



Université d'Ottawa - University of Ottawa

**PERMISSION DE REPRODUIRE
ET DE DISTRIBUER LA THÈSE**

**PERMISSION TO REPRODUCE AND
DISTRIBUTE THE THESIS**

NOM DE L'AUTEUR / NAME OF AUTHOR:	CHEVRIER, Martin
ADRESSE POSTALE / MAILING ADDRESS:	71-B RUE SCOTT 208 St Joseph app. 1 HULL QC J8Y4G8 Hull (Qno) J8Y3K9
GRADE / DEGREE:	ANNÉE D'OBTENTION / YEAR GRANTED
M.Sc. (Géographie)	2003
TITRE DE LA THÈSE / TITLE OF THESIS: POTENTIEL DE LA TÉLÉDÉTECTION HYPERSPECTRALE POUR LA CARTOGRAPHIE DES RÉSIDUS DE CULTURES SUR LES TERRES AGRICOLES	

L'auteur permet, par la présente, la consultation et le prêt de cette thèse en conformité avec les règlements établis par le bibliothécaire en chef de l'Université d'Ottawa. L'auteur autorise aussi l'Université d'Ottawa, ses successeurs et cessionnaires, à reproduire cet exemplaire par photographie ou photocopie pour fins de prêt ou de vente au prix coûtant aux bibliothèques ou aux chercheurs qui en feront la demande.

The author hereby permits the consultation and the lending of this thesis pursuant to the regulations established by the Chief Librarian of the University of Ottawa. The author also authorizes the University of Ottawa, its successors and assignees, to make reproductions of this copy by photographic means or by photocopying and to lend or sell such reproductions at cost to libraries and to scholars requesting them.

Les droits de publication par tout autre moyen et pour vente au public demeureront la propriété de l'auteur de la thèse sous réserve des règlements de l'Université d'Ottawa en matière de publication de thèses.

The right to publish the thesis by other means and to sell it to the public is reserved to the author, subject to the regulations of the University of Ottawa governing the publication of theses.

N.B. LE MASCULIN COMPREND ÉGALEMENT LE FÉMININ

17-04-2003

DATE

Martin Chevrier

(AUTEUR)

SIGNATURE

(AUTHOR)



Université d'Ottawa • University of Ottawa



Université d'Ottawa - University of Ottawa

FACULTÉ DES ÉTUDES SUPÉRIEURES ET
POSTDOCTORALES

FACULTY OF GRADUATE AND
POSTDOCTORAL STUDIES

CHEVRIER, Martin

AUTEUR DE LA THÈSE - AUTHOR OF THESIS

M.Sc. (Géographie)

GRADE - DEGREE

Géographie

FACULTÉ, ÉCOLE, DÉPARTEMENT - FACULTY, SCHOOL, DEPARTMENT

TITRE DE LA THÈSE - TITLE OF THE THESIS

Potential de la télédétection hyperspectrale pour
la cartographie des résidus de cultures

Abdou Bannari

DIRECTEUR DE LA THÈSE - THESIS SUPERVISOR

EXAMINATEURS DE LA THÈSE - THESIS EXAMINERS

A. Desrochers

B. Lauriol

J.-M. De Koninck, Ph.D.

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES ÉTUDES
SUPÉRIEURES ET POSTDOCTORALES

SIGNATURE

Joyelle O'Leary

DEAN OF THE FACULTY OF GRADUATE
AND POSTDOCTORAL STUDIES

Université d'Ottawa
Faculté des Arts
Département de Géographie
Laboratoire de Télédétection et de Géomatique de l'Environnement

Potentiel de la télédétection hyperspectrale pour la cartographie des résidus de cultures

Présenté par:
Martin Chevrier

**Thèse de maîtrise présentée pour la FESP comme
exigence partielle pour l'obtention du grade M.Sc.**

Avril 2003
© Martin Chevrier



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-79333-8

Canada

Résumé

Les résidus de cultures laissés sur une terre agricole après la moisson sont une alternative adéquate pour, entre autres, minimiser les effets nocifs de l'érosion éolienne et hydrique, augmenter la quantité de nutriments dans le sol et réduire les émissions de CO₂ dans l'atmosphère. Dans le cadre de cette maîtrise, nous avons appliqué deux méthodes utilisées en télédétection, soit celle des indices des résidus de cultures et celle des réseaux de neurones. Une image hyperspectrale du capteur aéroporté Probe-1 acquise au-dessus d'une terre agricole située dans le sud-est de la Saskatchewan a été utilisée. Le but était de déterminer laquelle des deux méthodes est la plus efficace pour mieux cartographier et estimer le taux de recouvrement des résidus de cultures. Mentionnons qu'il s'agit de la première fois que des données hyperspectrales ont été utilisées à des fins de cartographie des résidus de cultures, ce qui constitue un avancement dans le domaine. Afin de compléter les données, une série de mesures de réflectances de différents types de résidus (maïs, blé, herbe, soja et tournesol) et de divers sols nus a été obtenue par le biais du spectroradiomètre GER3700.

Des neuf indices de résidus de cultures utilisés (BI, CAI, NDI-1, NDI-2, SACRI-1, SACRI-2, MSACRI-1, MSACRI-2 et CRIM) trois se sont avérés comme étant supérieurs pour estimer le taux de recouvrement des différents types de résidus en utilisant les mesures de réflectances au sol à l'aide du GER3700 ré-échantillonnées dans les bandes du capteur hyperspectral Probe-1. L'erreur standard moyenne pour le CRIM, le MSACRI-1 et le MSACRI-2 a été, respectivement, de 29,71 %, 33,58 % et 36,71 %. Les résultats de l'estimation et de la cartographie des différents indices de résidus de cultures dérivés de l'image hyperspectrale Probe-1 de la ferme expérimentale IHARF ont été plus représentatives avec l'indice MSACRI-1. Ce dernier s'est avéré comme étant plus adéquat que les autres indices pour l'estimation et la cartographie des résidus de cultures. En considérant les dix différents sites de validations, ce même indice a donné une erreur relative moyenne entre les taux réels et ceux estimés de 63,18 %. Quant à la méthode des réseaux de neurones, elle a donné de meilleurs résultats que le MSACRI-1. Par exemple, l'erreur relative moyenne entre les taux réels et ceux estimés a été de 26,58 % pour l'ensemble des sites étudiés. Ajoutons qu'une mise au points a permis d'affirmer que certains canaux du capteur Probe-1 sont plus performants pour bien distinguer les résidus de cultures des sols nus. Parmi ceux-ci nous retrouvons les canaux 21 (727,8nm à 743,8 nm), 25 (788,8 nm à 805 nm), 36 (935,15 nm à 950,85 nm), 42 (1026,15 nm à 1045,85 nm), 60 (1292,65 nm à 1308,15 nm), 70 (1460,45 nm à 1476,35 nm), 77 (1557,05 nm à 1572,15 nm), 84 (1648,5 nm à 1663,1 nm), 92 (1748,5 nm à 1762,5 nm), 98 (1987,4 nm à 2008,6nm), 101 (2044,05 nm à 2065,35 nm), 104 (2099,65 à 2119,75 nm), 110 (2206,95 nm à 2226,05 nm) et 115 (2294,05 nm à 2311,95 nm).

En comparant le potentiel d'estimation et la cartographie des deux méthodes utilisées, force est d'admettre que celle des réseaux de neurones est plus adéquate, précise et représentative de la vérité terrain que celle des indices des résidus de cultures. Par contre, le temps d'opération requis est plus petit pour la méthode des indices de résidus de cultures.

Abstract

Crop residues left on agricultural field after harvest is an effective alternative, among others, to minimize the harmful effects of wind and water erosion, to increase the quantity of nutrients in the soils and to reduce CO₂ emissions in the atmosphere. During this master's degree, two methods used in remote sensing were applied to the Probe-1 hyperspectral image of an agricultural field situated in the Southeast Saskatchewan, crop residue index and neural networks. The purpose was to determine which of the two methods was the most effective to accurately map and estimate crop residues. It is worth while mentioning that this the first time hyperspectral data were used to mapping ends of crop residue, which constitutes an advancement in the domain. To complete the dataset, several spectral reflectance measures were taken from different types of crop residues (corn, wheat, herb, soya and sunflower) and different types of bare soils, obtained by the spectroradiometer GER3700.

