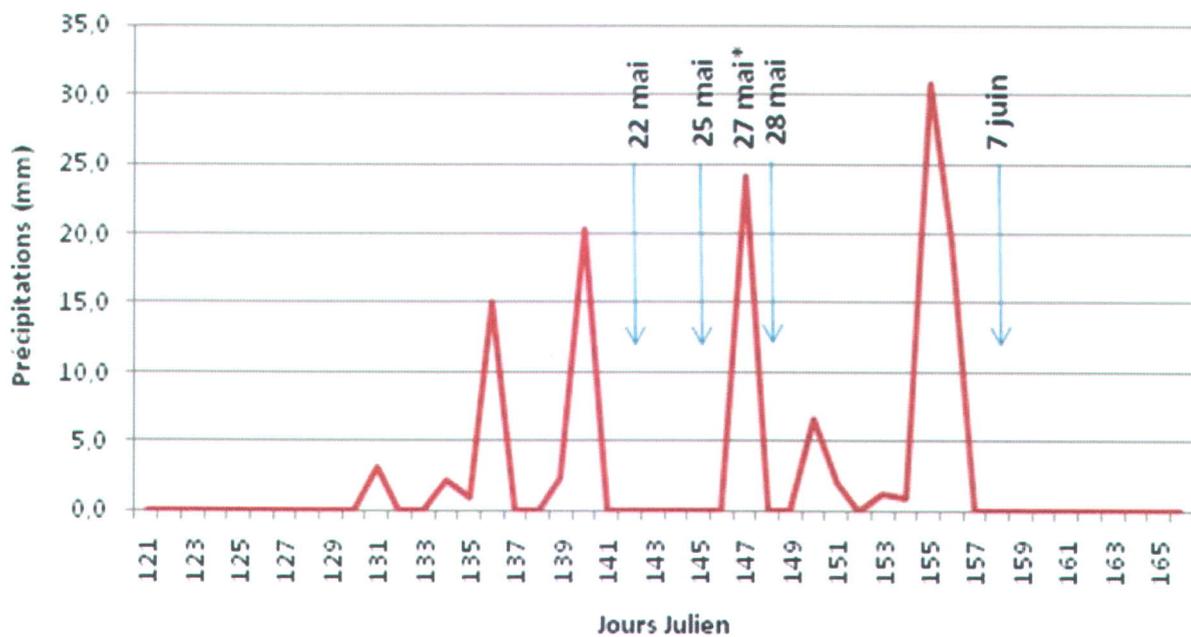
### 3.1.2 Climat

Le climat, dans le secteur de Saint-Narcisse de Beaurivage, est qualifié de modéré subhumide. Par ailleurs, la moyenne annuelle de température de ce secteur varie de 4,5 à 6,6°C (MAPAQ, [s.d.]). Plus précisément, la moyenne hivernale est de -9,4°C alors qu'en été, elle avoisine les 16,6°C. Cette région reçoit annuellement entre 800 à 1360 mm de précipitation, soit 78 % sous forme de pluie et 22

% sous forme de neige (Environnement Canada, [s.d.]). La saison de croissance végétative dure environ 180 à 209 jours et peut débuter à la fin avril ou au début mai pour se terminer au début d'octobre (MAPAQ, [s.d.]).

### *Précipitations au début de la saison de croissance 2007 et 2008*

Les données décrivant les précipitations sur le secteur de Saint-Narcisse de Beaurivage ont été estimées à partir des données de la station météorologique de Scott (située à environ 20 km à l'est du site à l'étude) disponibles sur le site Internet d'Environnement Canada. À cette station, les données météorologiques y sont compilées sur une base quotidienne. Les flèches bleues sur la Figure 11 et la Figure 12 représentent les journées où ont eu lieu les récoltes de données terrain. Les astérisques marquent les dates où il y a eu acquisition pour le secteur étudié d'images satellites.

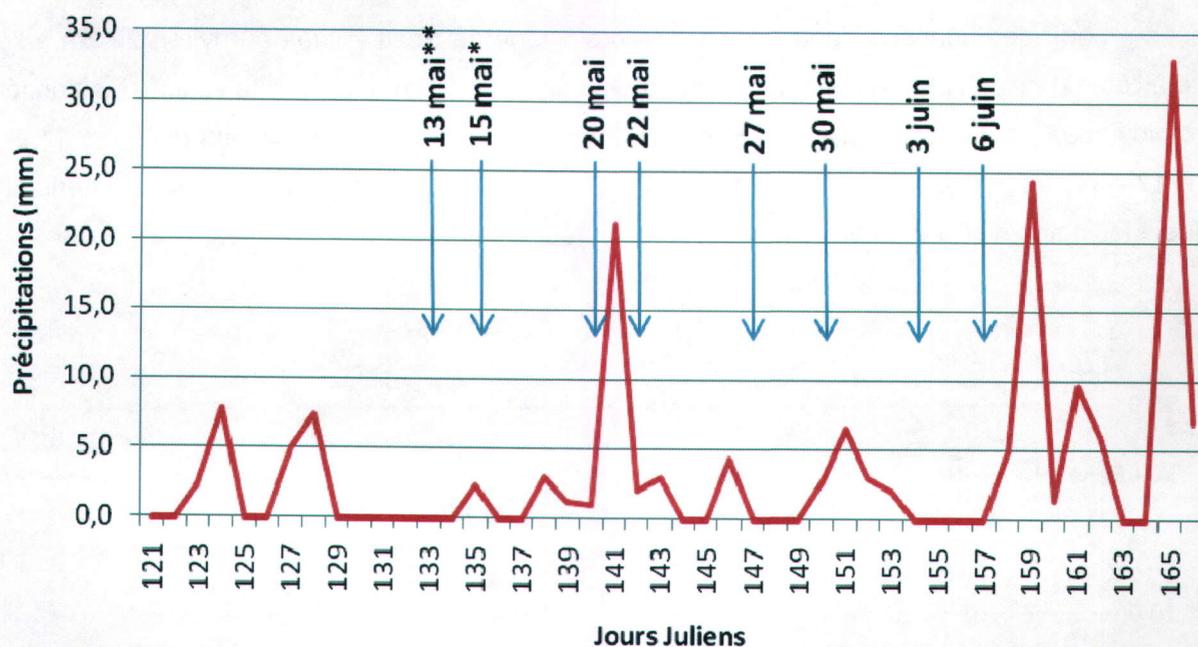


\* Jour d'acquisition de l'image RADARSAT-1

**Figure 11 : Précipitations journalières entre le 1<sup>er</sup> mai et le 15 juin 2007 pour le secteur de Saint-Narcisse de Beaurivage.**

Source : Environnement Canada, [s.d.]

Les graphiques des précipitations ont été conçus en fonction de couvrir la période d'échantillonnage soit du 1<sup>er</sup> mai jusqu'au 15 juin 2007. La même stratégie a été utilisée en 2008. Ainsi, on peut voir la quantité d'eau reçue au sol précédant la campagne d'échantillonnage. Ces données permettront de mieux interpréter les résultats statistiques et géostatistiques.



\* Jour d'acquisition de l'image RADARSAT-1

\*\* Jour d'acquisition de l'image IKONOS

Figure 12 : Précipitations journalières entre le 1<sup>er</sup> mai et le 15 juin 2008 pour le secteur de Saint-Narcisse de Beaurivage.

Source : Environnement Canada, [s.d.]

### 3.1.3 Région physiographique

Le bassin versant du Bras d'Henri est traversé perpendiculairement par deux régions physiographiques. La première est une vieille chaîne de montagne que l'on nomme Appalaches, caractérisée par des collines et des vallons dont l'altitude varie entre 180 et 1300 m (Lamontagne & Nolin, 1997). La deuxième région physiographique s'appelle les Basses-terres du Saint-Laurent dont l'altitude varie de 60 à 180 m et les pentes entre 0 et 5 %. Le piedmont est la section intermédiaire et constitue une transition entre les deux régions physiographiques précédemment écrites. La présence de ces trois régions influence grandement l'évolution génétique

(classification taxonomique) des sols ainsi que la répartition de l'eau sur le territoire. Le micro-bassin d'intervention et les trois parcelles à l'étude se situent plus particulièrement dans la région physiographique des Basses-terres du Saint-Laurent.

### **3.1.4 Cadre pédologique régional**

Le bassin versant du Bras d'Henri est composé principalement de deux régions pédologiques issues des trois régions physiographiques décrites précédemment. Dans la section des Basses-Terres du Saint-Laurent, des sédiments fins comme du limon et de l'argile couvrent le fond des dépressions et viennent former des gleysols, des brunisols ou des luvisols gris selon leur localisation. Dans la partie correspondant au piedmont, des dépôts fluvio-glaciaires constitués de graviers, de sables, de schistes argileux et de grès, ont évolué vers des podzols humo-ferriques, des brunisols ou des gleysols selon leur position topographique. À quelques endroits, dans les cuvettes, peuvent s'être formées des tourbières dues à l'accumulation de matière organique. Les basses et moyennes collines des Appalaches orientales constituent la deuxième région pédologique présente dans le bassin versant. Cette région pédologique se situe au sud du bassin entre 180 et 500 m d'altitude. Les sols de cette zone sont souvent minces et issus des dépôts glaciaires que l'on qualifie de tills pierreux. Les grands ordres de sol que l'on y retrouve sont des podzols et des brunisols souvent gleyifiés lorsqu'ils sont en bas de pente (Lamontagne & Nolin, 1997).

### **3.1.5 Cadre pédologique des trois parcelles étudiées**

Tel que vue précédemment, la texture du sol a une grande influence sur la capacité d'un sol à retenir l'eau. Il est donc essentiel de bien caractériser le territoire étudié. La Figure 13 présente les résultats d'une étude pédologique très détaillée à l'échelle de 1 : 10 000 (Bossé *et al.*, 2010). Cette étude a permis d'identifier à l'intérieur des trois parcelles cinq séries et unités de sols soit : Le Bras, Beurivage, Des Orignaux, Valère et Ravin (unité). Les séries Le Bras et Valère couvrent à part égale, 80 % de la superficie des trois champs. Les séries Des Orignaux et Beurivage occupent, respectivement 8 % et 10 % de la superficie totale des parcelles à l'étude et se retrouvent dans les champs 1 et 2 (CH-01 et CH-02). L'unité de terrain Ravin, qui est située à l'extrémité sud-ouest des trois champs, occupe 2 % de la surface totale. Le Tableau 4 expose les principales caractéristiques de ces séries de sols ainsi que la classe de drainage qui leur est associée. Des statistiques décrivant la teneur en matière organique (M.O., %) ainsi qu'en sable, limon et argile (%) de la couche de

surface des sols des trois parcelles à l'étude sont présentées au Tableau 5. La texture modale de la surface est un loam sableux fin avec 62,6 % de sable, 28,0 % de limon, 9,4 % d'argile et 6,4 % de M.O. Ces valeurs sont typiques des sols de cette région.

**Tableau 4: Caractéristiques des principaux sols (série ou unité) identifiés dans les trois parcelles à l'étude.**

Code	Série ou unité de sol	Classification taxonomique (Sous-groupe)	Classe granulométrique de la famille	Drainage
BS	Le Bras	Gleysol humique orthique	Loameux	Mal drainé
BV	Beaurivage	Podzol humo-ferrique gleyifié	Sableux	Modérément bien drainé
OR	Des Orignaux	Brunisol dystrique gleyifié	Loameux	Imparfaitement drainé
VA	Valère	Podzol humo-ferrique gleyifié	Sableux	Imparfaitement drainé
R	Ravin	Gleysol humique	Loam sableux	Mal drainé

Source : Bossé *et al.*, 2010.

À partir des données accumulées, les pédologues ont produit la carte du drainage dominant les unités cartographiques présentées à la Figure 14. Trois classes de drainage sont représentées sur cette carte : modérément bien drainé (D4), imparfaitement mal drainé (D5) et mal drainé (D6). On peut y observer qu'environ 49 % de la superficie des trois champs sont considérées comme étant imparfaitement drainé (D5). Cela correspond aux séries Valère et Des Orignaux. Environ 42 % de la surface est classée comme étant mal drainée (D6) et les sols qui y font référence sont la série Le Bras et l'unité de terrain Ravin. Le reste (8 %) appartient à la catégorie modérément bien drainée (D4) et est entièrement relié aux sols de la série Beaurivage.

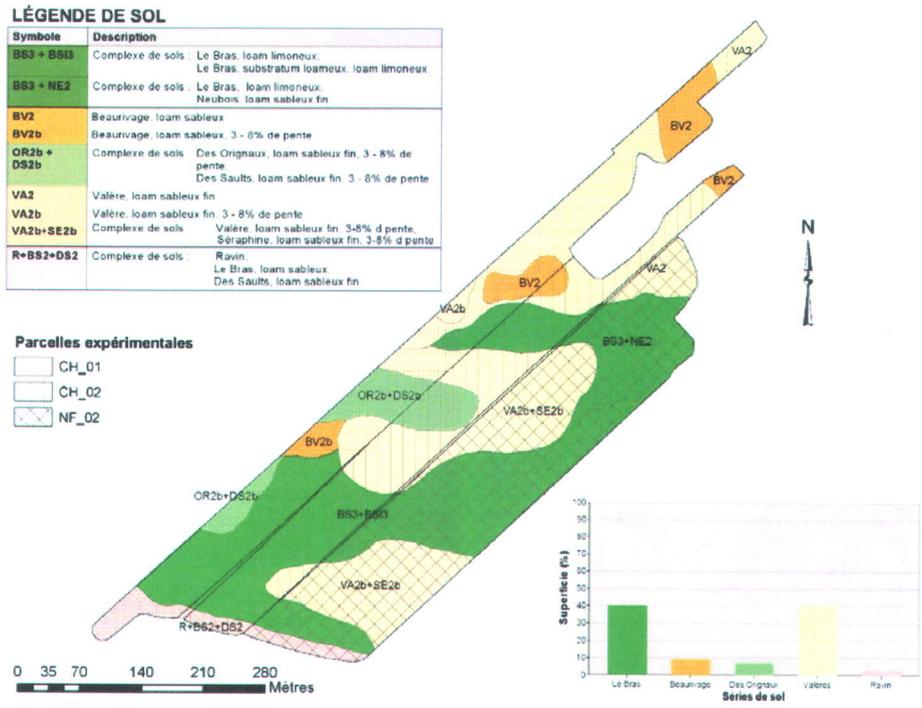


Figure 13 : Carte pédologique très détaillée des trois parcelles à l'étude (Bossé *et al.*, 2010).

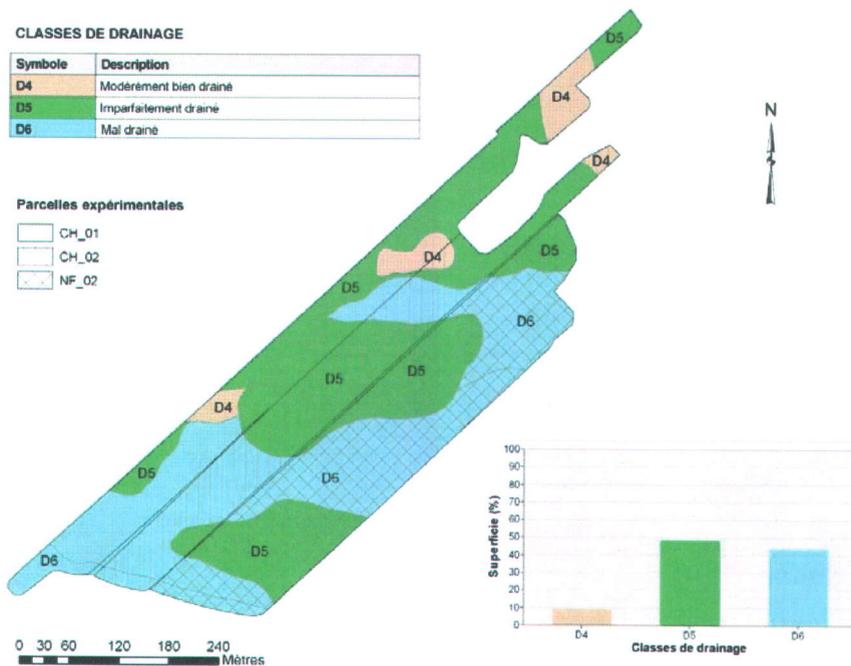


Figure 14 : Carte de la classe de drainage dominante les unités cartographiques établies par les pédologues suite aux travaux de prospection (Adaptée de Bossé *et al.*, (2010)).

Tableau 5 : Statistiques descriptives des teneurs en matière organique (M.O. %), sable, limon et argile (%) de la couche de surface (0-25 cm) des sols pour l'ensemble ainsi que pour chacun des champs étudiés.