Nine crop residue indices were used (BI, CAI, NDI-1, NDI-2, SACRI-1, SACRI-2, MSACRI-1, MSACRI-2 and CRIM). Three of the nine indices better estimated crop residues by using spectral reflectance measures of GER3700 resample in Probe-1 sensor. The standard error of estimates for the CRIM, the MSACRI-1 and the MSACRI-2 were respectively 29,71 %, 33,58 % and 36,71 %. The various crop residue indices results derived from the Probe-1 hyperspectral image, demonstrated that the MSACRI-1 is more adequate than the other indices. While considering the ten different validation sites, this same index gave an average relative error between the real rates and those estimated of 63,18%. As for the method of the neural networks, she gave better results than the MSACRI-1. For example, the average relative error between the real rates and those estimated was of 26,58% for all study sites. Lets add that certain channels of Probe-1 sensor perform well to distinguish crop reidues from bare sol. Among these we find channels 21 (727,8 nm to 743,8nm), 25 (788,8 nm to 805 nm), 36 (935,15 nm to 950,85 nm), 42 (1026,15 nm to 1045,85 nm), 60 (1292,65 nm to 1308,15 nm), 70 (1460,45 nm to 1476,35 nm), 77 (1557,05 nm to 1572,15 nm), 84 (1648,5 nm to 1663,1 nm), 92 (1748,5 nm to 1762,5 nm), 98 (1987,4 nm to 2008,6 nm), 101 (2044,05 nm to 2065,35 nm), 104 (2099,65 to 2119,75 nm), 110 (2206,95 nm to 2226,05 nm) and 115 (2294,05 nm to 2311,95 nm).

By comparing these estimations and maps of both methods used, we must admit that the neural network method is more adequate, precise and representative than that of the crop residue indices. On the other hand, the required operation time is smaller for the crop residue indices.

Remerciements

Dans un premier temps, j'aimerais remercier mon directeur de thèse, Dr. Abdou Bannari, pour son aide ainsi et que pour son support financier de la contre partie de la bourse du CRSNG. Je ne peux passer sous silence l'implication du Centre canadien de télédétection pour son appui financier, pour ses matériaux ainsi que pour l'aide de certains employés, plus particulièrement celle de Jean-Claude Deguise, Dr. Heather McNairn et Dr. Karl Staenz. Il me fait également plaisir de remercier le CRSNG pour une bourse de recherche ainsi que pour une subvention accordée au professeur Dr. Abdou Bannari pour un financement en argent, pour un financement pour les conférences de Québec, Toronto et Valence. J'aimerais remercier la province de l'Ontario et du Québec pour la subvention Ontario- Québec. Cette subvention m'a permis de me déplacer à maintes reprises au CARTEL de l'Université de Sherbrooke. Par ailleurs, j'aimerais remercier la Faculté des Arts de l'Université d'Ottawa pour mon déplacement à Indian Head en Saskatchewan ainsi que l'Université d'Ottawa pour la bourse d'entrée. J'aimerais également profiter de l'occasion pour remercier deux étudiants gradués au niveau de la maîtrise de l'Université d'Ottawa du Département de géographie et celui des sciences de la terre, soient Khalid Omari ainsi que Nancy Lemay pour des services académiques. J'aimerais également prendre quelques instants pour remercier mes parents et ma soeur qui m'ont toujours appuyé et poussé dans mon cheminement et développement scolaire depuis ma tendre enfance. Finalement, j'aimerais dédier cette thèse à ma grand-mère qui malheureusement nous a quitté au cours de l'été 2002.

Table des matières

Résumé	i
Abstract	ii
Remerciements	iii
Table des matières	iv
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	xii
Liste des acronymes	xiii
Chapitre 1: Introduction	1
1.1 Objectifs de la recherche	6
1.2 Hypothèses de la recherche	7
1.3 Organisation de la thèse	8
Chapitre 2: Cartographie des résidus de cultures: revue de littérature	9
2.1 Introduction	9
2.2 Les méthodes classiques d'identification des résidus de cultures	9
2.2.1 La méthode d'estimation visuelle (<i>The Visual Estimate Method</i>)	10
2.2.2 La méthode de la ligne transecte (<i>The Line-Transect Method</i>)	10
2.2.3 La méthode de la roue à piques (<i>The Spiked-Wheel Method</i>)	11
2.2.4 La méthode du point intercepté (<i>The Point Intercept Method</i>)	12
2.2.5 La méthode du mètre (<i>The Meterstick Method</i>)	12
2.2.6 La méthode photographique (<i>The Photographic Method</i>)	13
2.2.7 Les limites des méthodes classiques d'identification des résidus de cultures	14
2.3 Les indices de résidus de cultures	14
2.3.1 L'indice de brillance (<i>Brightness Index: BI</i>)	15
2.3.2 L'indice d'absorption de la cellulose (<i>Cellulose Absorption Index: CAI</i>)	16
2.3.3 L'indice de différence normalisé (<i>Normalized Difference Index: NDI</i>)	17
2.3.4 L'indice des résidus de maïs sols ajustés (<i>Soil Adjusted Corn Residue Index: SACRI</i>)	17
2.3.5 L'indice modifié des résidus de maïs sols ajustés (<i>Modified Soil Adjusted Corn Residue Index: MSACRI</i>)	18
2.3.6 L'indice de résidus de culture multibande (<i>Crop residue Index Multiband: CRIM</i>)	19
2.4 Les réseaux de neurones	22
2.4.1 Définition et explication des réseaux de neurones	23
2.4.2 Les avantages et les limites des réseaux de neurones	26

2.5 Conclusions	28
Chapitre 3: Méthodologie	29
3.1 Introduction	29
3.2 Sites d'étude	29
3.3 Cueillette des données	32
3.3.1 Mesures spectroradiométriques sur le terrain	33
3.3.2 Acquisition des images aéroportées	37
3.4 Pré-traitements des images	38
3.5 Conclusions	40
Chapitre 4: Analyses des résultats et discussions	41
4.1 Introduction	41
4.2 Analyses des spectres mesurés au sol	41
4.3 Extraction des spectres de réflectances de l'image Probe-1	47
4.4 Mise au point des canaux les plus performants parmi les cent dix-huit de l'image Probe-1	54
4.4.1 Analyse de la première dérivée pour la sélection des canaux	55
4.4.2 Analyse de la séparabilité spectrale entre les résidus de cultures et les sols nus par le biais des mesures au sol	61
4.4.3 Analyse de la séparabilité spectrale entre les résidus de cultures et les sols nus par le biais des spectres obtenus via le capteur Probe-1	68
4.5 La méthode des indices de résidus de cultures pour la cartographie et l'estimation du taux de couverture	80
4.5.1 BI (<i>Brightness Index</i>)	80
4.5.2 CAI (<i>Cellulose Absorption Index</i>)	85
4.5.3 NDI (<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>)	89
4.5.4 SACRI (<i>Soil Adjusted Corn Residue Index</i>)	94
4.5.5 MSACRI (<i>Modified Soil Adjusted Corn Residue Index</i>)	99
4.5.6 CRIM (<i>Crop residue Index Multiband</i>)	104
4.5.7 Estimation du taux de couverture des résidus à l'aide des indices en considérant l'image hyperspectrale du capteur Probe-1	111
4.6 La méthode des réseaux de neurones pour la cartographie et l'estimation du taux de couverture des résidus de cultures	122
4.6.1 Estimation et cartographie du taux de couverture des résidus de cultures	125
4.6.2 Estimation et cartographie du taux de couverture de la végétation et des sols nus	132
Chapitre 5: Conclusions et recommandations	139
5.1 Conclusions	139

5.2 Recommandations	143
Références	145
Annexe 1	150
Spectres des résidus de maïs à différents taux de couverture et spectre du sol nu mesurés à l'aide du spectroradiomètre GER3700	151
Spectres des résidus d'herbe à différents taux de couverture et spectre du sol nu mesurés à l'aide du spectroradiomètre GER3700	151
Spectres des résidus de soja à différents taux de couverture et spectre du sol nu mesurés à l'aide du spectroradiomètre GER3700	152
Spectres des résidus de tournesol à différents taux de couverture et spectre du sol nu mesurés à l'aide du spectroradiomètre GER3700	152
Annexe 2	153
Tableau représentant la liste des canaux retenus pour l'analyse des indices de résidus de cultures et pour la classification par la méthode des réseaux de neurones	154
Annexe 3	155
Les formules des indices de résidus de cultures utilisées	156
Annexe 4	157
Paramètres utilisés par la méthode des réseaux de neurones	158
Annexe 5	159
Chevrier, M., Bannari, A., Deguise, J.-C., McNairn, H. and Staenz, K. Hyperspectral Narrow-wavebands for Discriminating Crop Residues from Bare Soil. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'2002), Toronto, Ontario, 24-28 June 2002. Proceedings on CD-Rom, paper I1A35-1053	160
Annexe 6	164
Chevrier, M., Bannari, A., Deguise, J.-C., McNairn, H. and Staenz, K. Potential of Hyperspectral Remote Sensing for Crop Residue Mapping. International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing, Valencia, Spain, 16-20 September 2002, p. 61-68	165