<b>Ensemble des 3 champs</b>				
<b>Paramètres</b>	<b>M.O.</b>	<b>Sable</b>	<b>Limon</b>	<b>Argile</b>
<b>N</b>	164	109	109	109
<b>Minimum</b>	0.6	21.2	9.8	5.0
<b>Maximum</b>	40.3	85.2	67.0	18.3
<b>Moyenne</b>	6.4	62.6	28.0	9.4
<b>Écart-type</b>	4.2	12.7	11.0	2.3
<b>C.V. (%)</b>	67	20	39	25
<b>Champ #1</b>				
<b>Paramètres</b>	<b>M.O.</b>	<b>Sable</b>	<b>Limon</b>	<b>Argile</b>
<b>N</b>	53	53	53	53
<b>Minimum</b>	0.6	21.2	12.3	6.4
<b>Maximum</b>	40.3	80.4	67.0	16.4
<b>Moyenne</b>	7.3	64.7	26.2	9.1
<b>Écart-type</b>	6.3	13.9	12.3	2.2
<b>C.V. (%)</b>	87	21	47	24
<b>Champ #2</b>				
<b>Paramètres</b>	<b>M.O.</b>	<b>Sable</b>	<b>Limon</b>	<b>Argile</b>
<b>N</b>	38	38	38	38
<b>Minimum</b>	2.5	31.7	14.8	6.4
<b>Maximum</b>	15.1	78.8	54.8	13.5
<b>Moyenne</b>	7.3	61.0	29.7	9.3
<b>Écart-type</b>	2.6	11.1	9.9	1.8
<b>C.V. (%)</b>	36	18	33	20
<b>Champ #3</b>				
<b>Paramètres</b>	<b>M.O.</b>	<b>Sable</b>	<b>Limon</b>	<b>Argile</b>
<b>N</b>	73	18	18	18
<b>Minimum</b>	1.4	41.9	9.8	5.0
<b>Maximum</b>	10.5	85.2	43.8	18.3
<b>Moyenne</b>	5.2	59.9	29.7	10.4
<b>Écart-type</b>	2.3	11.7	9.1	3.2
<b>C.V. (%)</b>	45	20	31	31

### 3.1.6 Cadre agronomique

Le bassin versant du Bras d'Henri fait partie de la région de Chaudière-Appalaches mais plus particulièrement des MRC de Lotbinière et de La Nouvelle-Beauce. Le MAPAQ évalue à plus de un milliard de dollars par année les revenus engendrés par la production agricole de Chaudière-Appalaches (MAPAQ, [s.d.]). De cette somme, 39 % provient de la production porcine et 35 % de la production laitière. Cette réalité se traduit même à l'échelle de la ferme puisqu'une grande partie des fermes de cette région sont mixtes, allouées également à la production laitière et porcine. L'importance du domaine agricole se reflète aussi en termes d'emplois puisque environ 33 000 emplois y sont reliés (MAPAQ, [s.d.]).

#### *Problématique régionale*

La région de Chaudière-Appalaches est une zone d'agriculture intensive, tout particulièrement dans le bassin versant du Bras d'Henri. En effet, dans ce secteur, le nombre d'unités animales (UA) y est très élevé (300 UA par km<sup>2</sup>) et la surface qui est cultivée, particulièrement des cultures en rangée, est très importante. La qualité de l'eau de la rivière Chaudière fait l'objet d'une surveillance étroite puisqu'on a détecté la présence de pathogènes et d'éléments nutritifs (en particulier du phosphore et de l'azote) excédant les normes de qualité établies (AAC, 2001). Ces contaminants ont été retracés dans ces bassins. Ce sont les activités agricoles qui en sont la principale cause (AAC, 2001).

#### *Cultures*

En 2007, les cultures étaient différentes pour les trois parcelles à l'étude, alors qu'en 2008 elles étaient toutes sous couvert de maïs. En effet, en 2007 le champ 1 était semé en soya, le champ 2 était une prairie et le champ 3 était en maïs. Au moment de la prise de mesures les champs 1 et 3 étaient des sols nus puisque la culture était en émergence. Même constat pour 2008. Toutefois, en 2007, le champ 2 était recouvert de végétation (foin), ce qui a sûrement eu un impact sur les teneurs en humidité enregistrées. De plus, des travaux majeurs, installation de drains souterrains, ont été effectués dans le champ 1, entre 2007 et 2008.

### **3.2 Suivi spatio-temporel de la teneur en humidité des sols**

La teneur en humidité du sol pour la couche de surface (0-12 cm) a été mesurée à l'aide de l'appareil HydroSense CS620 de Campbell Scientific. Le protocole d'échantillonnage de l'humidité de surface des sols a été établi selon une grille non alignée de 30 m x 30 m, totalisant 164 sites répartis sur les trois parcelles contiguës. Les sites ont tous été géoréférencés afin d'assurer la qualité de la localisation des échantillonnages. Au printemps 2007, l'humidité de surface a été mesurée à quatre reprises, soit les 22, 25 et 28 mai ainsi que le 7 juin. À chacun des points de mesure, deux lectures d'HydroSense ont été acquises sur le même rang (lit de semence), de part et d'autre du point géoréférencé (Figure 15). La moyenne des deux valeurs d'humidité a été retenue comme valeur de mesure.

Au printemps 2008, le protocole d'échantillonnage a été amélioré pour stabiliser la donnée ponctuelle pour ainsi réduire les erreurs associées à la micro-variabilité de cette mesure. Ainsi, à chacun des points géoréférencés, quatre mesures d'humidité ont été prises selon un dispositif en forme de croix, c'est-à-dire deux lectures dans le même rang et deux autres dans les rangs situés de part et d'autre du point d'ancrage de l'observation (Figure 15). Une fois de plus, seule la moyenne des quatre lectures a été utilisée pour mener l'analyse géostatistique. Le suivi de 2008 a été répété à huit reprises, soit le 13, 15, 20, 22, 27 et 30 mai ainsi que le 3 et 6 juin. Pour chacune des 12 dates de mesure, une étude de variabilité a été menée pour caractériser l'intensité de la variabilité de la mesure d'humidité du sol à l'échelle ponctuelle.

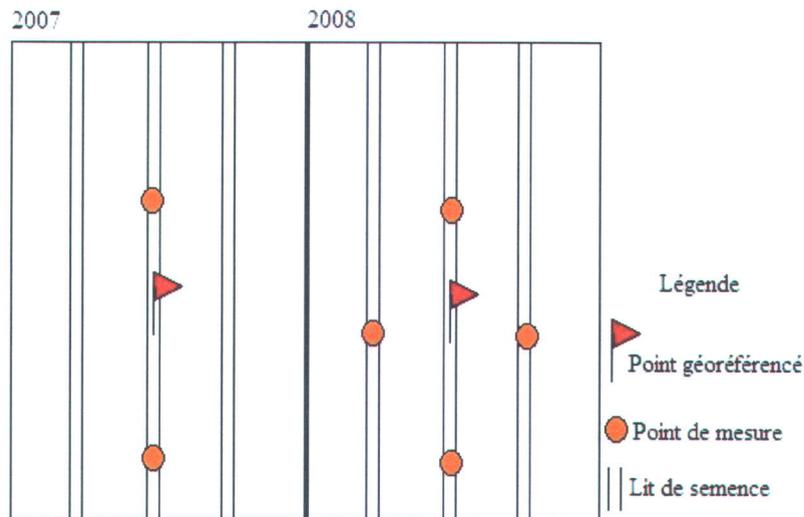


Figure 15 : Stratégie d'échantillonnage des mesures de l'humidité de surface du sol avec l'appareil HydroSense CS620 aux printemps 2007 et 2008.

### 3.2.1 Prospection électrique des sols

Les données de la CEA ont été acquises à l'aide du conductivimètre électrique à quadripôle VERIS 3100 le 12 mai 2008. Cet appareil a circulé à une vitesse constante variant entre 10 et 15 km·hr<sup>-1</sup> sur les terres en effectuant une série de lignes parallèles distantes de cinq à six mètres environ et enregistrant des données à tous les deux à trois mètres. Cet instrument permet d'acquérir deux valeurs de CEA simultanément soit la surface (0-30 cm) et l'autre en profondeur (0-100 cm). Les données brutes ont été nettoyées afin d'éliminer les valeurs extrêmes et erronées. Pour cela, l'écart-type (s) et la moyenne (m) ont été calculés et les données dont la valeur était supérieure à deux fois l'écart-type en valeur absolue ( $m \pm 2s$ ) ont été éliminées du jeu de données. Comme il s'agissait d'un fichier de données ponctuelles, celles-ci ont été interpolées par krigeage afin d'obtenir une carte de format matriciel.

### **3.3 Stratégie d'acquisition et de traitement des images satellitaires**

Au printemps, une proportion élevée des sols sont nus puisqu'on est au début de la saison de croissance végétative. C'est donc pour cette raison que les images satellites optique et radar ont été acquises au mois de mai. D'ailleurs, la meilleure période pour l'acquisition d'images satellitaires se situe entre la fin mai et le début de juin (Niang, Nolin & Bernier, 2010).

#### **3.3.1 Acquisition et prétraitement des images Radarsat-1**

Dans le cadre d'un projet GRIP (*Government Related Initiative Program*), projet d'AAC en partenariat avec l'agence spatiale canadienne (ASC), des images de RADARSAT-1 du secteur du Bras d'Henri ont été acquises afin d'étudier le potentiel des images radar pour la cartographie numérique de plusieurs paramètres pédologiques, dont l'humidité de surface des sols à l'échelle de la parcelle.

Pour notre étude, une image radar, acquise le 15 mai 2008 à 10h49 (Figure 16), a été utilisée. Au moment de l'acquisition de l'image, les conditions météorologiques étaient une pluie fine (2,4 mm) et de grand vent (Tableau 6). Toutefois, RADARSAT-1 émet des impulsions d'hyperfréquences qui se situent au niveau de la bande C (5,3 GHz et 5,6 cm de longueur d'onde) ce qui signifie que peu importe le climat ou l'heure de la journée, il est possible d'obtenir des mesures. Des données d'humidité du sol ont été acquises au cours de cette même journée. Le passage du satellite était en liaison descendante, l'acquisition en mode fin (F1F) et l'angle d'incidence était de 37 à 47°.

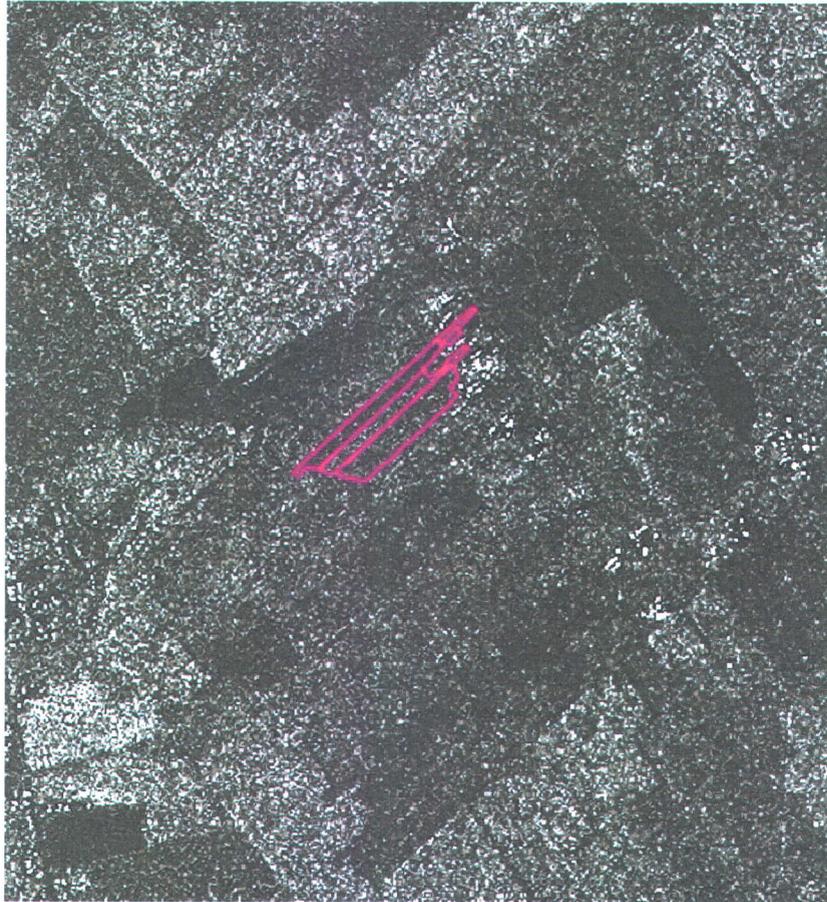


Figure 16 : Image RADARSAT-1 acquise le 15 mai 2008 du territoire à l'étude (polygone rose).

Tableau 6 : Caractéristiques d'acquisition de l'image RADARSAT-1 au printemps 2008.

<b>Date de la capture</b>	15 mai 2008
<b>Heure de la capture (GMT)</b>	10:49 (5:49 local)
<b>Mode</b>	Fin, Descendant
<b>Résolution nominale (m)</b>	8
<b>Angle d'incidence (°)</b>	37-47
<b>Conditions météorologiques du secteur au moment de la prise d'image</b>	Averse
<b>Conditions météorologiques pour la journée</b>	Généralement nuageux
<b>Visibilité (km)</b>	16,1

Sources : Compilées à partir des données d'observation de la station météorologique de Jean-Lesage d'Environnement Canada ainsi que des fichiers de métadonnées des images satellitaires fournies par Viasat.

Les corrections radiométriques et géométriques ont été effectuées à l'aide du logiciel PCI Géomatica version 10,1. Les algorithmes CDSAR et SARINCD ont été appliqués, étapes préliminaires nécessaires pour lire l'image à traiter et y ajouter les canaux (orbitre, éphéméride, gain, compensation, points de contrôle et angles d'incidence) nécessaires aux étapes subséquentes. L'algorithme Sarsigm a ensuite été utilisé pour transformer les valeurs numériques en coefficients de rétrodiffusion ( $\sigma^0$ ). L'image a été reprojetée selon la projection cartographique Mercator transverse modifiée, fuseau 7 (MTM 7) grâce à l'outil *Reprojection* du logiciel. Par la suite, elle a été corrigée géométriquement avec le module OrthoEngine à partir de données vectorielles du réseau routier provenant de la Base Nationale de Donnée Topographique (BNDT) et du modèle numérique d'altitudes (1 : 50 000) disponibles sur le site de Géobase. Environ 30 points de contrôle ont été créés avec une erreur moyenne quadratique (RMS) inférieure à 1m ce qui signifie que l'erreur résiduelle est inférieure à la résolution spatiale de l'image (6,25 m). Une fois orthorectifiée, l'image a été rehaussée grâce à l'application de trois filtres GAMMA (3 x 3, 5 x 5, 7 x 7). Ce filtre minimise la perte d'information de texture sur une image dont la distribution statistique suit une loi Gamma et conserve la valeur des pixels même si la distribution ne suit pas la loi normale (CCT, 2007).

### **3.3.2 Acquisition et prétraitement de l'image IKONOS**

L'image du satellite IKONOS a été acquise le 13 mai 2008 à 15h51 (Figure 17). Les conditions météorologiques du secteur au moment de l'acquisition étaient idéales (Tableau 7), c'est-à-dire ensoleillée avec très peu de nuages ainsi que très peu de brume (< 5 %). La visibilité était d'environ 40 km selon la station météorologique de l'aéroport Jean-Lesage.

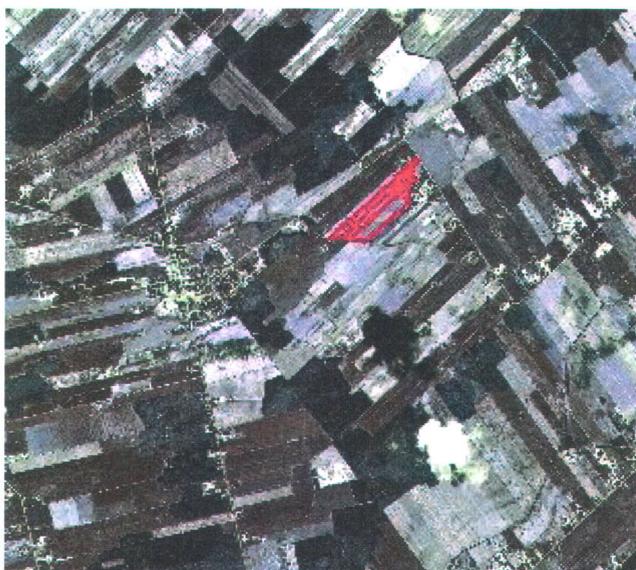


Figure 17 : Image IKONOS du 13 mai 2008 représentant le territoire étudié (polygone rose).

Tableau 7 : Caractéristiques d'acquisition de l'image IKONOS.

<b>Date de la capture</b>	13 mai 2008
<b>Heure de la capture (GMT)</b>	15:51
<b>Couverture nuageuse (% de l'image)</b>	0
<b>Présence de brume (haze)</b>	< 5 %
<b>Conditions météorologiques du secteur au moment de la prise d'image</b>	Dégagé
<b>Conditions météorologiques pour la journée</b>	Dégagé
<b>Élévation moyenne (m)</b>	45
<b>Angle zénithal (°)</b>	29,7
<b>Visibilité (km)</b>	40,0

Sources : Compilées à partir des données d'observation de la station météorologique de Jean-Lesage d'Environnement Canada ainsi que des fichiers de métadonnées des images satellitaires fournies par Viasat.