Liste des figures

Figure 1.1: Présence de résidus de blé laissés sur une terre agricole (Idian Head, Saskatchewan, 6 juillet 2000)	2
Figure 1.2: Présence de résidus de blé (Indian Head, Saskatchewan, 7 juillet 2000)	2
Figure 2.1: Conception de l'indice de résidus de cultures CRIM dans un plan bidimensionnel (Biard et Baret, 1997)	20
Figure 2.2: Schématisation d'un neurone (Caloz et Collet, 2001)	24
Figure 2.3: Schématisation d'un réseau de neurones à trois couches (Caloz et Collet, 2001) ..	26
Figure 3.1: Organigramme de la méthodologie de recherche	30
Figure 3.2: Régions d'étude: Indian Head, Saskatchewan; et Lennoxville, Québec	32
Figure 3.3: Photographies verticales de différents types de sols nus (différents taux d'humidité, de rugosité, de couleur et de brillance).	35
Figure 3.4: Photographies verticales des résidus de soja (A); d'herbe (B); de maïs (C); de tournesol (D) et de blé (E) à différents taux de couverture.	36
Figure 3.5: Photographie verticale classifiée avec le module IsoData de PCI afin de déterminer le taux réel de recouvrement des résidus (résidus = jaune; sol nu = vert; sol nu avec ombre = bleu).	37
Figure 4.1: Spectres de résidus de blé à différents taux de couverture et spectre du sol nu mesuré à l'aide du spectroradiomètre GER3700	43
Figure 4.2: Spectre des résidus de blé à 100 % extrait de l'image hyperspectrale Probe-1 montrant les différentes bandes d'absorption	43
Figure 4.3: Spectre du résidu de maïs à un taux de couverture de 100 % et spectre du sol nu mesurés à l'aide du spectroradiomètre GER-3700	44
Figure 4.4: Spectres des résidus d'herbe, blé, soja, tournesol et maïs à un taux de recouvrement de 100 % mesurés à l'aide du spectroradiomètre GER-3700	46
Figure 4.5: Image hyperspectrale du site d'étude, photographie de la parcelle ayant un taux de couverture de 100 % de résidus de blé et le spectre de cette parcelle extrait à partir de l'image	48

Figure 4.6: Image hyperspectrale du site d'étude, photographie d'une parcelle de sol nu et spectre extrait à partir de l'image	50
Figure 4.7: Spectres des résidus ayant un taux de recouvrement de 20, 40, 50, 90 et 100 % ainsi que spectre du sol nu extrait d'une image hyperspectrale du capteur Probe-1	52
Figure 4.8: Spectres des résidus à 100 % et du sol nu extraient de l'image Probe-1 ainsi que spectres des résidus à 100 % et du sol nu mesurés à l'aide du GER3700	53
Figure 4.9: Spectres de réflectances des résidus de blé à un taux de couverture de 100 % et du sol nu dans le proche infrarouge (700 nm à 1320 nm)	56
Figure 4.10: Première dérivée du spectre des résidus de blé à un taux de couverture de 100 % et du sol nu dans le proche infrarouge (700 nm à 1320 nm)	57
Figure 4.11: Spectres de réflectances des résidus de blé à un taux de couverte de 100 % et du sol nu dans le moyen infrarouge (1470 nm à 1770 nm)	58
Figure 4.12: Première dérivée du spectre des résidus de blé à un taux de couverture de 100 % et du sol nu dans le moyen infrarouge (1470 nm à 1770 nm)	58
Figure 4.13: Spectres de réflectances des résidus de blé à un taux de couverte de 100 % et du sol nu dans le moyen infrarouge (2000 nm à 2340 nm)	59
Figure 4.14: Première dérivée du spectre des résidus de blé à un taux de couverture de 100 % et du sol nu dans le moyen infrarouge (2000 nm à 2340 nm)	60
Figure 4.15: Réflectances des résidus de cultures à un taux de couverture de 100 % et des sols nus dans les bandes 21 versus 26 (A); et dans les bandes 36 versus 39 (B)	62
Figure 4.16: Réflectances des sols nus et des résidus de cultures dans les bandes 70 versus 115 à un taux de couverture de 100 % (A); 50 % (B) et 25 % (C)	63
Figure 4.17: Réflectances des sols nus et des résidus de cultures dans les bandes 36 versus 115 à un taux de couverture de 100 % (A); 50 % (B) et 25 % (C)	64
Figure 4.18: Réflectances des sols nus et des résidus de cultures dans les bandes 84 versus 115 à un taux de couverture de 100 % (A); 50 % (B) et 25 % (C)	65
Figure 4.19: Photographie démontrant une parcelle d'un territoire recouvert d'un sol nu et d'un sol recouvert à 100 % de résidus de blé	68

Figure 4.20: Scattogramme plot démontrant la distribution des pixels des résidus de cultures et des sols nus de la figure 4.18 des canaux 36 versus 115 (A), et des canaux 73 versus 83 (B)	69
Figure 4.21: Photographie démontrant une parcelle d'un territoire où le taux de recouvrement des résidus de cultures est d'environ 45 %	71
Figure 4.22: Scattogramme démontrant la distribution des pixels des résidus de cultures à un taux de couverture de 45 % et des sols nus de la figure 4.20 des canaux 36 versus 115 (A), et des canaux 73 versus 88 (B)	71
Figure 4.23: Scattogramme démontrant la distribution des pixels des résidus de cultures à un taux de couverture de 35 % et des sols nus des canaux 36 versus 115 (A), des canaux 37 versus 71 (B), des canaux 50 versus 73 (C) et des canaux 37 versus 50 (D) ..	73
Figure 4.24: Photographie démontrant une parcelle d'un territoire où le taux de recouvrement des résidus de cultures est d'environ 45 %	74
Figure 4.25: Scattogramme démontrant la distribution des pixels des résidus de cultures à un taux de couverture de 5 % et des sols nus de la figure 4.23 des canaux 36 versus 115 (A) et des canaux 71 versus 115 (B)	75
Figure 4.26: Indices de résidus de cultures BI de sols recouverts de différents taux de couvertures de résidus calculés à partir des mesures de réflectances au sol acquises à l'aide du GER3700 et ré-échantillonnées dans les bandes du capteur hyperspectral Probe-1: maïs (A), blé (B), herbe (C), soja (D) et tournesol (E).	82
Figure 4.27: Indices de résidus de cultures CAI de sols recouverts de différents taux de couvertures de résidus calculés à partir des mesures de réflectances au sol acquises à l'aide du GER3700 et ré-échantillonnées dans les bandes du capteur hyperspectral Probe-1: maïs (A), blé (B), herbe (C), soja (D) et tournesol (E).	86
Figure 4.28: Indices de résidus de cultures NDI de sols recouverts de différents taux de couvertures de résidus calculés à partir des mesures de réflectances au sol à l'aide du GER3700 et ré-échantillonnées dans les bandes du capteur hyperspectral Probe-1: maïs (A), blé (B), herbe (C), soja (D) et tournesol (E).	90
Figure 4.29: Droites des sols nus de l'indice SACRI (Probe-1 (27/104) = SACRI-1; Probe-1 (36/115) = SACRI-2)	94

Figure 4.30: Indices de résidus de cultures SACRI de sols recouverts de différents taux de couvertures de résidus calculés à partir des mesures de réflectances au sol acquises à l'aide du GER3700 et ré-échantillonnées dans les bandes du capteur hyperspectral Probe-1: maïs (A), blé (B), herbe (C), soja (D) et tournesol (E)	95
Figure 4.31: Droites des sols nus de l'indice MSACRI (Probe-1 (84/110) = SACRI-1; Probe-1 (36/115) = SACRI-2)	100
Figure 4.32: Indices de résidus de cultures MSACRI de sols recouverts de différents taux de couvertures de résidus calculés à partir des mesures de réflectances au sol acquises à l'aide du GER3700 et ré-échantillonnées dans les bandes du capteur hyperspectral Probe-1: maïs (A), blé (B), herbe (C), soja (D) et tournesol (E)	101
Figure 4.33: Droites des sols nus et des résidus de cultures (canaux 36 versus 115) utilisées pour le calcul de l'indice CRIM	105
Figure 4.34: Indices de résidus de cultures CRIM de sols recouverts de différents taux de couvertures de résidus calculés à partir des mesures de réflectances au sol acquises à l'aide du GER3700 et ré-échantillonnées dans les bandes du capteur hyperspectral Probe-1: maïs (A), blé (B), herbe (C), soja (D) et tournesol (E)	106
Figure 4.35: Composé coloré de l'image hyperspectrale du capteur Probe-1 de la ferme IHARF en Saskatchewan	112
Figure 4.36: Indices empiriques BI (A), CAI (B), NDI-1 (C) et NDI-2 (D) de la ferme IHARF extraits de l'image hyperspectrale du capteur Probe-1	114
Figure 4.37: Indices semi-empiriques SACRI-1 (A), SACRI-2 (B), MSACRI-1 (C) et MSACRI-2 (D) de la ferme IHARF extraits de l'image hyperspectrale du capteur Probe-1	117
Figure 4.38: Photographies des sites 1 à 5 classifiées avec le module IsoData de PCI pour déterminer les taux de recouvrement des résidus (jaune), de la végétation (vert) et des sols nus (rouge)	123
Figure 4.39: Photographies des sites 6 à 10 classifiées avec le module IsoData de PCI pour déterminer les taux de recouvrement des résidus (jaune), de la végétation (vert) et des sols nus (rouge)	124