Le prétraitement de l'image IKONOS a aussi été effectué à l'aide du logiciel de traitement d'image PCI Géomatica. Les corrections radiométriques ont été réalisées grâce au module ATCOR2 de PCI. Ce module a permis, entre autre, de transformer les valeurs de luminance apparente en réflectances ( $\rho$ ). L'image a ensuite été corrigée géométriquement en utilisant le même module et les mêmes données qui ont été utilisées pour l'orthorectification des images radars. Environ 10 points de contrôle ont été créés avec une erreur moyenne quadratique (RMS) inférieure à 1 ce qui signifie que l'erreur résiduelle est inférieure à la résolution spatiale de l'image (4 m). Tout comme pour l'image Radarsat-1, l'image IKONOS a été rehaussée grâce à l'application d'un filtre 5x5 duquel résulte une valeur moyenne des pixels sélectionnés.

### **3.3.3 Conversion des images radar et optique**

Une fois les images corrigées, elles ont été converties en format matriciel (Tiff et grd) pour ensuite être converties de nouveau en format vectoriel (pixel en point) à partir du logiciel ArcGIS 9.2. Cette transformation a généré des fichiers ponctuels de 4023 données pour l'image radar et 9845 pour l'image optique, et ce pour les trois parcelles. Ces données plus densément échantillonnées ont été utilisées comme covariable pour réaliser les analyses de cokrigeage afin d'améliorer la carte numérique de l'humidité de surface des sols.

## **3.4 Statistiques descriptives**

Les statistiques descriptives permettront d'obtenir la moyenne, le mode, la médiane, le coefficient de variation, l'écart-type des données à l'étude. La moyenne et l'écart-type peuvent être utilisés pour évaluer si la distribution des données est normale (Wilkinson, Engleman & Marcantonio, 2005). En effet, en additionnant et en soustrayant à la moyenne la valeur de l'écart-type, on établit une borne minimale et maximale de la distribution. Il sera ensuite possible d'établir si la majorité des données se situent à l'intérieur de ces bornes. Le logiciel SYSTAT version 11.0 offre aussi la possibilité d'évaluer la normalité d'une distribution de données en effectuant un test de Shapiro-Wilk (SW) pour un échantillonnage compris entre 3 et 5000.

Le test est fait à partir de la formule suivante :

$$SW = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n a_i x_i \right]^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

où  $a = (a_1, a_2, \dots, a_n) = n_1 V^{-1} \left[ (m' V^{-1}) (V^{-1} m) \right]^{-0.5}$ ,  $m$  est un vecteur des valeurs attendues de la loi de la normale et  $V$  correspond à la matrice de covariance. Une valeur  $p \leq 0,05$  indique que la distribution des données ne suit pas la loi normale (Wilkinson, Engleman & Marcantonio, 2005).

### 3.4.1 Corrélations de Spearman

Ce paramètre mathématique permet d'analyser la relation entre les distributions de données provenant de deux variables différentes. L'analyse de corrélation entre les variables a été possible grâce à l'extraction des valeurs de CEA, de  $\sigma^0$  radar et de p-PIR, de format matriciel, à partir des données ponctuelles ( $n = 164$ ) d'humidité géoréférencées. Cette extraction a été réalisée à partir du logiciel d'ArcGIS 9.2. Comme le fichier de données de CEA était de format vectoriel. Les données ont dû être interpolées par krigeage afin d'obtenir une carte numérique continue de la CEA. Suite à l'extraction, les données sont importées sous forme de table dans le logiciel SYSTAT qui permet de réaliser l'analyse de corrélation.

Le résultat obtenu de l'analyse, que l'on nomme le coefficient de corrélation ( $r$ ), est compris entre -1 et 1, et témoigne du rapport entre les deux variables de trois façons : positivement ( $>0$ ), négativement ( $<0$ ) ou nulle (0) (Isaaks & Srivastava, 1989). Un coefficient de corrélation positif signifie que les deux variables réagissent dans la même façon, c'est-à-dire que si une augmente l'autre augmente aussi. Un coefficient de corrélation négatif indique que lorsqu'une des deux variables augmente l'autre diminue. Lorsque les valeurs de corrélation obtenues sont près de zéro, cela indique qu'il n'y a peu ou pas de relation linéaire entre les paramètres étudiés. Alors que les valeurs de -1 et 1 indiquent une relation linéaire parfaite (Wilkinson, Engleman & Marcantonio, 2005).

L'analyse de corrélation de Spearman a été privilégiée dans le cadre de ce projet parce qu'elle utilise le rang de classement des données au lieu des données métriques brutes, comme le démontre l'équation suivante (Isaaks & Srivastava, 1989) :

$$\rho_{rang} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Rx_i - m_{Rx})(Ry_i - m_{Ry})}{\sigma_{Rx} \sigma_{Ry}} \quad (6)$$

où n représente le nombre d'échantillon;  $Rx_1, \dots, Rx_n$  représentent pour chacune des données et la plus petite valeur est 1 pour la première variable,  $m_{Rx}$  est la moyenne de tous les rangs de la variable x et  $\sigma_x$  est l'écart-type de cette distribution;  $Ry_1, \dots, Ry_n$  représentent les rangs pour chaque valeurs de la distribution de la seconde variable et  $m_{Ry}$  ainsi que  $\sigma_y$  sont respectivement la moyenne de tous les rangs et l'écart-type de la deuxième variable.

Ce test par rang de classement est moins influencé par les pairs de données extrêmes. De plus, il ne nécessite pas que les deux variables aient une relation linéaire entre elles pour obtenir de bon coefficient. Cette analyse permettra d'établir la relation entre l'humidité de surface des sols et les covariables. Les relations entre les paramètres ont été réalisées pour chacune des parcelles individuelles ainsi que pour l'ensemble des champs.

### 3.5 Géostatistiques

Les interpolations par krigeage et cokrigeage, ont été réalisées à l'aide du module « *Geostatistical Analyst* » du logiciel ArcGIS 9.2. Ce module permet de définir différents paramètres de l'analyse variographique et de réaliser une analyse de validation croisée permettant à l'aide de différents paramètres statistiques d'établir la fiabilité et la précision de la carte numérique réalisée.

#### 3.5.1 Variogramme

L'analyse variographique permet d'étudier la structure spatiale de la série de données étudiée (Perron, 2002). Pour l'analyse de l'humidité de sols les modèles variographiques sphérique, exponentiel et gaussien ont été sélectionnés. Ces modèles se sont révélés les mieux adaptés pour modéliser la variabilité spatiale de la propriété étudiée. De plus, ces modèles sont les plus couramment employés dans les études géostatistiques des propriétés de sol (Perron, 2002). La présence d'isotropie et d'anisotropie de la variation spatiale des mesures d'humidité a aussi été

étudiée. Le pas d'échantillonnage (*lag*) choisi pour réaliser l'analyse variographique est de 30 m, puisque l'échantillonnage de l'humidité du sol sur le terrain a été réalisé selon une grille non-alignée de 30 m x 30 m. Les paramètres générés en réalisant le variogramme sont l'effet pépité ( $C_0$ ; Nugget) qui correspond à la variabilité aléatoire ainsi que la variance structurée ( $C$ , *partial sill*). Ces paramètres ont, dans un premier temps, été utilisés pour réaliser l'interpolation par krigeage ordinaire de l'humidité de surface des sols. Dans un deuxième temps, ils ont été réutilisés pour réaliser l'interpolation par cokrigeage.

Le cokrigeage a été employé pour interpoler les données d'humidité du sol (9 échantillons  $ha^{-1}$ ), variable d'intérêt, avec les données des variables auxiliaires mesurées plus densément : la CEA (675 échantillons· $ha^{-1}$ ), le  $\sigma^0$  radar (260 échantillons· $ha^{-1}$ ) et la  $\rho$  spectrale (635 échantillons· $ha^{-1}$ ). L'utilisation d'une variable grandement échantillonnée présentant une relation avec la variable primaire devrait permettre d'améliorer la fiabilité et la précision de l'interpolation de la variable prédite, dans notre cas l'humidité de surface des sols. La distribution ponctuelle des  $\sigma^0$  radar et de  $\rho$  spectrale est uniforme contrairement aux données de CEA. Le cokrigeage a été réalisé pour l'ensemble des trois champs de même que pour les champs individuellement. Pour l'humidité du sol ainsi que les covariables, les paramètres des modèles variographiques isotropes choisis étaient les mêmes que ceux sélectionnés pour le krigeage ordinaire. Seule exception, la portée de la covariable qui s'ajuste automatiquement afin de permettre un meilleur ajustement de la courbe du variogramme. Comme la densité des variables auxiliaires le permettait, l'étude anisotrope a aussi été effectuée lors du cokrigeage. La valeur choisie pour la portée de l'axe majeur était de 120 m alors que l'axe mineur était de 30 m pour l'humidité.

### 3.5.2 Validation croisée

L'analyse du graphique de validation croisée et de ses paramètres permet d'évaluer la fiabilité des modèles créés, à partir de l'erreur de prédiction (*Prediction errors*). Quatre paramètres statistiques sont à considérer pour déterminer si le modèle est acceptable. La moyenne de l'erreur de prédiction (*Mean*) doit être près de zéro pour éviter d'avoir un biais dans l'estimation. Elle est calculée à partir de la formule suivante :

$$Mean = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \hat{Z}(s_i) - z(s_i) \right)}{n} \quad (7)$$

où  $\hat{Z}(s_i)$  est la valeur prédite de la validation croisée,  $z(s_i)$  est la valeur observée et  $n$  le nombre valeur utilisée.

L'erreur moyenne quadratique de prédiction (*Root-mean-square, RMS*) doit être le plus près de zéro. Elle est déterminée par la formule suivante :

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( \hat{Z}(s_i) - z(s_i) \right)^2}{n}} \quad (8)$$

où l'écart entre la valeur prédite de la validation croisée  $\hat{Z}(s_i)$  et la valeur observée  $z(s_i)$  est élevée au carré et divisée par  $n$  le nombre de valeurs utilisées avant d'en extraire la racine carrée. Ensuite, pour que l'estimation de l'incertitude liée à l'interpolation soit valide, il faut que l'erreur moyenne standardisée (*Average Standard Errors, ASE*) soit similaire au RMS.

L'erreur moyenne standardisée est calculée de la façon suivante :

$$ASE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \hat{\sigma}(s_i)}{n}} \quad (9)$$

où  $\hat{\sigma}(s_i)$  est l'erreur standard de prédiction pour un lieu  $s_i$  et  $n$  le nombre de valeurs utilisées. Enfin, l'erreur quadratique moyenne standardisée (EQMS) de l'anglais « *Root-mean-square standardized prediction error* » doit tendre vers la valeur 1. Cette valeur est conditionnelle à la validité de l'ASE. Une valeur de EQMS supérieure à 1, indique que la valeur prédite est sous-estimée alors qu'une valeur de EQMS est inférieure à 1 indique une surestimation de celle-ci.

Les paramètres statistiques des modèles variographiques et de la validation croisée ont été compilés dans des tableaux, afin de comparer entre eux l'ensemble des modèles réalisés. Certains des paramètres mesurés seront présentés dans la section résultats et discussions. Toutefois, compte tenu de la quantité importante d'informations générées, seuls les modèles présentant les meilleures estimations seront présentés.



## Chapitre 4 : Résultats et discussions

Cette section présente les résultats générés lors des différents traitements statistiques et géostatistiques des données étudiées. Les analyses sont regroupées selon les principaux fondements du travail de recherche. Premièrement, les résultats des statistiques descriptives des données d'humidité du sol recueillies au cours des deux années de mesure seront présentés pour décrire l'intensité de la variabilité spatiale et temporelle de la teneur en humidité de surface des sols. Le coefficient de variation (CV, %) sera utilisé comme indicateur de l'intensité de la variabilité de l'humidité dans les parcelles à l'étude. Par la suite, les trois hypothèses préalablement énoncées au premier chapitre, seront validées, soit :

- 1) L'humidité de surface des sols présente une structure spatiale à l'échelle de la parcelle agricole. Cet énoncé sera vérifié à partir des paramètres issus de l'analyse variographique.
- 2) La CEA, le  $\sigma^{\circ}$  radar et la  $\rho$  spectrale présentent de bonnes corrélations avec les mesures d'humidité de surface des sols. Cette dernière pourra être validée par l'analyse des résultats des coefficients de corrélation qui permettront d'établir l'existence ou non d'une relation entre la variable primaire et les variables auxiliaires.
- 3) L'utilisation des données de CEA, de  $\sigma^{\circ}$  radar et de  $\rho$  spectrale, comme variables auxiliaires, permettent d'améliorer l'estimation de l'humidité de surface des sols. Cette hypothèse sera confirmée par la comparaison des paramètres statistiques de validation croisée générées suite aux interpolations spatiales par krigeage et/ou cokrigeage.

### 4.1 Variabilité de la teneur en humidité de la couche de surface des sols

Dans le cadre de ce projet, les données d'humidité de surface des sols mesurées avec l'appareil HydroSense CS620 ont été étudiées pour caractériser l'intensité de la variabilité de cette mesure. La variabilité peut résulter de la date et de l'année de mesure (variabilité temporelle) ou de l'emplacement (variabilité spatiale). À ce niveau, la discussion portera sur la variabilité observée dans l'ensemble des trois parcelles étudiées, dans les parcelles prises individuellement ainsi que la variabilité associée à chaque point de mesure (variabilité ponctuelle).

Les statistiques descriptives seront utilisées à cette fin. Aucune valeur extrême n'a été éliminée du jeu de données car 1) le jeu de données était issu de la moyenne de 2 à 4 répétitions (selon l'année de

mesure) prises à chaque point, 2) le nombre de points dans chaque champ était relativement petit (< 100) pour l'application des statistiques géospatiales et surtout 3) l'analyse géostatistique a révélé que les données étaient logiquement distribuées par rapport à la topographie et en lien avec les valeurs avoisinantes.

Souvent employée dans le domaine de la science du sol pour comparer l'intensité de la variation spatiale des paramètres étudiés (Perron, 2002), l'analyse des résultats des coefficients de variation (CV) permettra d'évaluer la variabilité spatiale de l'humidité de surface des sols à l'étude. Nolin & Cailler (1992) ont d'ailleurs proposé, une classification du CV (Tableau 8) permettant de décrire de manière qualitative la variabilité spatiale des propriétés de sols (Perron, 2002; Quenum, 2009).

**Tableau 8 : Classification des coefficients de variation (CV).**

<b>Classe</b>	<b>CV (%)</b>
Faible	< 15
Modérée	15-35
Élevée	35-50
Très élevée	50-100
Extrêmement élevée	≥ 100

Les statistiques descriptives des douze périodes d'échantillonnage d'humidité de surface des sols mesurés avec l'Hydrosense CS620 dans le champ 1 sont présentées au Tableau 9. Au printemps 2007, quatre périodes de mesure ont eu lieu et ont permis de classer la variabilité spatiale de l'humidité du sol de ce champ de modéré (CV variant entre 22 et 34 %). Les données ne sont pas distribuées selon la loi normale, puisque les valeurs de  $p$  du test de SW sont très faibles. En effet, le postulat étant qu'une valeur de  $p \leq 0,05$  amène le rejet de l'hypothèse de normalité. Pour ce qui est des mesures recueillies au printemps 2008, on constate que les CV variaient entre 18 et 25 % ce qui équivaut aussi, sur l'échelle de classification, à une variabilité modérée. On remarque moins de variabilité temporelle des valeurs de CV obtenus en 2008 par rapport à 2007, 7 % et 12 %, respectivement. Cet écart pourrait être attribuable à l'installation d'un système de drainage souterrain à l'automne 2007 qui a eu pour effet d'uniformiser la variabilité spatiale de l'humidité de surface des sols à l'intérieur de la parcelle. Le 22 mai 2008 est la journée où les mesures d'humidité ont révélé le CV le plus faible (CV = 18 %). Cette faible variabilité est probablement associée à d'importante quantité de pluie (> 20 mm) tombée la journée précédant la campagne d'échantillonnage. Cette pluie a eu pour effet de saturer les sols et d'uniformiser les teneurs en humidité mesurées. Les valeurs d'humidité minimales et maximales plus élevées, comparativement aux autres périodes de mesure,

confirment aussi l'influence des précipitations sur les valeurs enregistrées. Considérant le fait qu'une valeur élevée du  $p$  résultant du test de SW atteste la normalité de la distribution, il est possible de confirmer la normalité des données d'humidité ( $p \geq 0,05$ ) recueillies les 22 et 27 mai de même que les 3 et 6 juin.

**Tableau 9 : Statistiques descriptives des données d'humidité de surface des sols mesurées avec l'appareil HydroSense CS620 pour le champ 1.**

Date	Min.	Max.	Moy.	Écart-type	CV (%)	SW statistique	SW $p$
22 mai 07	15,00	54,00	27,46	8,43	31	0,92	0,00
25 mai 07	7,50	37,00	17,78	6,00	34	0,92	0,00
28 mai 07	20,50	53,50	30,44	6,81	22	0,90	0,00
07 juin 07	18,00	57,50	29,47	8,01	27	0,92	0,00
13 mai 08	14,25	38,50	24,76	6,00	24	0,95	0,04
15 mai 08	12,25	39,25	23,44	5,89	25	0,95	0,04
20 mai 08	13,00	43,50	24,48	6,22	25	0,93	0,00
22 mai 08	22,75	60,25	39,31	6,86	18	0,98	0,67
27 mai 08	16,50	49,25	29,61	6,38	22	0,96	0,06
30 mai 08	14,50	43,00	24,07	5,95	25	0,93	0,00
03 juin 08	16,25	51,75	30,63	6,26	20	0,97	0,13
06 juin 08	12,25	39,25	23,49	5,49	23	0,96	0,10

CV = Coefficient de variation, SW = Shapiro-Wilk, SW $p$  = Valeur  $p$  associée au test de Shapiro-Wilk

Les résultats présentés au Tableau 10, révèlent une variabilité spatiale modérée (15 et 21 %) de l'humidité mesurée au printemps 2007, pour le champ 2. Si l'on compare les valeurs de CV obtenues au champ 2, dont les propriétés texturales et de teneur en matière organique sont comparables au champ 1 (Tableau 9), on constate que les CV du champ 2 sont tout de même inférieurs d'environ 10 %. Ces résultats pourraient être attribuables au fait que 43 % de la superficie des sols du champ 2 sont associés à des sols mal drainés (D6) comparativement à 32 % pour le champ 1 (Figure 14). Les sols sont donc humidifiés plus rapidement et demeurent plus longtemps en état de saturation. De plus, les pratiques culturales de 2007, ont pu influencer la différence de CV observée dans les deux champs, En effet, le champ 1 était sous culture de soya alors que le champ 2 était en prairie. Au moment des prises de mesures, le soya émergeait, donc la majorité du sol était en condition de sol nu alors que la présence de fourrage a pu aussi contribuer à conserver une humidité de surface plus importante et ainsi uniformiser la variabilité spatiale. Pour l'année 2008, les CV sont compris entre 16 et 24 % ce qui équivaut aussi à une intensité de variabilité modérée. Ces résultats sont comparables

aux résultats obtenus pour le champ 1. La variabilité temporelle enregistrée est aussi comparable. L'influence du drainage sur l'humidité de surface du sol a été moindre. Ceci pourrait être associé au plus faibles précipitations reçues en 2008 comparativement à celles de la même période (1<sup>er</sup> mai au 15 juin) en 2007, respectivement 57,5 mm et 126,2 mm. Les pourcentages moyens d'humidités mesurées confirment l'influence de fortes précipitations en 2007. Il est a noté qu'en 2008, la régie des cultures était la même pour tous les champs, soit en maïs. En ce qui concerne le test de SW, on constate que presque toutes les distributions de données d'humidité mesurées dans le champ 2 tendent vers la normalité à l'exception du 27 mai 2007 et du 20 mai 2008 ( $p = 0,04$ ).

**Tableau 10 : Statistiques descriptives des données d'humidité de surface des sols mesurées avec l'appareil HydroSense CS620 pour le champ 2.**

Date	Min.	Max.	Moy.	Écart-type	CV (%)	SW statistique	SW $p$
22 mai 07	25,50	57,00	36,86	7,63	21	0,96	0,20
25 mai 07	20,00	49,50	32,01	6,69	21	0,96	0,24
28 mai 07	29,50	57,00	38,83	5,99	15	0,94	0,04
07 juin 07	28,00	56,00	39,20	6,76	17	0,95	0,09
13 mai 08	16,75	42,00	26,72	6,39	24	0,97	0,31
15 mai 08	15,25	37,25	24,81	5,94	24	0,97	0,34
20 mai 08	17,25	48,75	27,61	6,69	24	0,94	0,04
22 mai 08	28,25	55,25	41,70	6,53	16	0,98	0,84
27 mai 08	18,00	45,75	30,76	6,60	21	0,99	0,87
30 mai 08	17,25	37,25	26,71	5,57	21	0,96	0,26
03 juin 08	22,75	43,75	32,43	5,70	18	0,97	0,42
06 juin 08	16,25	34,50	24,80	5,31	21	0,96	0,14

CV = Coefficient de variation, SW = Shapiro-Wilk, SW $p$  = Valeur  $p$  associée au test de Shapiro-Wilk

La variabilité spatiale de l'humidité de surface des sols du champ 3 (Tableau 11), variait entre 18 et 32 % lors du printemps 2007. L'intensité de la variabilité spatiale est donc elle aussi classée comme modérée. Toutefois, en 2008 on constate que les CV sont compris entre 14 et 31 %, ce qui correspond à une variabilité qui va de faible à modérée. De plus faibles valeurs de variabilité spatiale et temporelle, comparativement aux champs 1 et 2, pour la majorité des journées d'échantillonnage, pourraient être attribuables à une grande superficie (57 %) de la parcelle appartenant à la classe de drainage mal drainé. D'autres portions de champ (43 %) sont associées à des sols imparfaitement drainés et aucune zone n'appartient à la catégorie de drainage modérément bien drainé, comparativement à 16 % et 4 % pour les champs 1 et 2. Les journées associées à de plus grandes valeurs de CV sont des périodes où il y a eu absence de pluie plusieurs jours avant la prise de

mesure. Ces conditions entraînent une plus grande hétérogénéité de la teneur en humidité de surface des sols à l'intérieur de la parcelle et ainsi une meilleure différenciation des sols secs et humides. En 2007, les valeurs de CV plus élevées par rapport au champ 2 pourraient être aussi expliquées, comme pour le champ 1, aux différences culturelles, ce champ étant sous culture de maïs. D'autre part en 2007, la majorité des ensembles de données répondent aux critères de normalité du test de SW, à l'exception du 25 mai. Pour 2008, seul les dates du 22 mai et 3 juin présentent une distribution normale.

**Tableau 11 : Statistiques descriptives des données d'humidité de surface des sols mesurées avec l'appareil HydroSense CS620 pour le champ 3.**

Date	Min.	Max.	Moy.	Écart-type	CV (%)	SW statistique	SW <i>p</i>
22 mai 07	10,50	45,50	26,16	8,23	32	0,98	0,31
25 mai 07	11,00	40,50	21,32	6,19	29	0,95	0,01
28 mai 07	17,50	44,50	30,14	5,52	18	0,99	0,93
07 juin 07	17,50	51,50	31,77	7,77	24	0,97	0,09
13 mai 08	11,75	47,50	22,40	6,86	31	0,94	0,00
15 mai 08	16,50	49,50	26,23	6,07	23	0,92	0,00
20 mai 08	19,75	50,25	27,82	5,88	21	0,90	0,00
22 mai 08	30,00	61,25	42,11	5,98	14	0,98	0,27
27 mai 08	23,50	52,25	32,76	5,19	16	0,94	0,00
30 mai 08	17,75	43,00	26,06	4,91	19	0,94	0,00
03 juin 08	22,00	50,00	33,51	5,40	16	0,97	0,12
06 juin 08	17,50	37,25	24,72	4,17	17	0,96	0,03

CV = Coefficient de variation, SW = Shapiro-Wilk, SW*p* = Valeur *p* associée au test de Shapiro-Wilk

Le Tableau 12 présente les statistiques descriptives des mesures d'humidité de surface des sols prises dans l'ensemble des trois champs. On y observe que, pour l'année 2007, les CV sont compris entre 22 % et 36 %, soit une intensité de variabilité passant de modérée à élevée. Lorsque l'on compare les valeurs exprimant la variabilité spatiale et temporelle de l'ensemble des parcelles avec celles présentes dans les parcelles prises individuellement, on constate que les résultats obtenus sont comparables aux résultats du champ 1 mais que la variabilité est supérieure aux champs 2 et 3. Tout comme lorsqu'on étudie l'ensemble des parcelles, le champ 1 présente une plus grande hétérogénéité que les champs 2 et 3. Cette hétérogénéité plus importante du champ 1 est percevable lorsqu'on analyse la carte pédologique très détaillée (Figure 13) ainsi que la carte dérivée de la classe de drainage dominant les unités cartographiques (Figure 14). Pour l'année 2008, les CV mesurés appartiennent tous à la classe modérée, variant entre 16 % et 28 %. Cette fois-ci, la variabilité est

légèrement plus faible dans le champ 1, équivaut sensiblement aux résultats obtenus pour le champ 2 et est supérieure aux résultats obtenus dans le champ 3. Si l'on compare les superficies appartenant aux différentes classes de drainage, il est possible de constater que leur distribution spatiale s'apparente fortement à celle du champ 2, soit 10 % de sols modérément bien drainés, 48 % imparfaitement drainés et 42 % mal drainés (Figure 14). Les valeurs obtenues en 2008 pour l'ensemble des parcelles sont plus facilement comparables puisque l'ensemble des parcelles sont sous culture de maïs alors qu'il s'agissait de trois cultures différentes en 2007. Différents antécédents culturaux (culture, rotation, fertilisation, travail du sol, etc.) peut avoir eu une incidence sur les propriétés comme la porosité, la structure, la teneur en matière organique qui influencent le comportement hydrodynamique du sol (Shukla & Lal, 2002).

Il est intéressant de constater que l'intensité de la variabilité observée à l'intérieur de chacune des parcelles prises individuellement n'est pas inférieure à celle présente en considérant l'ensemble de celles-ci. Ceci met en évidence que la diversité pédologique observée dans l'ensemble comme dans chacune des parcelles (notamment à ce qui a trait au drainage des sols) constitue une source importante de variation de la teneur en humidité de la couche de surface.

En ce qui concerne la normalité de la distribution des teneurs en humidité du sol observée en 2007, aucune date d'acquisition ne présente une distribution normale, alors qu'en 2008, seules les mesures prises le 22 mai et le 3 juin répondent aux postulats de normalité selon le test de SW. La diversité pédologique en termes de caractéristiques et de comportements observés dans ces parcelles explique en partie la complexité de la population à étudier à l'aide des techniques statistiques paramétriques.

**Tableau 12 : Statistiques descriptives des données d'humidité prises avec l'appareil HydroSense CS620 pour l'ensemble des trois champs.**

Date	Min.	Max.	Moy.	Écart-type	CV (%)	SW statistique	SW $p$
22 mai 07	10,50	57,00	29,06	9,19	32	0,98	0,02
25 mai 07	7,50	49,50	22,66	8,22	36	0,95	0,00
28 mai 07	17,50	57,00	32,25	7,04	22	0,97	0,00
07 juin 07	17,50	57,50	32,75	8,43	26	0,97	0,00
13 mai 08	11,75	47,50	24,17	6,68	28	0,97	0,00
15 mai 08	12,25	49,50	25,00	6,07	24	0,96	0,00
20 mai 08	13,00	50,25	26,69	6,33	24	0,94	0,00
22 mai 08	22,75	61,25	41,11	6,49	16	0,99	0,66
27 mai 08	16,50	52,25	31,28	6,06	19	0,98	0,04
30 mai 08	14,50	43,00	25,57	5,49	22	0,97	0,00
03 juin 08	16,25	51,75	32,33	5,86	18	0,99	0,11
06 juin 08	12,25	39,25	24,34	4,90	20	0,98	0,02

CV = Coefficient de variation, SW = Shapiro-Wilk, SW $p$  = Valeur  $p$  associée au test de Shapiro-Wilk

Comme on peut le constater à la Figure 18, la variabilité de l'humidité de surface observée à l'échelle ponctuelle (*i.e.* associée à la répétition de la mesure autour du même point), à chaque date de mesure, avec l'appareil HydroSense CS620, est beaucoup plus faible que celle observée à l'échelle parcellaire pour l'ensemble des 144 points de mesure dans les trois champs à l'étude (CV = 23-41 %). En effet, en 2007, les valeurs médianes des CV associées aux mesures ponctuelles varient de 6,0 % (28 mai) à 8,3 % (25 mai). Ces valeurs sont un peu plus élevées en 2008, bien que celles-ci aient été estimées avec une plus grande fiabilité, c'est-à-dire à partir d'un plus grand nombre de répétitions (soit 4 répétitions en 2008 comparativement à 2 en 2007). Ainsi, en 2008, les valeurs médianes des CV associées aux mesures ponctuelles varient de 9,3 % (22 mai) à 15,7 % (13 mai). La variance associée aux mesures ponctuelles représente de 5 à 9 % (valeur médiane des 164 points pour chacune des périodes de mesure) de la variance totale mesurée globalement dans l'ensemble des trois champs en 2007, et de 23 à 36 % en 2008. En 2007, la variabilité ponctuelle était plus faible dans le champ 2 (en prairie) que dans les champs 1 et 3, sous culture de soya et maïs respectivement. En 2008, les trois champs étaient en maïs et présentent des valeurs médianes de CV relativement semblables. Sur le plan méthodologique, ce constat est encourageant car il démontre la cohérence et la précision de la mesure de l'humidité de surface des sols à l'aide de l'HydroSense CS620 et supporte ainsi la démarche proposée pour réaliser une cartographie numérique de l'humidité de surface des sols à l'aide des méthodes géostatistiques.

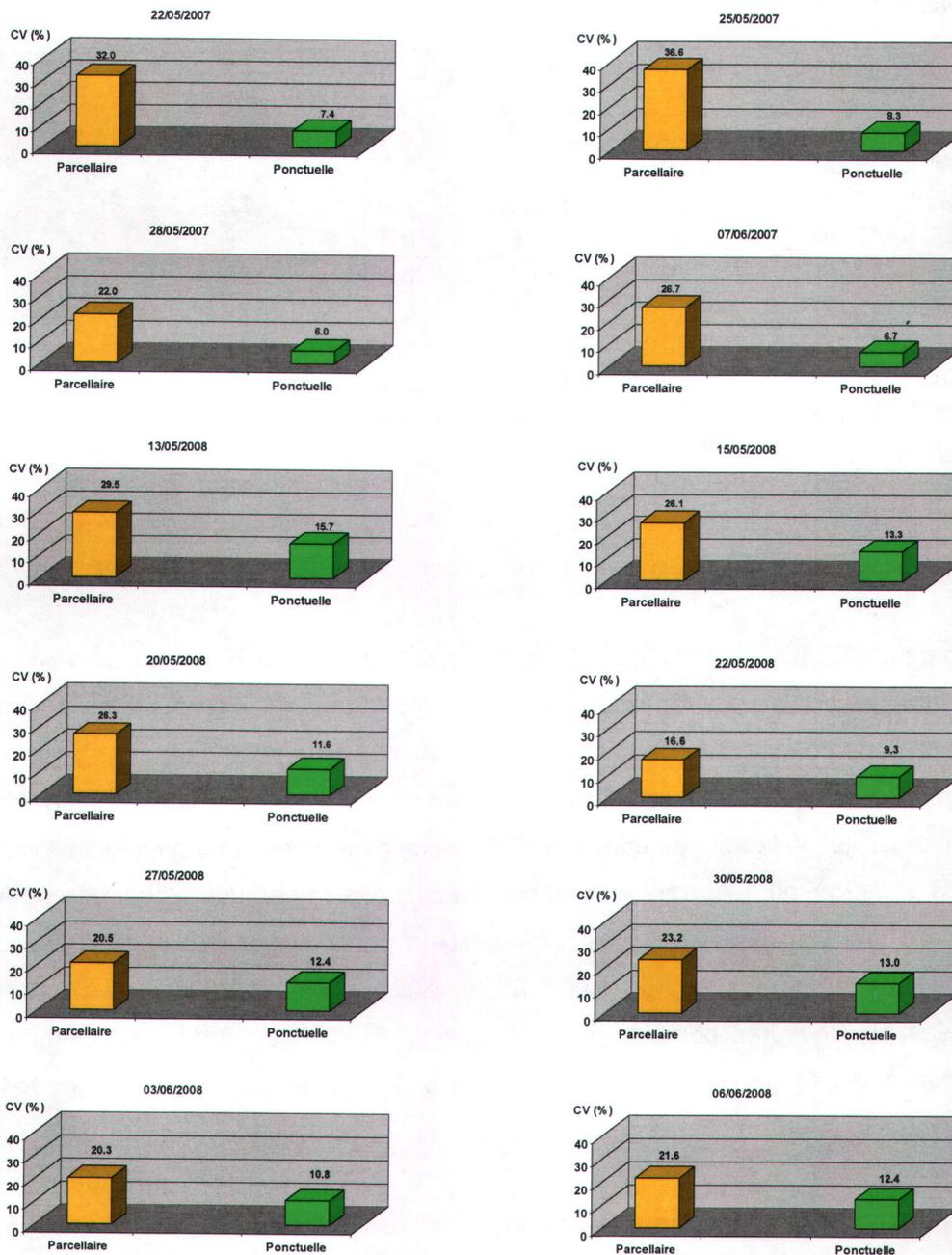


Figure 18 : Comparaison de la variabilité (CV, %) de la teneur en humidité de surface du sol mesurée à chaque date à l'échelle parcellaire à partir des 144 points de mesure (barre orange) et à l'échelle ponctuelle à partir des répétitions effectuées à chaque point de mesure dans les trois champs (barre verte).