Figure 4.40: Composé coloré de l'image hyperspectrale du capteur Probe-1 des sites 5, 6, 7 et 8 (A) ainsi que des site 9 et 10 (B)	125
Figure 4.41: Classification des résidus de cultures, de la végétation, des sols nus et de l'eau par les réseaux de neurones des sites 1, 2, 3 et 4	126
Figure 4.42: Classification des résidus de cultures, de la végétation, des sols nus et de l'eau par les réseaux de neurones des sites 5, 6, 7 et 8 (A) ainsi que des site 9 et 10 (B)	126
Figure 4.43: Indice semi-empirique des MSACRI-1 extrait de l'image hyperspectrale du capteur Probe-1 des sites 1, 2, 3 et 4	127
Figure 4.44: Indice semi-empirique des MSACRI-1 extrait de l'image hyperspectrale du capteur Probe-1 des sites 5, 6, 7 et 8 (A) ainsi que des sites 9 et 10 (B)	127
Figure 4.45: Taux réel des résidus de cultures et taux estimé par la méthode des réseaux de neurones et celle de l'indice semi-empirique MSACRI-1 des différents sites ..	129
Figure 4.46: Taux réel du couvert végétal et taux estimé par les réseaux de neurones	134
Figure 4.47: Taux réel des sols nus et taux estimé par les réseaux de neurones	135

Liste des tableaux

Tableau 3.1: Spécifications du capteur aéroporté hyperspectral Probe-1	38
Tableau 4.1: Tableau des coefficients de corrélation des différents canaux retenus lors de l'analyse de la première dérivée	67
Tableau 4.2: Tableau des coefficients de corrélation des différents canaux retenus lors de l'analyse de la séparabilité spectrale entre les résidus de cultures et les sols nus obtenus par le capteur Probe-1	76
Tableau 4.3: Matrice de la distance bhattacharrya des sites d'entraînements utilisés pour la classification de l'image hyperspectrale de la figure 4.35 (sites 1, 2, 3 et 4)	79
Tableau 4.4: Matrice de la distance bhattacharrya des sites d'entraînements utilisés pour la classification de l'image hyperspectrale de la figure 4.40a (sites 5, 6, 7 et 8)	79
Tableau 4.5: Matrice de la distance bhattacharrya des sites d'entraînements utilisés pour la classification de l'image hyperspectrale de la figure 4.40b (sites 9 et 10)	79
Tableau 4.6: Classification des indices de résidus selon l'erreur standard moyenne des différents résidus	110
Tableau 4.7: Indices de résidus de cultures les plus adéquats pour estimer le taux réel de recouvrement des résidus de maïs, blé, herbe, soja et tournesol	110
Tableau 4.8: Distribution des valeurs des indices regroupée en sept classes	112
Tableau 4.9: Estimation du taux de recouvrement des résidus de cultures pour les sites 1, 2, 3 et 4 obtenue par les indices de résidus de cultures	119
Tableau 4.10: Classification des indices selon l'erreur standard moyenne obtenue par les mesures au sol (bleu) ainsi que selon l'erreur relative moyenne obtenue par les mesures de l'image hyperspectrale de la ferme IHARF (rouge).	121
Tableau 4.11: Comparaison des réseaux de neurones avec le MSACRI-1 par rapport à la vérité terrain pour l'estimation des résidus de cultures	128
Tableau 4.12: Comparaison des réseaux de neurones par rapport à la vérité terrain pour l'estimation de la végétation et des sols nus.	134

Liste des acronymes

BI: *Brightness Index*
CAI: *Cellulose Absorption Index*
CRIM: *Crop Residue Index Multiband*
ESSI: *Earth Search Sciences Incorporated*
ETM: *Enhanced Thematic Mapper*
FOV: *Field Of View*
GCP: *Ground Control Point*
GPS: *Global Positioning System*
IFOV: *Instantaneous Field of View*
ISDAS: *Imaging Spectrometer Data Analysis System*
LAI: *Leaf Area Index*
LUT: *Look Up Table*
MIR: *Moyen infrarouge*
MSACRI: *Modified Soil Adjusted Corn Residue Index*
NDI: *Normalized Difference Index*
NDVI: *Normalized Difference Vegetation Index*
NRCS: *Natural Resource Conservation Service*
PIR: *Proche infrarouge*
SACRI: *Soil Adjusted Corn Residue Index*
SAM: *Spectral Angle Mapper*
SAVI: *Soil Adjusted Vegetation Index*
SMA: *Specral Mixture Analysis*
TM: *Thematic Mapper*
TSAVI: *Transformed Soil Adjusted Vegetation Index*

Chapitre 1: Introduction

Dans plusieurs régions du monde, la production des récoltes est diminuée par l'érosion éolienne et hydrique. Un ruissellement intense sur une terre agricole peut avoir des impacts environnementaux ainsi que des répercussions socio-économiques très graves dans l'univers de l'agriculture. Le type et l'ampleur des dommages peuvent varier considérablement d'une région à l'autre (Michels *et al.*, 1995). La conservation des résidus de cultures sur les terres agricoles après la récolte est considérée comme étant une méthode efficace, simple et peu coûteuse pour contrôler l'érosion éolienne et hydrique du sol, et maintenir une bonne qualité de ce dernier (figures 1.1 et 1.2) (Roberts et Coleman, 1988). Les résidus de cultures peuvent se définir comme étant de la végétation sèche laissée sur des terres agricoles provenant de la récolte précédente. Les étapes de la dégradation des résidus de cultures s'échelonnent normalement sur l'ensemble d'une année. Une fois le stade de croissance de la végétation terminé, vers le mois de septembre, la végétation meurt et commence son stade de dégradation. Entre les mois de septembre et de mai, la végétation morte est soumise à de nombreux stress, dont celui de la neige et des pluies abondantes du printemps. Au début de l'été suivant, on retrouve sur les terres agricoles des résidus de cultures où les traces de cellulose et de lignine sont réduites, ce qui différencie les résidus de cultures de la végétation verte. Bien entendu, un résidu de culture laissé pendant quelques années sur une terre agricole se décompose lentement jusqu'au moment où il devient de la matière organique.

Les terres agricoles où un minimum de 20 % de résidus de cultures est laissé après la récolte peut réduire considérablement le niveau d'érosion de ce sol (Freebairn et Worcker, 1986). Certaines recherches effectuées en Ontario par Ketcheson et Stonehouse (1983) ont prouvé qu'un taux de



Figure 1.1: Présence de résidus de blé laissés sur une terre agricole (Indian Head, Saskatchewan, 6 juillet 2000).



Figure 1.2: Présence de résidus de blé (Indian Head, Saskatchewan, 7 juillet 2000).

couverture de 15 % de résidus de maïs sur un sol peut réduire l'érosion de 75 % en comparaison à un sol nu. Par ailleurs, bien que le carbone est une source essentielle pour la croissance de tous les éléments organiques sur la terre, plusieurs scientifiques sont concernés quant au taux d'accroissement du dioxyde de carbone dans l'atmosphère, car ce dernier contribue énormément à l'effet de serre. Par exemple, plus de trois milliards de tonnes sont libérés chaque année. La retraite de carbone contenue dans le sol se fait par la reproduction des plantes. Ces dernières convertissent le dioxyde de carbone dans leurs tissus par le biais de la photosynthèse. Lorsque la plante meurt, les matériaux de la plante sont décomposés principalement par des micro-organismes et une grande quantité de carbone retrouvée dans les matériaux de la plante est éventuellement relâchée dans l'atmosphère sous forme de dioxyde de carbone. Par ailleurs, les recherches ont démontré que les résidus d'une plante morte peuvent fixer une quantité assez importante de carbone dans le sol au lieu d'être libérée dans l'atmosphère. À grande échelle, cette pratique pourrait avoir de grands bénéfices sur la diminution du taux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère (Rice, 2002). En outre, l'application des résidus de cultures sur un sol améliore non seulement la structure du sol, mais également la fertilité de ce dernier, par l'addition des nutriments ainsi que par l'addition de la matière organique. En plus d'influencer l'infiltration de l'eau dans le sol, l'évaporation, la porosité et la température du sol (Aase et Tanaka, 1991), les résidus de cultures peuvent également améliorer la qualité de l'eau. Effectivement, en réduisant la quantité de particules de sol érodé se jetant dans des cours d'eau ou des rivières à proximité des terres agricoles, les mouvements de nutriments, de pesticides et de métaux lourds attachés aux particules de sol sont également réduits. Or, le résultat final correspond à une diminution de l'érosion du sol et à une amélioration de la qualité de l'eau (Daughtry *et al.*, 1995).

Étant donné que les territoires réservés à l'agriculture au Canada sont de l'ordre de plusieurs milliers de km², le gouvernement canadien pourrait contrôler, promouvoir et favoriser davantage cette pratique par le biais de la télédétection en déversant des primes aux fermiers utilisant cette technique de protection du sol face à l'érosion. Plusieurs provinces canadiennes pourraient tenter de reproduire l'ancien modèle du gouvernement ontarien, car ce dernier offrait des subventions très intéressantes aux agriculteurs laissant leurs résidus sur leurs terres agricoles, ce qui constitue une méthode de contrôle très efficace. Ceci dit, l'évaluation du taux de recouvrement des résidus de cultures ainsi que de sa distribution spatiale sont importantes aux scientifiques impliqués en matière d'érosion du sol et en modèle d'écoulement d'eau de surface ainsi qu'aux autorités visant à adopter de nouvelles lois concernant la conservation des résidus de cultures sur les terres agricoles (Arsenault et Bonn, 2001).

Par ailleurs, il est important de bien identifier et cartographier le taux de couverture de la végétation vivante, des sols nus et des résidus de cultures afin d'être en mesure de vérifier l'impact de ces derniers sur l'érosion des sols. Par exemple, la connaissance du taux de recouvrement des résidus de cultures et de la végétation vivante est essentielle pour les modèles hydrologiques dans le but de calculer le facteur "C" du modèle de l'équation universelle des pertes des sols servant à calculer le risque d'érosion du sol par l'eau. Le facteur "C" sert à déterminer l'efficacité de la gestion du sol et des cultures pour la prévention des pertes de sol. En d'autres termes, il est calculé en multipliant le facteur de deux éléments principaux, soient le type de culture et les méthodes de travail du sol étant propres au territoire. Bien que le but de cette thèse ne se base pas sur cette équation, nous trouvons important de rappeler la base mathématique de cette dernière (Wischmeier

et Smith, 1978):

$$A = R * K * LS * C * P \quad (1)$$

où:

- A: le taux de perte de terre (tonnes par hectares et par année);
- R: facteur de pluie et de ruissellement par secteur géographique;
- K: facteur d'érodibilité du sol;
- LS: facteur de longueur et d'inclinaison de la pente;
- C: facteur de gestion des récoltes;
- P: facteur de gestion de conservation.

Étant donné que la présence de résidus de cultures affecte l'érosion des sols, il est nécessaire de bien cartographier et identifier ces derniers. Deux types de méthodes d'identification et de cartographie des résidus existent, soient les méthodes conventionnelles ou classiques et les méthodes alternatives. D'après la littérature, nous pouvons catégoriser les méthodes classiques en six différentes méthodes. En effet, nous retrouvons la méthode d'estimation visuelle (*The Visual Estimate Method*), la méthode de la ligne transecte (*The Line-Transect Method*), la méthode du point intercepté (*The Point Intercept Method*), la méthode du mètre (*The Meterstick Method*), la méthode photographique (*The Photographic Method*) et la méthode de la roue à piques (*The Spiked-Wheel Method*). Étant donné les différentes limites de ces méthodes classiques, les scientifiques ont développé de nouvelles méthodes alternatives. L'utilisation de la télédétection est une très bonne alternative pour corriger les différentes lacunes des méthodes classiques d'identification des résidus de cultures (McNairn et Protz, 1993). Par exemple, la télédétection a le potentiel de quantifier les résidus de cultures sur un territoire très vaste. Nous retrouvons présentement dans le domaine de la télédétection optique deux différents types de capteurs, soient les capteurs multispectraux et les capteurs hyperspectraux. La technologie des capteurs hyperspectraux, qu'ils soient aéroportés ou

satellitaires, permet l'acquisition d'images dans plusieurs bandes spectrales étroites et continues, ce qui permet la construction continue du spectre de réflectances pour chaque pixel dans la scène. Un spectre de réflectances continue permet d'identifier avec précision certains matériaux d'une scène par le diagnostic des traits d'absorption et par d'autres caractéristiques spectrales, ce qui est tout simplement impossible par le biais de la technologie des capteurs multispectraux. Bien que l'avènement de la technologie des capteurs multispectraux au début des années 70 fut considéré comme étant révolutionnaire, nous pouvons affirmer que leurs petits nombres de bandes spectrales larges permettent une résolution spectrale insuffisante pour l'étude précise des matériaux situés en surface de la terre. En d'autres termes, les capteurs multispectraux sous-estiment l'information disponible au niveau de la réflectance. Par contre, la technologie des capteurs hyperspectraux permet l'échantillonnage à plusieurs bandes spectrales étroites et rend possible la construction d'une signature spectrale ressemblant à celle effectuée au laboratoire (Kruse *et al.*, 1990). Cette technologie permet à l'utilisateur de faire des analyses plus spécifiques. Par exemple, ils sont mieux adaptés que la télédétection multispectrale pour la cartographie du recouvrement du type de végétation (Goetz *et al.*, 1985).

1.1 Objectifs de la recherche

L'objectif général de cette thèse est une cartographie représentative et précise du taux de couverture des résidus de cultures sur les terres agricoles. À partir des mesures spectroradiométriques au sol et des images, quatre objectifs spécifiques ont été notés. Le premier consiste en l'analyse du potentiel de la télédétection hyperspectrale pour la distinction entre les résidus de cultures et les sols nus sous-jacents. En d'autres termes, cette partie consiste en une mise

au point sur les canaux les plus performants parmi les cent dix-huit du capteur Probe-1. Le second objectif est celui de la mise au point sur l'indice des résidus de cultures le plus précis pour l'estimation du taux de couverture des résidus de cultures. Le troisième objectif se résume en l'exploitation de la méthode des réseaux neuromimétiques pour la cartographie des sols et des résidus. Le quatrième et dernier objectif repose sur une étude comparative entre l'indice de résidus de cultures le plus précis et la méthode des réseaux de neurones pour une cartographie précises et sur la validité de ces deux méthodes par rapport à la vérité terrain.

1.2 Hypothèses

Trois différentes hypothèses plausibles ont été identifiées dans le cadre de cette recherche:

- Comparativement à la télédétection multispectrale, l'hyperspectrale permettra une meilleure cartographie et estimation du taux réel de couverture des résidus de cultures.
- Le moyen infrarouge (1,4 à 2,5 μm) est la région du spectre électromagnétique qui permettra une meilleure discrimination entre les sols nus, la végétation vivante et les résidus de cultures.
- En exploitant la riche information hyperspectrale, la méthode des réseaux de neurones permettra une meilleure cartographie des résidus de cultures que les méthodes empiriques et semi-empiriques basées sur les indices des résidus de cultures.

1.3 Organisation de la thèse

Cette thèse de maîtrise est divisée en cinq chapitres distincts. Le premier chapitre d'introduction porte sur la problématique, les objectifs ainsi que sur les hypothèses de la thèse. Le second chapitre concernant la revue de littérature se concentre sur les méthodes classiques d'identification des résidus de cultures, des indices de résidus de cultures ainsi que sur les réseaux de neurones. La méthodologie de cette thèse, c'est-à-dire le site d'étude, la cueillette des données et les pré-traitements des images est expliquée au troisième chapitre. Les analyses et les discussions des résultats sont présentées au quatrième chapitre. Tandis que les conclusions et les recommandations sont expliquées au cinquième chapitre.

Chapitre 2: Cartographie des résidus de cultures: revue de littérature

2.1 Introduction

Afin d'être en mesure de bien cerner les différents objectifs de la recherche en cours, il est nécessaire de faire un bon survol de la littérature des diverses composantes de cette présente recherche. Dans un premier temps, nous devons nous attarder sur les méthodes classiques d'identification des résidus de cultures, c'est-à-dire les méthodes d'estimation visuelle (*The Visual Estimate Method*); de la ligne transecte (*The Line-Transect Method*); du point intercepté (*The Point Intercept Method*); de la roue à piques (*The Spiked-Wheel Method*); du mètre (*The Meterstick Method*) et photographique (*The Photographic Method*), afin d'en savoir plus sur les limites de ces méthodes et les raisons d'exploiter de nouvelles méthodes plus efficaces. Dans un deuxième temps, nous devons nous concentrer sur les indices de résidus de cultures, c'est-à-dire le BI (*Brightness Index*); le CAI (*Cellulose Absorption Index*); le CRIM (*Crop Residue Index Multiband*); le NDI (*Normalized Difference Vegetation Index*); le SACRI (*Soil Adjusted Corn Residue Index*) et le MSACRI (*Modified Soil Adjusted Corn Residue Index*); afin de pouvoir les utiliser correctement. Dans un troisième temps, nous devons focaliser sur la méthode des réseaux de neurones dans le but de bien définir et expliquer cette dernière ainsi que de bien comprendre ses avantages et ses inconvénients.