En bref, on remarque que peu importe si l'on considère les champs individuellement ou groupés ensemble, les CV obtenus montrent que l'intensité de la variabilité spatiale et temporelle de l'humidité de surface des sols est généralement modérée. Ces résultats reflètent le constat établi par Nolin *et al.* (2000) qui spécifiait que la variabilité naturelle, des sols de la plaine ondulée qui caractérise une bonne partie de la vallée du Saint-Laurent, est généralement modérée. Il a été démontré que plusieurs facteurs intrinsèques et extrinsèques, que ce soit les propriétés pédologiques, climatiques, culturelles, l'action anthropique ainsi que la précision de l'appareil de mesures ont une influence directe sur l'amplitude de la variabilité de l'humidité de surface des sols. Une variabilité plus élevée aurait nécessité un plus grand nombre d'échantillons afin d'atteindre une meilleure précision de prédiction (Nolin, Cambouris & Simard, 1997). Dans ce cas-ci, la variabilité étant modérée, la probabilité de réaliser des cartes numériques d'humidité de surface des sols, à la fois fiables et précises, semble *a priori* assez bonne.

## 4.2 Analyse variographique de l'humidité des sols

L'analyse variographique permet de déterminer si une variable présente une structure spatiale dans le site étudié pour la stratégie d'échantillonnage utilisée. Cela revient à étudier la dépendance spatiale entre les observations. Ainsi, Whelan & McBratney (2000) proposent de décrire le degré de développement de la structure spatiale d'une variable donnée selon une échelle qualitative (forte à faible) définie à partir du ratio  $C/C_0+C$  (Tableau 13).

Tableau 13 : Échelle qualitative de la structure spatiale.

Structure spatiale	$C/C_0+C$
<b>Forte</b>	> 0,75
<b>Modérément forte</b>	0,60 – 0,75
<b>Modérée</b>	0,40 – 0,60
<b>Modérément faible</b>	0,25 – 0,40
<b>Faible</b>	< 0,25

Source : Whelan & McBratney (2000)

Les résultats des analyses variographiques isotropes intraparcellaires réalisées pour chacune des dates de 2007 et 2008 sont exposés au Tableau 14. Mentionnons d'entrée de jeu, qu'une modèle isotrope a été retenue dans le cas des analyses variographiques car le nombre d'échantillon par parcelle était petit ( $n < 100$ ). Pour le champ 1, les ratios dérivés de l'analyse variographique pour 2007

sont situés entre 0,51 et 0,70 ce qui caractérise une structure spatiale allant de modérée à modérément forte alors qu'elle varie de modérément faible à modérément forte en 2008 ( $C/C_0+C = 0,31$  à  $0,62$ ). Ces résultats confirment la présence d'une certaine dépendance spatiale entre les échantillons et par le fait, que les variations des teneurs en humidité de surface des sols ne sont pas seulement le fruit du hasard. Pour le champ 2, les ratios varient de 0,45 à 0,89 en 2007 et de 0,41 à 0,84 en 2008. Ces résultats correspondent aux classes de structure spatiale modérée à forte ce qui signifie que la variation de l'humidité n'est pas distribuée au hasard dans ce champ et qu'elle est répartie selon une certaine structure d'organisation spatiale (Whelan & McBratney, 2000). Par contre, la présence de structure spatiale dans le champ 3 est faible (0,08-0,15) pour quatre dates de prises de mesures soit, les 22 et 25 mai 2007 ainsi que les 13 et 15 mai 2008. Pour ces dates, la composante aléatoire ( $C_0$ ) est relativement élevée par rapport à la composante systématique ( $C$ ). Il existe deux moyens de diminuer la composante aléatoire de la variabilité, soit : 1) utiliser un intervalle d'échantillonnage plus rapproché que la grille utilisée dans la présente étude (30 x 30 m) ou 2) diminuer l'erreur expérimentale en améliorant la qualité de l'échantillonnage. Ainsi, le fait d'établir en 2008 la moyenne ponctuelle à partir de 4 répétitions à chaque point plutôt que 2 comme en 2007 permet de réduire l'erreur standard de la mesure à chaque point dans la majeure partie des cas. Une autre façon de réduire l'erreur associée à la mesure consisterait à appliquer une calibration spécifique des lectures de la sonde selon le type de sol (texture). Bien que recommandée par le fabricant, cette calibration demeure complexe à appliquer à l'échelle spatiale. Les autres dates de prise de mesure présentent un ratio  $C/C_0+C$  qualifiant la structure spatiale de l'humidité de surface des sols de modérément faible à forte (0,32 à 0,85). Le classement des trois champs selon la présence de structure spatiale pour les mesures de pourcentage d'humidité de surface des sols pour le printemps 2007 et 2008 suit l'ordre suivant : champ 2 > champ 1 > champ 3.

Comme on peut le constater aux Figure 13 et Figure 14, les champs 1 et 2 présentent une hétérogénéité pédologique plus élevée, en termes de nombre de séries de sols, d'unités cartographiques et de classes de drainage identifiées que le champ 3. L'analyse des portées moyennes, de l'humidité de surface des sols dans les champs 1 et 2, sont relativement élevées, 260 m et 135 m. La taille de ces structures d'organisation spatiale est en grande partie attribuable à la physiographie et au pédopaysage. Par contre, dans le champ 3, où l'on note la présence de seulement deux séries de sols et classes de drainage, la portée moyenne calculée est de 55 m, donc une structure d'organisation spatiale plus petite que dans les deux autres champs. Ces résultats révèlent la présence d'une hétérogénéité des conditions pédologiques importante. Celle-ci est sans doute le résultat des pratiques culturales et nombreux travaux d'aménagement apportés à cette

parcelle au fil des années pour en améliorer le potentiel de production, (v.g. nivellement, drainage de surface et souterrain, épierrement, labour, etc.) lesquels ont contribué à modifier les propriétés intrinsèques des sols. De plus, il ressort de ce résultat, particulièrement si l'on se base sur la demi-valeur de la portée (27.5 m) que l'intensité de l'échantillonnage utilisée dans la présente étude (grille de 30 x 30 m) n'a sans doute pas permis de caractériser avec fiabilité la variabilité spatiale de l'humidité de surface des sols de cette parcelle.

Par ailleurs, pour l'ensemble des trois champs (Tableau 15), la structure de l'humidité de surface est comprise entre 0,49 et 0,80 en 2007 ce qui équivaut selon l'échelle qualitative (Tableau 13) à une structure spatiale modérée à forte. En 2008, la structure spatiale varie de modérément faible à modérément forte ( $C/C_0+C = 0,47$  à  $0,72$ ). L'intervalle d'échantillonnage de 30 m utilisé semble approprié puisque la portée moyenne calculée pour l'étude de l'ensemble des champs est de 115 m.

Les paramètres issus de l'analyse variographique confirment l'existence de dépendance spatiale entre les échantillons pour les mesures d'humidité de surface des sols prises à l'aide de l'appareil HydroSense CS620 que l'on considère l'ensemble des trois parcelles contigües ou chacune d'elles prises individuellement. Toutefois, les résultats révèlent que l'intervalle d'échantillonnage pour le champ 3 n'est pas optimal et ne permettra probablement pas de révéler avec fiabilité le patron d'organisation spatiale de l'humidité de surface des sols de cette parcelle. Ainsi, ces résultats permettent de répondre à la première hypothèse de recherche qui suggérait que l'humidité de surface des sols présente une structure spatiale à l'échelle de la parcelle agricole. C'est principalement le cas des champs 1 et 2 ainsi que pour l'ensemble des trois champs. L'hypothèse n'est cependant pas confirmée lorsque les parcelles (v.g. champ 3) ont subi des pédoturbations importantes liées aux nombreux travaux d'aménagement qui peuvent modifier les caractéristiques intrinsèques des sols et parfois leur distribution spatiale dans le paysage agricole.

Tableau 14 : Analyse variographique isotrope intraparcellaire de l'humidité de surface du sol.

Date	C	C <sub>0</sub>	C/ C <sub>0</sub> +C
<b>Champ 1 (n=53)</b>			
22 mai 07	36,58	35,74	0,51
25 mai 07	25,50	15,13	0,63
28 mai 07	28,50	20,54	0,58
07 juin 07	47,25	20,26	0,70
13 mai 08	11,65	26,13	0,31
15 mai 08	14,34	21,54	0,40
20 mai 08	16,10	24,21	0,40
22 mai 08	19,08	31,57	0,38
27 mai 08	28,72	17,63	0,62
30 mai 08	16,90	20,32	0,45
3 juin 08	21,90	20,86	0,51
6 juin 08	11,05	22,53	0,33
<b>Champ 2 (n=38)</b>			
22 mai 07	52,09	7,13	0,88
25 mai 07	36,44	9,32	0,80
28 mai 07	16,29	20,20	0,45
07 juin 07	41,28	5,26	0,89
13 mai 08	28,33	13,24	0,68
15 mai 08	18,06	18,44	0,49
20 mai 08	20,84	30,27	0,41
22 mai 08	38,97	7,67	0,84
27 mai 08	37,08	11,25	0,77
30 mai 08	16,18	16,01	0,50
3 juin 08	28,13	7,39	0,79
6 juin 08	14,10	14,95	0,49
<b>Champ 3 (n=73)</b>			
22 mai 07	9,32	57,12	0,14
25 mai 07	3,01	34,62	0,08
28 mai 07	14,06	17,38	0,45
07 juin 07	51,42	8,86	0,85
13 mai 08	5,82	39,77	0,13
15 mai 08	5,38	31,61	0,15
20 mai 08	13,34	20,02	0,40
22 mai 08	18,09	17,75	0,50
27 mai 08	14,85	10,77	0,58
30 mai 08	7,60	15,87	0,32
3 juin 08	18,83	9,74	0,66
6 juin 08	7,34	9,90	0,43

C = variance structurée, C<sub>0</sub> = variabilité aléatoire (effet de pépité)

L'étude fait aussi ressortir que les conditions météorologiques entourant l'acquisition des données au champ, peut favoriser ou nuire à l'expression de la structure d'organisation spatiale de l'humidité de surface des sols à l'intérieur des parcelles. C'est particulièrement le cas, lorsque les mesures sont prises lorsqu'une grande proportion des sols des parcelles présente des conditions avoisinant l'état de saturation en eau. Il conviendrait d'attendre quelques jours après une période de précipitation abondante ou un peu plus tard dans la saison pour laisser au sol le temps de se ressuyer. Les cartes numériques de teneurs en humidité de surface des sols ainsi produites donnent alors des renseignements utiles sur les conditions de drainage des sols.

**Tableau 15 : Analyse variographique isotrope de la teneur en humidité de surface des sols dans l'ensemble des trois parcelles.**

Date	C	C <sub>0</sub>	C/ C <sub>0</sub> +C
22 mai 07	32,66	33,33	0,49
25 mai 07	21,65	19,69	0,52
28 mai 07	19,62	19,37	0,50
07 juin 07	46,65	11,46	0,80
13 mai 08	25,03	20,74	0,55
15 mai 08	17,99	20,27	0,47
20 mai 08	19,85	22,63	0,47
22 mai 08	25,74	18,57	0,58
27 mai 08	27,97	10,91	0,72
30 mai 08	14,48	16,56	0,47
3 juin 08	22,20	13,74	0,62
6 juin 08	12,40	12,93	0,49

C = variance structurée, C<sub>0</sub> = variabilité aléatoire (effet de pépète)

### 4.3 Corrélation entre l'humidité de surface du sol et les variables auxiliaires

Les coefficients de corrélation ( $r_s$ ) obtenus serviront à déterminer s'il existe une relation entre les variables auxiliaires à la cartographie, *i.e.* les données de CEA, le  $\sigma^0$  radar et les valeurs de réflectance ( $\rho$ ) associées à chaque bande spectrale extraite de l'image IKONOS, et la variable principale, soit la teneur en humidité de surface du sol mesurée à l'aide de l'HydroSense CS620. Les variables auxiliaires démontrant une bonne relation devraient permettre d'améliorer la précision de la carte numérique de la teneur en humidité de surface des sols générée suite à une interpolation spatiale par cokrigeage. Dans cette approche, la prédiction de la variable principale sous-échantillonnée est soutenue par la forte densité d'échantillonnage de la variable auxiliaire. Le coefficient de corrélation de Spearman ( $r_s$ ) a été retenu pour quantifier les relations existantes,

puisqu'il est moins influencé par la distribution des données et la présence de valeurs extrêmes. Le Tableau 16 présente une classification qualitative de la relation entre les deux types de variables à partir des coefficients de corrélation ( $r_s$ ).

**Tableau 16 : Classification des coefficients de corrélation de Spearman ( $r_s$ ).**

<b>Classe</b>	<b><math>r_s</math></b>
Très faible	0,00 à 0,24
Faible	0,25 à 0,49
Bonne	0,50 à 0,75
Très bonne	0,75 à 1,00

#### **4.3.1 Relation entre l'humidité de surface et la CEA du sol**

Les données de CEA des sols ont été recueillies avec le VERIS 3100 le 12 mai 2008 et mesurées sur deux profondeurs (0-30 cm et 0-100 cm). Quoique les valeurs de CEA varient de façon temporelle, des relations peuvent être établies entre cette variable et les mesures d'humidité de surface des sols acquises à différentes périodes puisque la CEA est, entre autre, liée aux propriétés intrinsèques du sol (texture, contenu en matière organique, classe de drainage, etc.) lesquelles évoluent lentement si le sol n'est pas perturbé par l'homme (Goulet, 2003).

Les coefficients de corrélation ( $r_s$ ), entre les données de CEA et les mesures d'humidité recueillies à différentes dates, sont présentés au Tableau 17. Dans le champ 1, les valeurs de  $r_s$  sont plus constantes temporellement que pour les champs 2 et 3, *i.e.* que la majorité des dates de mesure présentent, selon la classification du Tableau 17, une bonne relation avec la CEA. Le champ 2 présente les corrélations les plus élevées. Toutefois les résultats sont variables selon les dates de prise de mesures. Parmi les douze dates d'acquisition, sept présentent une bonne corrélation avec la CEA mesurée en surface (0-30 cm), alors qu'ils se chiffrent à neuf avec la CEA mesurée en profondeur (0-100 cm). Le champ 3 présente des corrélations allant de très faibles à faibles ( $r_s = 0,15$  à  $0,46$ ) pour la majorité des dates de prise de données. Seules, les valeurs d'humidités mesurées le 7 juin 2007 ( $r_s = 0,50$ ), les 22 ( $r_s = 0,55$ ) et 27 ( $r_s = 0,57$ ) mai 2008 ainsi que le 3 juin 2008 ( $r_s = 0,62$ ) indiquent de bonnes relations avec la CEA 0-30 cm.

Pour la majorité des résultats de 2007, que ce soit pour l'analyse par champ ou pour l'ensemble des trois champs, les valeurs de  $r_s$  entre l'humidité et la CEA de la couche de surface (0-30 cm) sont plus faibles qu'avec la CEA mesurée en profondeur (0-100 cm). Toutefois, on observe l'inverse en 2008, année de mesure de la CEA. Lorsqu'elle est prise en profondeur, la mesure de la CEA est souvent un bon indicateur du drainage et du régime hydrique des sols (v.g. profondeur au gley, de la nappe d'eau, etc.). Par contre, les mesures de la CEA prises en surface traduisent plus spécifiquement la teneur en humidité de la couche de surface des sols surtout si la date de prospection s'approche de la date des mesures d'humidité (cas des mesures prises en 2008). Cependant, de plus en plus d'appareil, comme le VERIS 3100, permettent de caractériser simultanément les sols sur plusieurs profondeurs.

Dans l'ensemble des résultats obtenus, on peut aussi observer que les dates du 7 juin 2007 ainsi que du 22 mai, 27 mai et du 3 juin 2008 ont obtenu de bonnes corrélations pour les champs pris individuellement comme dans l'ensemble des trois champs. Ces dates pourraient donc être retenues dans l'éventuelle analyse de cokrigeage de l'humidité du sol avec la CEA de surface puisque cette variable auxiliaire présentait les coefficients les plus élevés.