2.2 Les méthodes classiques d'identification des résidus de cultures

Étant donné que les résidus de cultures jouent un rôle primordial pour la protection de l'érosion du sol, la quantification de ces derniers sur une terre agricole est nécessaire afin d'évaluer son potentiel pour la protection d'un sol (Daughtry *et al.*, 1996). Les différentes méthodes pour

mesurer ces derniers doivent fournir une bonne estimation du pourcentage de résidus couvrant un sol avec un nombre raisonnable de mesures (Laflen *et al.*, 1981). Bien que plusieurs méthodes d'estimation des résidus de cultures ont été utilisées (Borst et Woodburn, 1942; Kramer et Meyer, 1969; Mannering et Meyer, 1963; Meyer *et al.*, 1970), aucune de ces méthodes n'a été retenue comme étant précise et dominante (Laflen *et al.*, 1981). D'après la littérature, nous pouvons catégoriser les méthodes classiques d'identification des résidus de cultures en six différentes classes. En effet, nous retrouvons la méthode d'estimation visuelle, la méthode de la ligne transecte, la méthode du point intercepté, la méthode du mètre, la méthode photographique et la méthode de la roue à piques.

2.2.1 La méthode d'estimation visuelle (*The Visual Estimate Method*)

La méthode d'estimation visuelle est sans aucun doute la plus ancienne et la plus simple à utiliser. Dans le passé, l'information concernant l'estimation des résidus de cultures était compilée par le biais d'entrevues personnelles et par des sondages envoyés par la poste. Or, les fermiers avaient la responsabilité d'estimer le pourcentage de résidus de cultures couvrant leurs terres agricoles sans la moindre technique et/ou technologie (McNairn et Protz, 1993). Il est donc tout à fait normal que les résultats obtenus par cette méthode soient biaisés, car chaque fermier estimait le nombre de résidus de cultures présents sur leurs terres selon leurs propres critères visuels d'évaluation.

2.2.2 La méthode de la ligne transecte (*The Line-Transect Method*)

La méthode de la ligne transecte est la technique standard présentement utilisée par la NRCS

(*Natural Resource Conservation Service*) pour estimer la quantité de résidus de cultures retrouvés sur une terre agraire (Morrison *et al.*, 1993; 1995). Cette méthode consiste à étirer un câble ou une corde au-dessus de la surface du sol dans le but de déterminer la présence ou l'absence des résidus de cultures à certains points sélectionnés. Le pourcentage de résidus est calculé en divisant le nombre de points de résidus de cultures par le nombre total de points échantillonnés pour ensuite le multiplier par 100. La précision de cette méthode dépend de la longueur de la corde ainsi que du nombre de points utilisés par ligne (Daughtry *et al.*, 1996). Notons que les cordes utilisées lors de cette méthode sont typiquement entre 15 ou 30 mètres de longueur et munies de 100 à 200 billes réparties uniformément au long de la corde (Daughtry *et al.*, 1995). Certaines études effectuées par Laflen *et al.* (1981) ont démontré que les résidus de maïs peuvent être estimés à environ 15 % de la moyenne lorsque 500 points sont utilisés. Sloneker et Moldenhauer (1977) ont également utilisé la méthode de la ligne transecte pour estimer le recouvrement des résidus de cultures sur un sol et ont obtenu des résultats semblables à ceux de Laflen *et al.* (1981).

2.2.3 La méthode de la roue à piques (*The Spiked-Wheel Method*)

Certains scientifiques ont inventé un nombre significatif d'alternatives à la méthode de la ligne transecte afin de faciliter et améliorer l'utilisation de cette dernière. Par exemple, Morrison *et al.* (1993) ont inventé et utilisé la méthode de la roue à piques. Cette méthode consiste à faire rouler une roue au-dessus de la surface du sol dans le but de déterminer la présence ou l'absence des résidus de cultures à certains points sélectionnés. Tout comme la méthode de la ligne transecte, le pourcentage de résidus de cultures est calculé en divisant le nombre de points de résidus de cultures par le nombre total de points échantillonnés pour ensuite le multiplier par 100. L'avantage d'utiliser

cette technique vient du fait qu'il n'est plus nécessaire d'utiliser un câble de mesure. Cependant, l'utilisateur doit faire attention de ne pas fausser les résultats, car cette méthode exige un niveau de concentration assez élevé pour bien l'aligner et viser la roue (Daughtry *et al.*, 1995). Les résultats obtenus par cette méthode se sont avérés semblables à ceux de la méthode de la ligne transecte.

2.2.4 La méthode du point intercepté (*The Point Intercept Method*)

La méthode du point intercepté peut se définir comme étant une méthode utilisée pour déterminer aléatoirement un certain nombre de points sur une terre agricole pour ensuite vérifier s'il y a présence ou absence de résidus de cultures aux différents points choisis. Les différents points sont sélectionnés par différentes techniques dont celle utilisant un système en fils d'araignée, un système de grillage ou un système de matrice aléatoire. Le pourcentage de résidus de cultures est calculé en divisant le nombre de points où l'on retrouve des résidus de cultures par le nombre total de points échantillonnés pour ensuite le multiplier par 100 (Daughtry *et al.*, 1995). Étant donné que la méthode du point intercepté et celle de la ligne transecte sont les méthodes classiques les plus utilisées pour estimer le pourcentage de résidus de cultures couvrant un sol, plusieurs nouvelles variantes ont été développées dans le but d'obtenir de meilleurs résultats (Bonham, 1989). Encore une fois les résultats obtenus par cette méthode se sont avérés semblables à ceux de la méthode de la ligne transecte.

2.2.5 La méthode du mètre (*The Meterstick Method*)

La méthode du mètre consiste à estimer le pourcentage de résidus de cultures en plaçant un mètre sur la surface du sol de manière à ce qu'il soit perpendiculaire aux rangées de cultures. En

commençant à une rangée et en terminant à une rangée adjacente, la longueur totale des résidus de cultures se trouvant le long du mètre est mesurée. Le pourcentage de résidus de cultures couvrant le sol correspond au total de la largeur d'une rangée recouverte par des résidus (Hartwig et Laflen, 1978). Cependant, il a été prouvé qu'un mètre n'est pas suffisant pour obtenir des résultats meilleurs à la méthode de la ligne transecte.

2.2.6 La méthode photographique (*The Photographic Method*)

La méthode photographique consiste à utiliser une photographie verticale ou une paire de photos stéréoscopiques pour l'estimation de la fraction du sol couverte de résidus de cultures. Le temps requis pour l'analyse et la détermination du pourcentage du couvert, suite aux procédures de recherche sur le terrain, peut être long. Depuis déjà quelques années, nous avons été témoin d'un avancement important dans les domaines de la photogrammétrie, la vidéogrammétrie et de la photo-interprétation pour l'estimation de la quantité totale de résidus de cultures couvrant un sol (Daughtry *et al.*, 1996). Lorsqu'une image est prise, elle peut être rapidement analysée et classifiée par ordinateur en utilisant des procédures objectives selon les différentes classes de sols et les différents types de résidus (Meyer *et al.*, 1988; Morrison et Chichester, 1991). Cependant, il peut y avoir des erreurs de classification lorsque la différence spectrale entre les classes de sol et de résidus n'est pas suffisante. Ces erreurs peuvent être corrigées par des procédures manuelles pouvant améliorer la distinction entre la classe des résidus de cultures et celle du sol (Corak *et al.*, 1993).

2.2.7 Les limites des méthodes classiques d'identification des résidus de cultures

Les limites des méthodes classiques d'identification des résidus de cultures sont assez simples à comprendre. Effectivement, ces méthodes d'estimation du pourcentage des résidus sont fastidieuses, lentes, plus ou moins précises et plutôt subjectives. L'utilisateur peut facilement fausser les résultats en choisissant une parcelle de territoire non représentative de la région. De nouvelles méthodes d'identification des résidus étant plus rapides, plus exactes et objectives sont donc nécessaires dans le but de faire une meilleure gestion des résidus de cultures (Daughtry *et al.*, 1996). Par exemple, de nouvelles méthodes exploitant la télédétection ont été développées. En effet, par le biais des méthodes de la fluorescence, de la réflectance (multispectrale et hyperspectrale) et des indices de résidus, la télédétection a le potentiel d'estimer avec précision et rapidité le pourcentage de résidus de cultures couvrant un large territoire, ce qui constitue un net avantage (McMurtrey *et al.*, 1993; Su *et al.*, 1997). Ceci dit, l'utilisation de la télédétection pour identifier les résidus présents sur un sol est donc une très bonne alternative pour corriger les différentes lacunes des méthodes classiques d'identification de ces derniers (McNairn et Protz, 1993).