**Tableau 17 : Résultats des coefficients de corrélation de Spearman ( $r_s$ ) obtenus entre les teneurs en humidité de surface des sols mesurées à différentes dates et les mesures de conductivité électrique apparente (CEA) des sols prises selon deux profondeurs (0-30 cm et 0-100 cm) le 12 mai 2008.**

Date	3 champs		Champ 1		Champ 2		Champ 3	
	0-30 cm	0-100 cm	0-30 cm	0-100 cm	0-30 cm	0-100 cm	0-30 cm	0-100 cm
<b>22 mai 07</b>	0,37	0,34	0,54	0,56	0,51	0,72	0,42	0,42
<b>25 mai 07</b>	0,44	0,44	0,69	0,70	0,47	0,67	0,38	0,39
<b>28 mai 07</b>	0,37	0,31	0,61	0,55	0,48	0,60	0,34	0,30
<b>07 juin 07</b>	0,52	0,55	0,72	0,73	0,37	0,59	0,50	0,61
<b>13 mai 08</b>	0,33	0,20	0,53	0,52	0,45	0,43	0,35	0,17
<b>15 mai 08</b>	0,57	0,46	0,64	0,62	0,61	0,55	0,40	0,15
<b>20 mai 08</b>	0,57	0,45	0,67	0,63	0,49	0,37	0,39	0,16
<b>22 mai 08</b>	0,62	0,51	0,56	0,46	0,73	0,72	0,55	0,34
<b>27 mai 08</b>	0,68	0,60	0,71	0,63	0,70	0,63	0,57	0,42
<b>30 mai 08</b>	0,56	0,44	0,62	0,58	0,58	0,49	0,45	0,20
<b>03 juin 08</b>	0,70	0,63	0,67	0,64	0,73	0,73	0,62	0,48
<b>06 juin 08</b>	0,56	0,44	0,67	0,58	0,59	0,55	0,46	0,23

### 4.3.2 Relation entre l'humidité de surface et les mesures de réflectance extraites de l'image IKONOS

Tel qu'élaboré préalablement, le satellite IKONOS fournit une image multispectrale de quatre canaux du spectre électromagnétique. L'analyse et les résultats présentés ont été limités puisque l'image a été rehaussée selon un filtre (moyenne de 5 x 5) et que les images produites ont tous quatre canaux, ce qui multiplie le nombre de variables étudiées de façon considérable. Le Tableau 18 expose les résultats des coefficients de corrélation obtenus entre l'humidité de surface du sol et les valeurs de réflectance du proche-infrarouge ( $\rho$ -PIR) extraites de l'image IKONOS rehaussé selon un filtre (moyenne 5 x 5) acquise le 13 mai 2008. D'abord et avant tout, on constate que les corrélations sont négatives, ce qui signifie que lorsque les taux d'humidité sont faibles, la valeur  $\rho$ -PIR est élevée, et inversement (Sullivan, Shaw & Rickman, 2005). Tout comme pour les données de CEA, les valeurs de  $r_s$  les plus élevées entre  $\rho$ -PIR et l'humidité du sol sont observées dans le champ 2. De plus, cette fois-ci, le champ 2 est celui présentant une plus grande stabilité temporelle ( $r_s = -0,53$  à  $-0,75$ ) comparativement au champ 1 ( $r_s = -0,38$  à  $-0,58$ ). Tous les  $r_s$  calculés dans le champ 2 se retrouvent dans la classe bonne à très bonne alors qu'ils appartiennent aux classes faibles à bonne pour le champ 1. Le champ 3 est de nouveau celui qui présente les relations les plus faibles, quasi inexistantes. Seules les données du 22 mai, du 3 et 6 juin 2008 révèlent des valeurs de  $r_s = -0,50$  permettant de les classer dans la catégorie bonne, si l'on se réfère au Tableau 16. Les valeurs de  $r_s$  obtenues en utilisant la  $\rho$ -PIR reflètent les mêmes résultats obtenus avec la CEA, toutefois les valeurs de coefficient sont inférieures à cette dernière. La relation entre l'humidité de surface du sol et la CEA semble mieux définie qu'entre l'humidité du sol et  $\rho$ -PIR. Les dates démontrant les meilleures relations avec  $\rho$ -PIR sont similaires à celles obtenues avec la CEA, que ce soit pour l'ensemble des champs ou les champs individuels, soit les 22 et 27 mai ainsi que le 3 juin 2008.

**Tableau 18 : Résultats des coefficients de corrélation de Spearman ( $r_s$ ) obtenus entre l'humidité de surface des sols mesurés à différentes dates et les valeurs de réflectance du proche-infrarouge ( $\rho$ -PIR) extraites d'une image IKONOS acquise le 13 mai 2008.**

<b>Date</b>	<b>3 champs</b>	<b>Champ 1</b>	<b>Champ 2</b>	<b>Champ 3</b>
<b>22 mai 07</b>	-0,20	-0,40	-0,60	-0,26
<b>25 mai 07</b>	-0,33	-0,50	-0,59	-0,33
<b>28 mai 07</b>	-0,25	-0,54	-0,62	-0,24
<b>07 juin 07</b>	-0,37	-0,48	-0,53	-0,38
<b>13 mai 08</b>	-0,17	-0,43	-0,59	-0,15
<b>15 mai 08</b>	-0,49	-0,58	-0,64	-0,21
<b>20 mai 08</b>	-0,49	-0,44	-0,60	-0,23
<b>22 mai 08</b>	-0,53	-0,38	-0,72	-0,50
<b>27 mai 08</b>	-0,60	-0,55	-0,75	-0,44
<b>30 mai 08</b>	-0,48	-0,51	-0,62	-0,33
<b>03 juin 08</b>	-0,60	-0,54	-0,74	-0,49
<b>06 juin 08</b>	-0,50	-0,51	-0,63	-0,50

#### **4.3.3 Relation entre l'humidité de surface et le coefficient de rétrodiffusion ( $\sigma^0$ ) du signal radar HH extraits de l'image Radarsat-1**

Le Tableau 19 présente les valeurs de  $r_s$  établies entre les coefficients de rétrodiffusion du signal radar HH extraits de l'image Radarsat-1 rehaussée avec un filtre gamma 7 x 7 et les données d'humidité du sol. Les résultats des images ayant été rehaussées avec un filtre gamma 3 x 3 ou 5 x 5 n'ont pas été présentés puisque les valeurs de  $r_s$  n'étaient pas significatives.

Dans un premier temps, on remarque que les valeurs de coefficients sont de loin inférieures aux résultats obtenus avec la CEA ou  $\rho$ -PIR. Contrairement, aux résultats obtenus précédemment, le champ 1 présente les valeurs de  $r_s$  les plus élevées (0,33 à 0,55). Les champs 2 et 3 ont pour leur part, des valeurs de  $r_s$  qui se situent dans les classes très faible ou faible (0,12 à 0,40). Aucune date précise ne présente des valeurs de  $r_s$  distinctes par rapport aux autres. Les valeurs révélant de bonne corrélation pour le champ 1 semblent aléatoires. Pour le champ 2, les valeurs de  $r_s$  les plus élevées (0,36 à 0,40), quoique plutôt faibles, sont associées aux dates du 22 mai et du 3 juin 2008, alors que pour le champ 3 ( $r = 0,33$ ), elles sont le 27 mai et 3 juin 2008.

**Tableau 19 : Résultats des coefficients de corrélation de Spearman ( $r_s$ ) obtenus entre l'humidité de surface des sols mesurés à différentes dates et les coefficients de rétrodiffusion ( $\sigma^0$ ) du signal radar HH extraits de l'image Radarsat-1 acquise le 15 mai 2008.**

Date	3 champs	Champ 1	Champ 2	Champ 3
22 mai 07	0,39	0,53	0,36	0,25
25 mai 07	0,38	0,55	0,34	0,20
28 mai 07	0,32	0,46	0,26	0,14
07 juin 07	0,42	0,54	0,22	0,26
13 mai 08	0,27	0,41	0,19	0,15
15 mai 08	0,30	0,50	0,26	0,19
20 mai 08	0,32	0,54	0,12	0,21
22 mai 08	0,32	0,33	0,36	0,25
27 mai 08	0,36	0,53	0,24	0,33
30 mai 08	0,31	0,47	0,16	0,22
03 juin 08	0,40	0,52	0,40	0,33
06 juin 08	0,32	0,52	0,19	0,19

En résumé, les résultats obtenus permettent de répondre à la deuxième hypothèse de ce projet de recherche. Il existe une relation entre l'humidité de surface des sols et les variables auxiliaires. Comme pour l'hypothèse 1, la confirmation de l'hypothèse 2 dépend du champ étudié et de la date d'acquisition de la mesure d'humidité sans doute pour les mêmes raisons avancées pour l'hypothèse 1. Enfin, la confirmation de l'hypothèse 2 dépend également de la variable auxiliaire. En effet, la relation entre l'humidité de surface des sols et les variables auxiliaires s'établit selon l'ordre suivant :  $CEA > \rho\text{-PIR} > \sigma^0 \text{ radar}$ . Pour  $\sigma^0 \text{ radar}$ , les valeurs de  $r_s$  sont à la limite ( $r_s = 0,5$ ) suggérée pour soutenir le cokrigage. Comme les valeurs de  $r_s$  obtenues pour la CEA mesurée à 0-30 cm sont relativement semblables ou même supérieures à celles mesurées à 0-100 cm, seulement la CEA mesurée à 0-30 cm sera retenue pour vérifier l'hypothèse 3. Les résultats obtenus avec cette variable auxiliaire seront comparés à ceux de  $\rho\text{-PIR}$  et  $\sigma^0 \text{ radar}$ . De plus, puisque les données d'humidité de surface des sols mesurées avec l'HydroSense de Campbell couvrent une profondeur de 0-15 cm et que les images satellites sont aussi limitées à l'humidité de surface, il devient donc moins pertinent de considérer les mesures de CEA acquises en profondeur (0-100 cm) dans la comparaison. Enfin, compte tenu des valeurs de CV, de  $C/C_0+C$  et de  $r_s$  obtenues précédemment et de la quantité importante de données disponibles, seul les dates du 27 mai et du 3 juin 2008 seront retenues pour vérifier l'hypothèse 3.

#### 4.4 Krigeage et cokrigeage de l'humidité de surface des sols

Les résultats des paramètres statistiques issus des validations croisées sont présentés au Tableau 20. Ce tableau permet d'avoir une vue d'ensemble et de comparer les résultats obtenus de l'interpolation par krigeage ordinaire et cokrigeage anisotrope des données d'humidité de surface des sols. Les covariables utilisées pour le cokrigeage étant les valeurs de CEA, de  $\rho$ -PIR et  $\sigma^{\circ}$  du signal HH. Les résultats des paramètres statistiques contenus dans ce tableau permettront de valider si les variables auxiliaires utilisées permettent ou non de réduire l'erreur de prédiction, et ainsi améliorer la fiabilité et la précision de la carte numérique d'humidité de surface des sols. De plus, le gain permet d'établir si l'apport de la covariable améliore la prédiction par rapport à l'utilisation de la variable primaire seule, par krigeage ordinaire. Le gain est calculé à partir du ASE\* de l'humidité de surface auquel on soustrait le ASE\* obtenu à partir du cokrigeage. Le ASE\* quant à lui est obtenu en divisant le ASE par la moyenne de l'humidité pour la journée visée que l'on multiplie par 100 pour obtenir un pourcentage. Lorsque l'on obtient un gain positif cela indique que l'on a obtenu une amélioration avec le cokrigeage, alors qu'un gain négatif indique le contraire.

Bien que trois modèles de variogrammes aient été mentionnés précédemment, un seul a été retenu afin de limiter la quantité d'information et de faciliter la comparaison des résultats. Le modèle sélectionné pour l'ensemble des variogrammes était sphérique, le pas d'échantillonnage (lag) de 30 m, la portée majeure de 120 m et mineure de 30 m ainsi qu'un axe d'analyse (angle d'orientation) de 47°. L'axe d'analyse a été défini en fonction de l'orientation géographique des trois champs à l'étude.

L'analyse de l'erreur quadratique de prédiction (RMS) des interpolations par krigeage nous permet de constater que les résultats varient dans le temps (date) et dans l'espace (champ). Elles s'échelonnent de 4,18 à 5,48 %. Dans la majorité des cas, à l'exception du champ 2, cette valeur augmente lorsque les données ont été mesurées le 3 juin 2008. L'erreur moyenne standardisée nous permet d'établir les mêmes constats selon des proportions différentes et plus élevées (5,22 à 6,18 %).

À titre de covariable, la CEA (0-30 cm) ne permet pas de réduire l'erreur quadratique de prédiction (RMS) lorsqu'on la jumelle avec les données d'humidité du sol recueillies le 27 mai, à l'exception du champ 1. Toutefois, lorsque cette même variable est utilisée avec les données du 3 juin, on constate une réduction du RMS, sauf pour le champ 2. Par contre, l'interprétation de l'erreur moyenne standardisée est différente. Celle-ci est réduite pour la majorité des cas, à l'exception du champ 3, le 27 mai 2008. D'ailleurs la CEA, permet d'améliorer la précision des cartes numériques de l'humidité des sols de 1,28 à 4,22 % (gain) pour les champs 1 et 2 ainsi que pour l'ensemble des trois parcelles.

Pour le champ 3, on note une détérioration ou une amélioration négligeable et ce, dépendamment de la période de mesure.

La valeur de  $\rho$ -PIR extraite de l'image IKONOS rehaussée avec un filtre moyenne 5 x 5 est la covariable qui a permis, dans tous les cas (dates et champs) de réduire l'erreur de prédiction de la teneur en humidité du sol et d'obtenir des gains. Ces gains sont comparables (2,17 à 2,57) pour les champs 1 et 2 pris individuellement ainsi que pour l'ensemble des 3 champs à l'étude le 27 mai 2008, alors qu'ils varient de façon plus importante (0,71 à 3,07) le 3 juin 2008. Pour le champ 3, on note une faible amélioration (0,89 et 1,19), reflet des résultats obtenus lors de l'analyse de corrélation. Cette réduction permet d'établir que l'utilisation de  $\rho$ -PIR permet d'améliorer la carte numérique d'humidité de surface des sols.

Telle que prévue lors de l'analyse des coefficients de corrélation, l'utilisation du  $\sigma^0$  du signal radar HH ne permet pas d'améliorer la précision de la carte numérique d'humidité de surface du sol. En effet, la majorité des RMS ont tendance à augmenter lors du cokrigeage alors que l'inverse aurait dû être mesuré s'il y avait eu amélioration du modèle. Seule la précision des cartes numériques du champ 3 est améliorée de façon négligeable, diminution de l'erreur de 0,47 pour le 27 mai et de 0,75 pour le 3 juin 2008. D'ailleurs, on enregistre un faible gain soit, 0,40 et 0,21 pour ces mêmes dates. Un gain négligeable est aussi obtenu pour le champ 1, soit 0,52, bien que le RMS résultant du cokrigeage soit supérieur à celui obtenu lors du krigeage. Les résultats des interpolations avec cette covariable sont décevants mais d'autres études pourraient être menées avec les images radar acquises par le satellite Radarsat-2 offrant différentes polarisations et résolutions spatiales ainsi que des données polarimétriques qui devraient théoriquement donner de meilleures corrélations avec l'humidité de surface des sols.

En résumé, l'hypothèse 3 est en partie vérifiée, selon la variable auxiliaire utilisée et le champ ou groupe de champs considérés. Ainsi, l'utilisation des données de CEA à titre de covariable améliore la précision de la carte numérique de l'humidité de surface des sols mais l'efficacité dépend des champs étudiés : champ 1 > champ 2 > 3 parcelles > champ 3. C'est le cas pour les deux dates à l'étude. L'emploi de  $\rho$ -PIR (filtre 5 x 5) a aussi permis d'obtenir de bons résultats, mais ceux-ci diffèrent selon la date de mesure. Ainsi, pour le 27 mai, la carte d'humidité est améliorée selon l'ordre suivant : champ 2 > champ 1 > 3 parcelles > champ 3 alors que pour le 3 juin, elle suit l'ordre : champ 1 > 3 parcelles > champ 2 > champ 3. Si l'on classe la contribution de la covariable pour améliorer le modèle d'interpolation, la CEA apporte une amélioration moyenne de 1,5 % (gain) alors que  $\rho$ -PIR permet d'enregistrer un gain moyen de 1,3 %, indépendamment des dates et des champs. Si l'on

considère les deux dates d'acquisition d'humidité du sol et les deux mêmes covariables (CEA et  $\rho$ -PIR), on constate une amélioration moyenne du gain de 1,73 % et 1,38 % respectivement pour le 27 mai et de 1,35 % et de 1,20 % respectivement pour le 3 juin 2008. Quant à l'utilisation du  $\sigma^0$  du signal radar HH, il améliore de façon négligeable la précision de la carte numérique d'humidité de surface des sols. Ces résultats sont peut-être attribuables à la résolution spatiale de l'image radar (6,25 m) qui était plus grande. En effet, la densité d'échantillonnage de cette covariable était moindre (4023 points) que pour la CEA (10 464 points) et la  $\rho$ -PIR (9 845 points). Mais elle est en grande partie attribuable à la faible relation observée entre cette variable et la teneur en humidité du sol. Il faudrait sans doute isoler l'effet de la rugosité de surface du signal radar HH pour mieux exploiter la capacité de ce capteur à prédire la teneur en humidité des sols. Les images RADARSAT-2 permettraient sans doute d'atteindre cet objectif à l'aide de la multipolarisation ou de la polarimétrie.