2.3 Les indices de résidus de cultures

Dans le champ d'étude des applications de la télédétection, les scientifiques ont développé des indices de végétation pour l'évaluation qualitative et quantitative du couvert végétal en utilisant les données satellitaires. Plusieurs recherches ont démontré que la végétation verte peut être bien quantifiée en utilisant des techniques propres à la télédétection, tels les indices de végétation (Bariou *et al.*, 1985; Guyot *et al.*, 1989 et Bannari *et al.*, 1995). Durant les deux dernières décennies, plus de quarante indices de végétation ont été développés pour rehausser et augmenter la réponse spectrale

de la végétation (Bannari *et al.*, 1995). Ces différents indices sont généralement basés sur le contraste entre la réflectance du rouge et du proche infrarouge, ce qui est caractéristique de l'absorption de la chlorophylle. L'absence de la chlorophylle et de l'activité photosynthétique dans la végétation scénessante et dans les résidus de cultures réduit considérablement la différence entre les réflectances du rouge et du proche infrarouge. Or, les indices de végétation ne sont pas adéquats pour l'identification de la végétation scénessante et des résidus de cultures (Cyr *et al.*, 1995; Biard et Baret, 1997). Étant donné que les signatures spectrales du sol nu et des résidus de cultures dans le visible et dans le proche infrarouge sont semblables, la différenciation entre ces deux composantes est très difficile (Aase et Tanaka, 1986; Wanjura et Bilbro, 1986; Biard *et al.*, 1995). Ceci dit, certains scientifiques se sont tournés vers d'autres domaines spectraux plus adéquats pour la différenciation entre le sol et les résidus (Bannari *et al.*, 2000). Mentionnons également qu'en raison du fait que les résidus de cultures soient peu couvrants, un bon indice de résidus doit être indépendant des propriétés optiques des sols nus sous-jacents (couleur et brillance), c'est-à-dire que ses valeurs pour les sols nus doivent être nulles ou presque (Bannari *et al.*, 1999). Six principaux indices de résidus de cultures sont retrouvés dans la littérature, soit le BI (*Brightness Index*) (Major *et al.*, 1990), le CAI (*Cellulose Absorption Index*) (Daughtry *et al.*, 1997), le CRIM (*Crop Residue Index Multiband*) (Biard et Baret, 1997), le NDI (*Normalized Difference Index*) (McNairn et Protz, 1993), le SACRI (*Soil Adjusted Corn Residue Index*) (Biard *et al.*, 1995) et le MSACRI (*Modified Soil Adjusted Corn Residue Index*) (Bannari *et al.*, 2000b).

2.3.1 L'indice de brillance (*Brightness Index*: BI)

Major *et al.* (1990) ont développé l'indice de résidus de cultures BI exploitant les quatre

premières bandes TM de Landsat. Le concept mathématique de cet indice s'exprime de la façon suivante:

$$BI = \rho_{TM1} + \rho_{TM2} + \rho_{TM3} + \rho_{TM4} \quad (2)$$

où:

ρ_{TM1} : est la réflectance mesurée dans le bleu (TM1);

ρ_{TM2} : est la réflectance mesurée dans le vert (TM2);

ρ_{TM3} : est la réflectance mesurée dans le rouge (TM3);

ρ_{TM4} : est la réflectance mesurée dans le proche infrarouge (TM4).

Cependant, certaines études basées sur des simulations portant sur la sensibilité aux propriétés optiques des sols nus de l'indice BI ont démontré que cet indice peut difficilement être utilisé pour la cartographie et l'identification des résidus de cultures, car ce dernier est fortement affecté par les propriétés optiques des sols nus sous-jacents (Bannari *et al.*, 1999).

2.3.2 L'indice d'absorption de la cellulose (*Cellulose Absorption Index: CAI*)

Daughtry *et al.* (1997) se sont, quant à eux, basés sur l'absorption de la cellulose entre 1975 et 2225 nm pour la distinction des résidus et ont développé le CAI. L'équation mathématique de cet indice est la suivante:

$$CAI = [0,5 * (\rho_x + \rho_y) - \rho_z] \quad (3)$$

où:

ρ_x : est la réflectance mesurée entre 1975 et 2025 nm;

ρ_y : est la réflectance mesurée entre 2175 et 2225 nm;

ρ_z : est la réflectance mesurée entre 2075 et 2125 nm.

Basées sur des simulations, il a été prouvé que l'indice CAI répond à l'exigence d'un bon indice de résidus de cultures, car ce dernier donne des valeurs nulles ou pratiquement indépendantes

des propriétés et des caractéristiques optiques des sols nus sous-jacents. Par contre, bien qu'il normalise les effets des sols nus sous-jacents, le CAI n'offre aucune sensibilité aux résidus de cultures, peu importe le type de résidus ou le taux de couverture au sol. Ajoutons que lorsque le taux de recouvrement des résidus au sol est très élevé, la possibilité d'utiliser cet indice pour la cartographie des résidus devient alors très limitée (Bannari *et al.*, 1999).

2.3.3 L'indice de différence normalisé (*Normalized Difference Index* : NDI)

McNairn et Protz (1993) ont remarqué la sensibilité du moyen infrarouge (MIR) lors de la présence de résidus de maïs pour ainsi retenir le formalisme du NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) (Rouse *et al.*, 1974) pour créer le NDI (*Normalized Difference Index*). Cet indice est basé sur la différence normalisée entre les réflectances des bandes du proche et du moyen infrarouge du capteur TM de Landsat et se calcule de la manière suivante:

$$NDI = (\rho_{TM4} - \rho_{TM5}) / (\rho_{TM4} + \rho_{TM5}) \quad (4)$$

où:

ρ_{TM5} est la réflectance mesurée dans le MIR (TM5).

Certaines recherches basées sur des simulations effectuées sur la possibilité d'utiliser l'indice NDI en matière de détection des résidus de cultures ont démontré qu'il est grandement affecté par les propriétés optiques du sol sous-jacent. Par contre, le NDI utilisant les canaux ETM-7 et ETM-5 permet d'avoir de bons résultats lorsque les sols ont un faible ou un moyen taux d'humidité. Les résultats sont toutefois insuffisants lorsque les sols sont secs et que les propriétés optiques des sols sont claires et brillantes (Bannari *et al.*, 2000).

2.3.4 L'indice des résidus de maïs sols ajustés (*Soil Adjusted Corn Residue Index: SACRI*)

Dans le but de minimiser les effets des propriétés optiques des sols nus sous-jacents sur le NDI, Biard *et al.* (1995) ont proposé un nouvel indice de résidus de cultures, soit le SACRI. Les principes de bases retrouvés derrière la conception de cet indice sont inspirés de la transformation du SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) (Huete, 1988) en TSAVI (*Transformed Soil Adjusted Vegetation Index*) (Baret *et al.*, 1989). D'un point de vue mathématique, l'indice de résidus de cultures SACRI s'exprime de la manière suivante:

$$\text{SACRI} = \alpha (\rho_{\text{TM4}} - \alpha \rho_{\text{TM5}} - \beta) / (\alpha \rho_{\text{TM4}} + \rho_{\text{TM5}} - \alpha \beta) \quad (5)$$

où:

α est la pente de la droite de sols nus dans l'espace spectral MIR-PIR;

β est l'ordonnée à l'origine de la droite de sols nus dans l'espace spectral MIR-PIR.

Bien que le SACRI a l'avantage d'être moins sensible aux propriétés optiques des sols que le NDI, il a le désavantage d'être uniquement sensible aux faibles taux de couvertures en résidus (Biard *et al.*, 1995; Bannari *et al.*, 1999). Effectivement, les recherches basées sur des simulations ont démontré qu'avec le biais de l'indice SACRI les résidus de cultures dont le taux de recouvrement est supérieur à 25 % sont difficiles à détecter, tandis que les résidus ayant un faible taux de couverture au sol donne des résultats satisfaisants (Bannari *et al.*, 2000).

2.3.5 L'indice modifié des résidus de maïs sols ajustés (*Modified Soil Adjusted Corn Residue Index: MSACRI*)

Un autre indice de résidus de cultures a été créé par la modification du SACRI, soit le MSACRI (Bannari *et al.*, 2000). Celui-ci exploite les bandes spectrales du moyen infrarouge, c'est-

à-dire entre 1,55µm à 1,75µm et entre 2,10µm à 2,35µm. L'intérêt à utiliser ces deux bandes spectrales vient du fait que cette région du spectre électromagnétique est reconnue comme étant favorable à l'identification des différents types de roches (Caloz, 1991), de sols (Mulders et Girard, 1993), des composantes sèches de la végétation (Elvidge, 1990; Haboudane *et al.*, 1997; Bannari *et al.*, 1999) ainsi que de la végétation verte (Maltus *et al.*, 1993). L'équation mathématique du MSACRI est la suivante:

$$\text{MSACRI} = C^{\text{ste}} [a(\rho_{\text{ETM5}} - a \rho_{\text{ETM7}} - \beta) / (\alpha \rho_{\text{ETM5}} + \rho_{\text{ETM7}} - \alpha\beta)] \quad (6)$$

où:

C^{ste} : est une constante multiplicative ayant une valeur de 5;

a : est la pente de la droite de sols nus dans l'espace spectral ETM5/ETM7;

b : est l'ordonnée à l'origine de la droite de sols nus dans l'espace spectral ETM5/ETM7;

ρ_{ETM5} : est la réflectance mesurée dans le MIR (ETM5);

ρ_{ETM7} : est la réflectance mesurée dans le MIR (ETM7).