#### **4.5 Cartes numériques de l'humidité de surface des sols**

Les cartes numériques de la teneur en humidité de surface des sols produites par krigeage ordinaire ou cokrigeage sont présentées à la Figure 19. La carte de gauche a été réalisée par krigeage ordinaire à partir des 164 données d'humidité mesurée avec l'HydroSense CS620. Lorsqu'on compare cette représentation cartographique à la carte pédologique détaillée et plus particulièrement à la carte de drainage (Figure 13 et Figure 14), on constate que la carte numérique d'humidité de surface des sols fait bien ressortir les zones plus humides associées aux sols mal drainés et les zones moins humides associées aux sols présentant un meilleur drainage. L'ajout de la CEA comme covariable dans la méthode d'interpolation permet d'obtenir une carte plus détaillée (Figure 19, au centre). Toutefois, la méthode de prise de mesures (discontinues) semble créer un patron de distribution spatiale influencée par le cheminement de l'instrument de mesure lors de l'acquisition, C'est particulièrement évident si l'on compare cette carte avec celle de droite (Figure 19) produite en utilisant  $\rho$ -PIR comme covariable. Cette carte est également plus détaillée que celle créée par krigeage ordinaire mais ne semble pas avoir été influencée par la prise de mesures non continues.

Sur le plan pratique, l'image IKONOS présente également beaucoup d'avantages sur la CEA, car elle permet de couvrir plusieurs champs (coût amorti par plusieurs producteurs) lors d'une même acquisition. Ceci n'est pas le cas pour une prospection électrique des sols qui doit être répétée sur chacune des parcelles et le coût absorbé par chaque producteur. De plus, la fenêtre d'acquisition de la CEA est beaucoup plus restreinte car cette mesure doit être prise en absence ou presque de culture pour ne pas retarder leur croissance ou infliger des pertes à la récolte. Les fenêtres

d'acquisition sont souvent restreintes au printemps avant ou juste après le semis et à l'automne après la récolte et avant le labour. Dans une rotation avec des plantes fourragères, la mesure peut être prise après chaque coupe. Le sol ne doit pas être gelé ni trop travaillé car cela affecte le contact de l'instrument avec le sol et peut entraîner des sources de variation supplémentaires. Considérant ces restrictions, l'imagerie satellitaire offre une fenêtre plus large d'acquisition. Évidemment, la présence de cultures influence le signal perçu, mais cela n'est pas nécessairement négatif, car le taux d'émergence des plantes peut être un bon indicateur de la teneur en humidité du sol et de sa vitesse de réchauffement au printemps. Cet outil semble donc plus convivial comme support à la cartographie numérique de l'humidité de surface des sols. Toutefois, les images optiques sont affectées par la présence de nuages ou de brumes ce qui peut réduire grandement leur utilité et disponibilité lors de certaines saisons pluvieuses. Les images radar sont moins influencées par les conditions météorologiques. L'utilité des images RADARSAT-2 comme sources de variables auxiliaires à la cartographie numérique de l'humidité de surface des sols à l'échelle de la parcelle devrait faire l'objet de recherches complémentaires à cette présente étude. En effet, les données de RADARSAT-2 peuvent avoir une résolution spatiale plus fine (3 m) et offrir plus d'information par le biais de la multipolarisation (HH, HV, VH, VV) (Brisco *et al.*, 2008; Niang, Nolin & Bernier, 2010) et des décompositions polarimétriques (Cloude & Pottier, 1996; Ulaby, Dubois & van Zyl, 1996; Touzi, Deschamps & Rother, 2007). RADARSAT-2 permettrait entre autre d'éliminer l'effet de la rugosité de surface, qui peut parfois être forte en milieu agricole, grâce à l'utilisation d'au moins deux polarisations ou des paramètres polarimétriques (Denault *et al.*, [s.d.]).

Tableau 20 : Comparaison des statistiques de validation-croisée pour chacun des champs pris individuellement ou ensemble en fonction de chacune des variables auxiliaires utilisées pour le cokrigage.

	3 champs				Champ 1				Champ 2				Champ 3				
	RMS (%)	ASE (%)	ASE* (%)	Gain (%)	RMS (%)	ASE (%)	ASE* (%)	Gain (%)	RMS (%)	ASE (%)	ASE* (%)	Gain (%)	RMS (%)	ASE (%)	ASE* (%)	Gain (%)	
27 mai 2008	Humidité de surface du sol	4,70	5,32	17,01		4,80	5,69	19,22		5,10	6,34	20,61		5,09	5,41	16,51	
	CEA (0-30 cm)	5,59	4,92	15,73	1,28	4,54	4,44	14,99	4,22	5,48	5,67	18,43	2,18	5,40	5,66	17,28	-0,76
	$\rho$ -PIR	4,16	4,64	14,83	2,17	4,02	4,93	16,65	2,57	4,68	5,53	17,98	2,63	4,45	5,12	15,63	0,89
	$\sigma^{\circ}$ HH	5,09	5,73	18,32	-1,31	5,17	5,73	19,35	-0,14	5,72	5,99	19,47	1,14	4,62	5,28	16,12	0,40
3 juin 2008	Humidité de surface du sol	4,88	5,34	16,52		5,17	5,79	18,90		4,18	5,22	16,10		5,48	5,71	17,04	
	CEA (0-30 cm)	4,80	4,84	14,97	1,55	4,74	4,53	14,79	4,11	4,64	4,60	14,18	1,91	5,32	5,53	16,50	0,54
	$\rho$ -PIR	4,24	4,61	14,26	2,26	4,36	4,85	15,83	3,07	3,75	4,99	15,39	0,71	4,63	5,31	15,85	1,19
	$\sigma^{\circ}$ HH	5,09	5,64	17,45	-0,93	5,99	5,63	18,38	0,52	4,45	5,23	16,13	-0,03	4,73	5,64	16,83	0,21

RMS : Erreur quadratique de prédiction (root-mean-square error).

ASE : Erreur moyenne standardisée (average standard error).

ASE\* : ASE / moyenne d'humidité obtenue pour la date et le champ visée \* 100.

Gain : Différence entre les valeurs de ASE\* cokrigées et celui du krigeage ordinaire (HydroSense CS620).

CEA (0-30 cm) : Conductivité électrique apparente de surface (0-30 cm) acquise avec le VERIS 3100 le 12 mai 2008.

$\rho$ -PIR : Réflectance du proche-infrarouge ( $\rho$ -PIR) d'une image IKONOS acquise le 13 mai 2008.

$\sigma^{\circ}$  HH : Coefficient de rétrodiffusion ( $\sigma^{\circ}$ ) du signal radar HH de l'image Radarsat-1 acquise le 15 mai 2008.

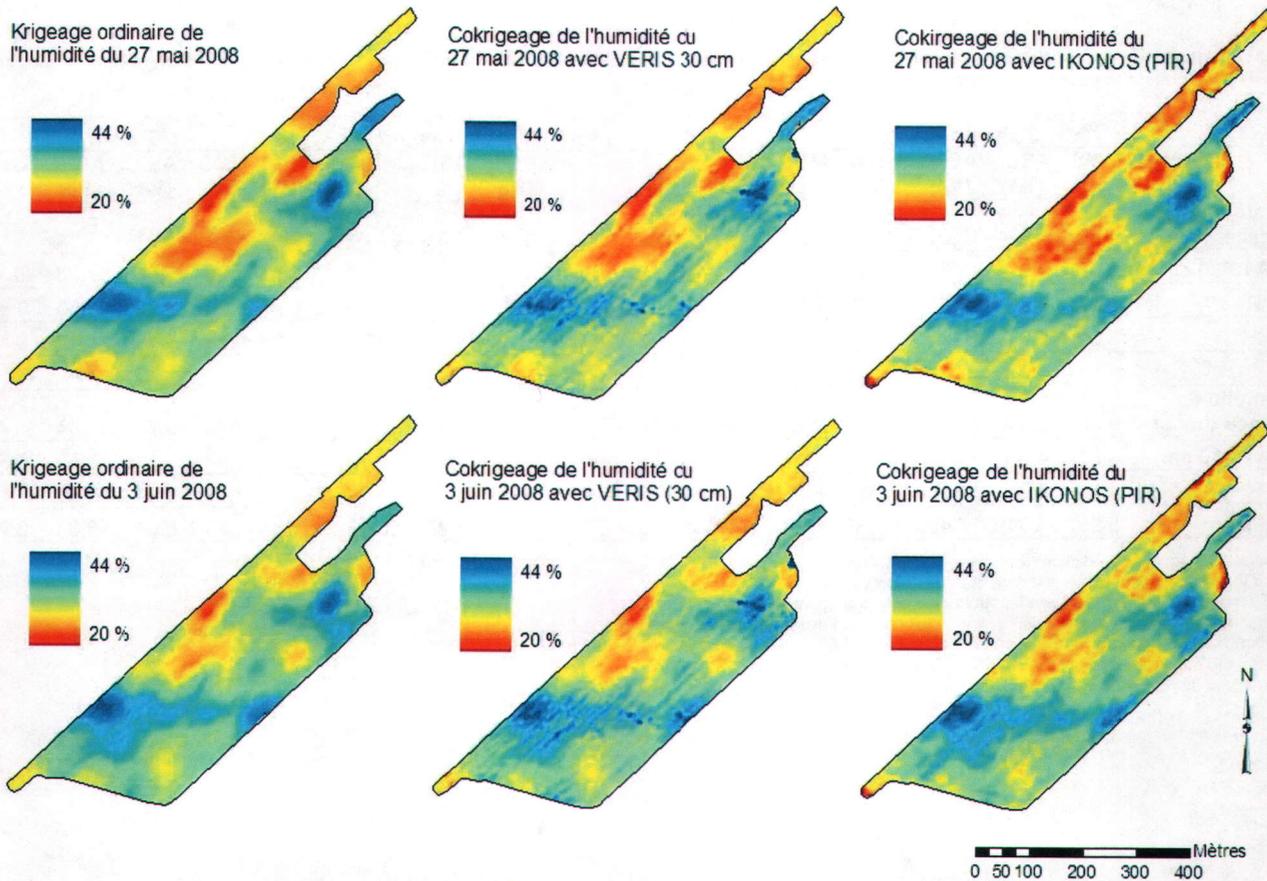


Figure 19 : Comparaison des cartes numériques d'humidité de surface des sols du 27 mai 2008 et du 3 juin 2008 obtenus par krigeage et cokrigeage à partir des données de CEA (0-30 cm ; VÉRIS 3100) et de réflectance de la bande du proche-infrarouge (IKONOS).

## Chapitre 5 : Conclusions

L'objectif principal de ce projet de recherche était de proposer une méthodologie de cartographie numérique de la teneur en humidité de surface des sols à l'échelle de la parcelle à l'aide du suivi spatio-temporel de l'humidité du sol effectué à partir des données obtenues de nouveaux outils technologiques tel que l'HydroSense CS620 de Campbell, le VERIS 3100, les images optiques (IKONOS) et radar (RADARSAT-1). Pour répondre à cet objectif, trois hypothèses ont été établies et validées à partir de différents traitements statistiques et géostatistiques.

L'hypothèse 1 sous-entendait que l'humidité de surface des sols, mesurée avec l'HydroSense CS620, selon une grille d'échantillonnage systématique non alignée de 30 m x 30 m, présentaient une structure spatiale à l'échelle de la parcelle agricole. Cette hypothèse a été confirmée par l'analyse variographique des données d'humidité démontrant la dépendance spatiale des échantillons mesurés pour les champs 1 et 2 ainsi que les trois parcelles regroupées. De plus, les périodes de mesure présentant des conditions climatiques similaires a permis de bien exprimer cette structure spatiale. En effet, les journées du 27 mai et du 3 juin 2008, marquées par de faibles quantités de pluie (5 mm) la journée précédant la campagne de prospection, ont permis une meilleure expression de la teneur en humidité du sol.

L'hypothèse 2 stipulait que les valeurs de CEA des sols, la réflectance spectrale ( $\rho$ ) extraite d'une image IKONOS et les coefficients de rétrodiffusion ( $\sigma^0$ ) radar extraits d'une image RADARSAT-1 acquise en mode fin présentent une relation avec les teneurs en humidité de surface des sols. Cette hypothèse ne s'est pas avérée concluante pour toutes les variables auxiliaires. En effet, les  $\sigma^0$  de polarisation HH acquis par le satellite RADARSAT-1 étaient faiblement corrélés à l'humidité de surface des sols. Toutefois, la CEA mesurée en surface (0-30 cm) et moindrement celle mesurée en profondeur (0-100 cm) avec le VERIS 3100 ainsi que  $\rho$ -PIR, la valeur de réflectance associée à la bande spectrale du proche-infrarouge extraite d'une image IKONOS démontraient de bonne corrélation avec l'humidité de surface du sol. Les coefficients de corrélation se sont révélés plus élevés dans les champs 1 et 2 ainsi que dans l'ensemble des 3 parcelles alors qu'ils étaient plus faibles dans le champ 3. La variabilité temporelle, liée à l'année et à la date de mesure de l'humidité, a aussi influencé les valeurs des coefficients de corrélation mesurées, ceux-ci étant plus élevés les dates du 27 mai et du 3 juin 2008.

L'hypothèse 3 affirmait que l'utilisation de la CEA des sols, de  $\rho$ -PIR et du  $\sigma^0$  du signal radar HH, comme variables auxiliaires à la cartographie engendrait une réduction de l'erreur d'interpolation spatiale par cokrigage. Cette hypothèse a été confirmée pour le cokrigage avec la CEA de surface

ainsi que la valeur de  $\rho$ -PIR pour les dates de mesure sélectionnées pour l'étude à partir de l'analyse de corrélation et la variographie, soit le 27 mai et le 3 juin 2008. Dans tous les cas, le RMS obtenu à partir du cokrigage avec les données du satellite IKONOS a été réduit par rapport au RMS résultant du krigeage ordinaire de l'humidité de surface des sols. De plus, en tenant compte du ASE, on constate que l'utilisation de la variable auxiliaire tirée de l'image IKONOS permet d'obtenir un gain en précision de 0,71 à 3,07 % selon les cas analysés. Dans le cas des données du VERIS, la majorité des champs ont enregistré un gain de précision avec l'utilisation de cette covariable allant de 0,54 à 4,74 % sauf en ce qui concerne le champ 3 pour la date du 27 mai 2008 où on a plutôt observé une perte de précision de -0,76 %. Dans le cas de la variable auxiliaire extraite du satellite RADARSAT-1, pour les deux dates choisies, seul le champ 3 a montré une réduction de RMS et enregistré un faible gain de précision (< 1 %).

En somme, deux des trois hypothèses de départ ont été vérifiées et confirmées avec quelques réserves liées aux conditions de sols des parcelles étudiées ainsi qu'aux conditions météorologiques entourant l'acquisition des données d'humidité de surface des sols. Ainsi, les sols des parcelles doivent avoir conservé leurs propriétés intrinsèques. Les parcelles ayant subi de fortes pédoperturbations, comme le champ 3 de la présente étude, affichent plus difficilement des structures spatiales pour la teneur en humidité de surface des sols, du moins avec le dispositif d'échantillonnage intensif utilisé (30 x 30 m). Un dispositif plus serré aurait peut-être permis de révéler une structure spatiale mais cela aurait augmenté le coût de cette approche. L'utilisation de certaines variables auxiliaires comme la CEA des sols mesurée avec le VERIS 3100 et la valeur de  $\rho$ -PIR extraite d'une image IKONOS a permis d'améliorer la précision et la fiabilité des cartes d'humidité de surface des sols. Une étude devrait être menée pour établir une stratégie optimale en termes de densité d'échantillonnage tant pour la variable principale (humidité du sol) que pour la variable auxiliaire pour atteindre la précision recherchée au moindre coût. La structure spatiale de l'humidité de surface des sols est difficilement mise en évidence lorsque les sols approchent l'état de saturation, soit en début de saison de croissance et après de fortes pluies. Il conviendrait d'attendre quelques jours après les précipitations pour laisser aux sols le temps de se ressuyer.

Pour améliorer la méthodologie proposée ici, il faudrait poursuivre l'étude amorcée. Ainsi, il faudrait mesurer l'impact de la température du sol sur la prédiction de l'humidité du sol avec la sonde HydroSense CS620 ainsi que sur les variables auxiliaires étudiées. Il serait intéressant d'étudier l'utilité de l'acquisition d'images satellites multitemporelles, soit une au début de l'étude, une au milieu et une autre à la fin et ce, autant pour l'optique que pour le radar. De plus, avec l'arrivée de RADARSAT-2, l'utilisateur a accès à de nouvelles variables auxiliaires, à résolution spatiale plus fine

(3 m) et plus détaillées par le biais de la multipolarisation (HH, HV, VH, VV) et des décompositions polarimétriques. Ces nouvelles informations devraient faire l'objet d'une étude complémentaire dans le cadre méthodologique de la présente recherche. Ainsi, RADARSAT-2 permettrait entre autre d'éliminer l'effet de la rugosité de surface, qui peut parfois être forte en milieu agricole, grâce à l'utilisation d'au moins deux polarisations ou des paramètres polarimétriques

L'importance de la connaissance détaillée de la topographie et de la microtopographie à l'aide des modèles numériques d'élévation (MNE) et des nombreuses techniques pour les réaliser (LIDAR, DGPS RTK, interférométrie radar, etc.) sur la prédiction et la cartographie numérique de l'humidité de surface des sols n'a pas été intégrée dans ce mémoire. La prise en compte de cette information conjointement aux variables auxiliaires étudiées devrait également faire l'objet d'une recherche plus poussée. Dans la même veine, les teneurs en sable, limon ou argile ainsi qu'en matière organique devraient être intégrées au modèle d'interpolation. À cette fin, une approche avec les géostatistiques multivariées devrait être testée.

Plus l'information sur l'humidité du sol sera précise, meilleure sera la gestion de l'eau en agriculture ainsi que pour l'ensemble d'un bassin versant. L'eau est un élément essentiel à la vie et sa conservation de même que son utilisation rationnelle passent par une connaissance précise de sa dynamique dans l'écosystème agricole.



## BIBLIOGRAPHIE

- Adamchuk VI, Lund ED, Reed TM & Ferguson RB (2007) Evaluation of on-the-go technology for soil pH mapping. *J. Prec. Agr.* 8: 139-149.
- Arnaud M & Emery X (2000) L'analyse variographique. Pages 121-164. Dans M. Arnaud et X. Emery, ed. Estimation et interpolation spatiale méthodes déterministes et méthodes géostatistiques. Hermes Science Publications.
- Baghdadi N, Cerdan O, Zribi M, Auzet V, Darboux F, El Hajj M & Kheir RB (2008) Operational performance of current synthetic aperture radar sensors in mapping soil surface characteristics in agricultural environments: Application to hydrological and erosion modelling. *Hydrological Processes* 22(1): 9-20.
- Bardossy A & Lehmann W (1998) Spatial distribution of soil moisture in a small catchment. Part 1: Geostatistical analysis. *Journal of Hydrology* 206: 1-15.
- Bonn F & Escadafal R (1996) La télédétection appliquée aux sols. Pages 92-136 dans Bonn F. PUQ/AUPELF, Québec. Précis de télédétection. Volume 2. Applications thématiques. Éd. Presses de l'Université du Québec.
- Bonn F & Rochon G (1992) Les plates-formes utilisées en télédétection. Pages 235-295 dans F. Bonn, ed. Précis de télédétection. Volume 1. Principes et méthodes. Presse de l'Université du Québec/AUPELF. Québec.
- Bossé C, Martin A, Lamontagne L, Perron I & Nolin MC (2010) Cartes très détaillées (NIP 1) des sols des parcelles expérimentales du microbassin d'intervention du bassin versant du Bras d'Henri. Laboratoires de pédologie et d'agriculture de précision. Agriculture et Agroalimentaire Canada. Québec. Carte Annexe 7 dans Lamontagne L, Martin A & Nolin MC, éd. Étude pédologique du bassin versant du Bras d'Henri (Québec). Agriculture et Agroalimentaire Canada. Québec (Québec).
- Brisco B, Touzi R, van der Sanden JJ, Charbonneau F, Pultz TJ & D'Iorio M (2008) Water resource applications with RADARSAT-2 - a preview, *International Journal of Digital Earth* 1(1) : 130-147
- Cashion J, Lakshmi V, Bosch D. & Jackson TJ (2005) Microwave remote sensing of soil moisture: Evaluation of the TRMM microwave imager (TMI) satellite for the Little River Watershed Tifton, Georgia. *Journal of Hydrology* 307: 242-253.
- Cloude SR & Pottier E (1996) A Review of Target Decomposition Theorems in Radar Polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 34 (2) : 498-518.
- Denault J-T, van Bochove E, Khaldoune J, Bernier M, Khalil B (soumis) Frozen soil mapping: a comparison between RADARSAT-1 and RADARSAT-2 capabilities, *Canadian Journal of Remote Sensing*. No special RADARSAT-2.
- Dobson MC, Ulaby FT, Le Toan T, Beaudoin A, Kasischke ES & Christensen N (1992) Dependence of Radar Backscatter on Coniferous Forest Biomass. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30: 412-415.

- Egman ET (1991) Applications of Microwave Remote Sensing of Soil Moisture for Water Resources and Agriculture. *Remote Sensing Environment* 35: 213-226
- Eilers RG (1991) Guide des méthodes de recherche sur l'eau du sol. Comité d'expert de la prospection pédologique. Direction générale de la recherche Agriculture Canada. 30 p.
- Farahani HJ & Buchleiter GW (2004) Temporal stability of soil electrical conductivity in irrigated sandy fields in Colorado. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 47: 79-90.
- Fausey NR (2002) Drainage, Aeration, and Trafficability. Pages 361-363. Dans Rattan Lal. ed. *Encyclopedia of Soil Science*. Marcel Dekker, New York
- Friedman SP (2005) Soil properties influencing apparent electrical conductivity: A review. *Computers and Electronics in Agriculture* 46: 45-70.
- Goulet M (2003) Concepts du sol. Pages 9-12. Dans *Science du sol (Note de cours SLS-12503)*. Département des sols et de génie agroalimentaire. Université Laval
- Gupta SC & Wang D (2002) Water Retention in Soil. Pages 1393-1398. Dans Rattan Lal. ed. *Encyclopedia of Soil Science*. Marcel Dekker, New York
- Heuvelink GBM & Webster R (2001) Modelling soil variation: past, present, and future. *Geoderma* 100: 269-301.
- Isaaks EH & Srivastava RM (1989) Bivariate Description. Pages 24-39. Dans *An introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York.
- Jackson TJ (2002) Soil Water Content. Pages 1240-1244. Dans Rattan Lal. ed. *Encyclopedia of Soil Science*. Marcel Dekker, New York
- Kravchenko AN, Bollero GA, Omonode RA & Bullock DG (2002) Quantitative mapping of soil drainage classes using topographical data and soil electrical conductivity. *Soil Science Society of America Journal* 66: 235-243.
- Lafond R (1992) La pédogenèse et la classification canadienne des sols. Pages 61-81. Dans R. Lafond ed. *Pédologie Forestière*. Direction générale de l'enseignement collégial du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Science. Québec.
- Lamontagne, L. et Nolin, M.C. 1997. *Cadre pédologique de référence pour la corrélation des sols*. Bulletin d'extension numéro 7. Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures. 70 p.
- McBratney AB, Mendonça Santos ML & Minasny B (2003) On digital soil mapping. *Geoderma* 117: 3-52.
- Moran MS, Peters-Lidard CD, Watts JM & McElroy S (2004) Estimating soil moisture at the watershed scale with satellite-based radar and land surface models. *Can. J. Remote Sensing*, 30 (5) : 805-826
- Niang MA, Nolin MC & Bernier M (2010) Potential of C-Band Multi-polarized and Polarimetric SAR Data for Soil Drainage Classification and Mapping. *Geoscience and Remote Sensing*. IN-TECH Publisher. 14 p.

- Nolin MC, Vallée L, Cambouris A & Karam A (2000) Variabilité et structure d'organisation spatiale des sols. Pages 143-169 Dans CRAAQ. 1<sup>er</sup> Colloque sur la géomatique agricole et l'agriculture de précision. 23-24 juillet 2000. Ste-Hyacinthe (Québec, Canada).
- Nolin MC & Caillier MJ (1992) La variabilité des sols. II – Qualification et amplitude. *Agrosol*, 5 (1) : 21-32.
- Nolin MC & Lamontagne L (1990) Étude pédologique du comté de Richelieu (Québec). Volume 2 Description et classification des séries de sol. Équipe pédologique du Québec, agriculture Canada, Direction générale de la recherche. Contribution no. 87-74 du Centre de recherche sur les terres. 116 p.
- Nolin MC, Cambouris AN & Simard RR (1997) La variabilité des sols : son origine et sa gestion. Pages 35-77 dans Éditeur (ed.). Actes du Colloque : Nouvelle technologie en agriculture, Campus du fort St-Jean.
- NRCS (1998) Soil Quality Resource Concerns: Available Water Capacity. National Soil Survey Center. 2 p.
- NRCS (1996) Soil Quality Resource Concerns: Soil Erosion. National Soil Survey Center. 2 p.
- Nugteren WA, Malo DD, Schumacher TE, Schumacher JA, Carlson CG, Clay DE, Clay SA, Dalsted KJ & Ellsbury MM (2000) Hillslope chronosequence of electromagnetic induction readings as influenced by selected soil properties. Proc. 5<sup>th</sup> International Conference on Precision Agriculture: 8 p.
- Pater S & McReynolds K (2005) Watershed Soils. Master Watershed Steward. 16 p.
- Perron I (2002) Modèle numérique de terrain (MNT) Mémoire de maîtrise en Sciences de l'eau (Université du Québec. Institut national de recherche scientifique, Québec) 110 p.
- Quenum M (2009) Cartographie à l'échelle de la parcelle agricole de variables indicatrices de la capacité des sols à fixer le phosphore à l'aide de la télédétection et des nouvelles technologies. Thèse de doctorat en Sciences de l'eau (Université du Québec. Institut national de recherche scientifique, Québec). 208 p.
- Romshoo SA (2004) Geostatistical analysis of soil moisture measurements and remotely sensed data at different spatial scales *Environmental Geology* 45(3): 339-349
- Savoie V (2009) Le drainage de surface. Formation pour OAQ. MAPAQ. 37 p.
- Shukla MK & Lal R (2002) Water Infiltration in Soils. Pages 1-3. Dans Rattan Lal. ed. *Encyclopedia of Soil Science*. Marcel Dekker, New York
- Sullivan DG, Shaw JN & Rickman D (2005) IKONOS imagery to estimate surface soil property variability in two Alabama physiographies. *Soil Science Society of America Journal* 69: 1789-1798.
- Tarr AB, Moore KJ, Burras CL, Bullock DG & Dixon PM (2005) Improving Map Accuracy of Soil Variables Using Soil Electrical Conductivity as a Covariate. *J. Prec. Agr.* 6: 255–270.
- Thompson JA, Bell JC & Butler CA (2001) Digital elevation model resolution: Effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling. *Geoderma* 100: 67-89.
- Topp C (1993) Soil water content. Pages 541-557. Dans M.R. Carter, ed. *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Can. Soc. Soil Sci. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.

- Touzi R, Deschamps A & Rother G (2007) Wetland characterization using polarimetric RADARSAT-2 capability. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 33 : 556–567.
- Ulaby FT, Dubois PC & van Zyl J (1996) Radar mapping of surface soil moisture. *Journal of hydrology*, Vol. 184, pp. 57-84
- Whelan BM & McBratney AB (2000) The “null hypothesis” of precision agriculture management. *Precision Agriculture* 2: 265-279.
- Wilkinson L, Engleman L & Marcantonio R (2005) Correlations, Similarities and Distance Measures. Pages 123-155. Dans SYSTAT 11.0 ed. Volume I. Statistic. Point Richmond.

## DOCUMENTATIONS INTERNET

- Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) (2008) La carte de localisation de la rivière Bras d'Henri et du ruisseau Fourchette. [Document pdf sur les projets des bassins hydrographiques de Bras d'Henri et de la Fourchette] [http://www4.agr.gc.ca/ressources/prod/doc/env/greencover-verdir/pdf/bras\\_dhenri\\_f.pdf](http://www4.agr.gc.ca/ressources/prod/doc/env/greencover-verdir/pdf/bras_dhenri_f.pdf) Document consulté sur Internet le 16 février 2009 et vérifié le 6 juillet 2011.
- Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) (2001) *Évaluation des PGB à l'échelle des bassins hydrographiques (EPB)* [Document pdf sur les projets des bassins hydrographiques de Bras d'Henri et de la Fourchette] 2 p. [http://www.agr.gc.ca/env/greencover-verdir/pdf/BHQ\\_f.pdf](http://www.agr.gc.ca/env/greencover-verdir/pdf/BHQ_f.pdf) Document internet consulté le 15 juin 2007 et vérifié le 6 juillet 2011.
- Ball J (2001) *Soil and Water Relationships*. 1 p. [Document htm sur The Samuel Roberts Noble Foundation] <http://www.noble.org/Ag/Soils/SoilWaterRelationships/Index.htm> Document consulté sur Internet le 1 février 2010 et vérifié le 6 juillet 2011.
- Beauchamp J (2006) L'eau et le sol [Document htm édité par Jacques Beauchamp professeur à l'université de Picardie] <http://www.oleiculteur.com/L'eau%20et%20le%20sol.htm> Document consulté le 16 mars 2009 et vérifié le 6 juillet 2011.
- Brunelle A & Savoie V (2000) 2 p. *Diagnostic et correction de problème de drainage*, Clubs-Conseils en agroenvironnement. [Document pdf sur Agri-Réseau. 2005] <http://www.agrireseau.gc.ca/navigation.aspx?r=drainage&p=4>. Document consulté sur Internet le 27 janvier 2010 et vérifié le 6 juillet 2011.
- Brunelle A (2005) Comment lire un profil de sol? Colloque en agroenvironnement « Des outils d'intervention à notre échelle. ». [Document pdf sur Agri-Réseau. 2005] [www.agrireseau.gc.ca/.../documents/Brunelle\\_Andre.pdf](http://www.agrireseau.gc.ca/.../documents/Brunelle_Andre.pdf). Document consulté sur Internet le 27 janvier 2010.
- Campbell Scientific (2001) 26 p. *Instruction*. <http://www.campbellsci.com/cs620> [Document pdf sur Campbell Scientific]. Document consulté sur Internet le 3 février 2010.
- Centre canadien de télédétection (CCT) (2007) Notions fondamentales de télédétection. Ressources naturelles Canada. 266 p. [Document pdf sur Ressource Naturelle Canada]. [http://cct.rncan.gc.ca/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals\\_f.pdf](http://cct.rncan.gc.ca/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_f.pdf). Document Internet consulté le 11 février 2010.
- Day JH & McMenamin J (1982) 197 p. *Manuel de description des sols sur le terrain*. Comité d'experts sur la prospection pédologique. [Document pdf sur Agriculture et Agroalimentaire Canada. 2008] [http://res.agr.ca/siscan/publications/manuals/describing\\_soils.html](http://res.agr.ca/siscan/publications/manuals/describing_soils.html). Document consulté sur Internet le 27 janvier 2010.

- Doerge T, Kitchen NR & Lund ED (2004) Soil electrical conductivity mapping. SSMG-30 [http://www.ipni.net/ppiweb/ppibase.nsf/\\$webindex/article=BD1CF45C852569D700636EDAC9ADC4DE](http://www.ipni.net/ppiweb/ppibase.nsf/$webindex/article=BD1CF45C852569D700636EDAC9ADC4DE). [Document pdf sur International Plant Nutrition Institut. 2009]. Document consulté sur internet le 15 février 2010.
- Environnement Canada (s.d.) «Normales et moyennes climatiques au Canada 1971-2000, St Narcisse» [En ligne]. [http://climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climate\\_normals/index\\_f.html](http://climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climate_normals/index_f.html) Page internet consultée le 22 juin 2007
- Gratton Y (2002) Le krigeage : La méthode optimale d'interpolation spatiale. [Document pdf sur articles de l'Institut d'Analyse Géographique]. <http://www.iag.asso.fr> Document consulté sur internet le 12 février 2008.
- Grodecki J & Dial G (2001) IKONOS Geometric Accuracy. [Document pdf sur Satellite Imaging Corporation] <http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/IKONOSGeometricAccuracy-ISPRS202001.pdf> Document consulté sur Internet le 16 février 2009
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) (s.d.) *Profil de la région Chaudière-Appalaches* (région numéro 12). Climat [En ligne] <http://www.mapaq.gouv.qc.ca/Fr/Regions/chaudiereappalaches/Vraiprofil/> Page internet consulté le 23 juillet 2007
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) (s.d.) *Chaudière-Appalaches, Profil de la région* [En ligne]. <http://www.mapaq.gouv.qc.ca/Fr/Regions/chaudiereappalaches> (Page consultée le 23 juillet 2007)
- Slater B & Mancl K (2005) Soil and Site Evaluation for Onsite Wastewater Treatment. [Document pdf sur The Ohio State University] Bulletin 905. <http://ohioline.osu.edu/b905/pdf/b905.pdf> Document consulté sur Internet le 27 janvier 2010.
- Thecno-science.net. (s.d.) Orbite héliosynchrone [Document html consulté sur Thecno-science.net] <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=6580> Document consulté sur internet le 21 août 2010
- Veris Technologies (2008) Soil EC 3100. [Document html consulté sur Veris Technologie] <http://www.veristech.com/products/ecspecs.aspx> Document consulté sur Internet le 15 février 2010.