Les recherches basées sur des simulations effectuées à l'aide du MSACRI ont prouvé que ce dernier est en mesure de minimiser l'effet des sols sous-jacents. Comparés au visible, les canaux du moyen infrarouge (ETM-5 et ETM-7) utilisés pour calculer le MSACRI sont caractérisés par une transparence large en relation aux composantes atmosphériques. Bref, l'indice de résidus de cultures MSACRI peut être utilisé pour la détection des résidus de cultures, car ce dernier est indépendant des effets du sol ainsi que des variations atmosphériques (Bannari *et al.*, 2000).

2.3.6 L'indice de résidus de culture multibande (*Crop Residue Index Multiband: CRIM*)

Biard et Baret (1997) ont également contribué au développement des indices de résidus de cultures en inventant le CRIM. Cet indice est basé sur un modèle linéaire dans le but d'extraire du complexe sol-résidus, la proportion correspondant aux résidus. Contrairement aux autres indices

mentionnés plus haut (BI, CAI, NDI, SACRI et MSACRI), où certaines régions spécifiques du spectre sont utilisées, le CRIM peut utiliser n'importe quel ensemble de bandes spectrales. En plus de prendre en considération la droite des sols nus (S), le CRIM prend également en considération la droite des résidus purs à 100 % (R) lors de son calcul. Dans un plan bidimensionnel défini par deux bandes spectrales, tel que démontré à la figure 2.1, tout point (M) d'un complexe sol-résidus doit se situer entre la droite des sols et celle des résidus.

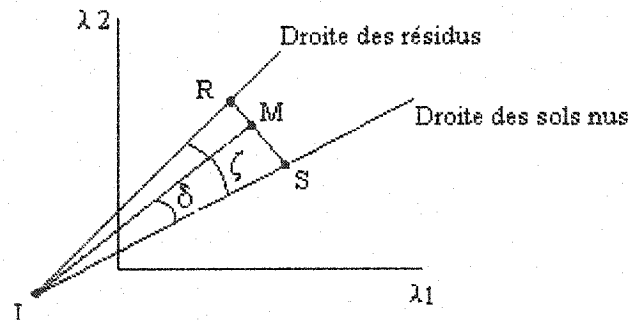


Figure 2.1: Conception de l'indice de résidus de cultures CRIM dans un plan bidimensionnel (Biard et Baret, 1997).

Dans le but de trouver l'indice CRIM du point (M) il faut diviser la tangente de l'angle entre la droite des sols nus (S) et celle du point (M) par la tangente de l'angle entre la droite des sols nus (S) et celle des résidus (R). Le résultat est une estimation de la fraction du recouvrement des résidus de cultures. Le point I est l'interception de la droite des résidus et celle des sols nus. L'angle ζ est mesuré en faisant la soustraction de la fonction réciproque de la tangente (tg^{-1}) de la pente de la droite des résidus par la fonction réciproque de la tangente (tg^{-1}) de la pente de la droite des sols nus. Par contre, l'angle δ est mesuré en faisant la soustraction de la fonction réciproque de la tangente (tg^{-1}) de la pente de la droite (M) par la fonction réciproque de la tangente (tg^{-1}) de la pente de la droite des sols nus. Le CRIM peut donc être décrit par la formule suivante (Biard et Baret, 1997):

$$\text{CRIM} = \text{SM}/\text{SR} = \tan(\delta)/\tan(\zeta) \quad (7)$$

Cette équation peut être modifiée pour être utilisée dans un plan à n-dimensions (plusieurs bandes spectrales) en utilisant les équations (8) et (9) pour définir la droite des sols et celle des résidus. La première bande λ_1 est utilisée comme bande de référence. La droite des sols nus se définit alors comme suit:

$$\begin{bmatrix} \rho_s(\lambda_1) \\ \rho_s(\lambda_2) \\ \vdots \\ \rho_s(\lambda_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \alpha_{s,2} & \beta_{s,2} \\ \vdots & \vdots \\ \alpha_{s,n} & \beta_{s,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho_s(\lambda_1) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Similairement, la droite des résidus de cultures peut se définir comme suit:

$$\begin{bmatrix} \rho_r(\lambda_1) \\ \rho_r(\lambda_2) \\ \vdots \\ \rho_r(\lambda_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \alpha_{r,2} & \beta_{r,2} \\ \vdots & \vdots \\ \alpha_{r,n} & \beta_{r,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho_r(\lambda_1) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Les vecteurs principaux pour la droite des sols et celle des résidus sont respectivement:

$$s = [1 \quad \alpha_{s,2} \quad \dots \quad \alpha_{s,n}] \quad (10)$$

$$r = [1 \quad \alpha_{r,2} \quad \dots \quad \alpha_{r,n}] \quad (11)$$

Le point d'interception (I) entre la droite des sols nus et celle des résidus de cultures est obtenu par le système d'équation linéaire 8 et 9. Cette valeur correspond à $\rho_{s,1} = \rho_{r,1} = \rho_{i,1}$, ce qui représente la jonction des droites des résidus, des sols nus et du point I. Les valeurs des autres bandes spectrales peuvent être obtenues en utilisant l'équation 8 ou l'équation 9.

En prenant en considération l'ensemble des mesures de réflectances du complexe sol-résidus $[\rho_{M,1} \quad \rho_{M,2} \quad \dots \quad \rho_{M,3}]$ correspondant au point M, le vecteur principal m généré par IM peut se définir comme suit:

$$m = [\rho_{M,1} - \rho_{I,1} \quad \rho_{M,2} - \rho_{I,2} \quad \dots \quad \rho_{M,n} - \rho_{I,n}] \quad (12)$$

Les angles δ et ζ peuvent alors se définir comme suit:

$$\cos \delta = \frac{s * m}{[s] * [m]} \quad \cos \zeta = \frac{s * r}{[s] * [r]} \quad (13)$$

En utilisant la définition du CRIM selon l'équation 7, nous obtenons:

$$\text{CRIM} = \frac{\tan(\delta)}{\tan(\zeta)} = \frac{\cos(\zeta)}{\cos(\delta)} * \sqrt{\frac{1 - \cos^2(\delta)}{1 - \cos^2(\zeta)}} \quad (14)$$

Les résultats obtenus du CRIM sont une estimation directe du taux de recouvrement situé dans l'intervalle [0-1]. Les recherches ont démontré que le CRIM n'est pas trop sensible aux variations optiques du sol dues aux changements du niveau de l'humidité et de la rugosité. Le degré de précision de la relation entre le CRIM et les résidus de cultures dépend grandement du contraste entre le sol et les résidus. En effet, le degré de précision est à son plus fort lorsque les sols sont brillants, secs et lisses (Biard et Baret, 1997).

2.4 Les réseaux de neurones

Tout d'abord, les réseaux de neurones peuvent être connus sous différents noms, tels les réseaux neuromimétiques, les modèles de connexions, les modèles de traitements de distribution

parallèle et les systèmes neuromorphologiques (Lippmann, 1987). L'approche des réseaux de neurones a tout d'abord été introduite comme méthode théorique de l'intelligence artificielle vers la fin des années 1950 et au début des années 1960 (Key *et al.*, 1989). En raison de l'accroissement du volume de données provenant de la télédétection hyperspectrale ainsi qu'en raison de l'augmentation au niveau de la complexité à classer diverses classes retrouvées sur une image, les scientifiques n'ont eu guère le choix d'utiliser d'autres systèmes de classification, tel celui des réseaux de neurones (Corr *et al.*, 1989).

2.4.1 Définition et explication des réseaux de neurones

Le neurone à son plus simple niveau est un genre de calculateur incluant deux opérateurs. Le premier procède à la somme pondérée des différents signaux qu'il reçoit à l'entrée, tandis que le deuxième transforme ce résultat en un signal de sortie par l'application d'une fonction d'activation. Les caractéristiques du neurone peuvent donc se définir par les poids associés aux différentes entrées ainsi que par sa fonction d'activation. Le neurone fonctionne en ajustant ses poids de façon à faire correspondre à une entrée donnée (bandes spectrales) une sortie définie à l'avance (classes classifiées). La figure 2.3 représente la schématisation d'un neurone. Divers éléments caractérisant un neurone sont démontrés. Deux éléments principaux de la schématisation, soient les symboles Σ et N , méritent une attention particulière. Le symbole Σ correspond à l'addition des différents poids ($w_1 + w_2 + \dots + w_p = p$) associés aux diverses entrées. Par contre, le N correspond à la fonction d'activation qui transforme la variable 'p' issue de la sommation en une valeur de sortie (Caloz et Collet, 2001).

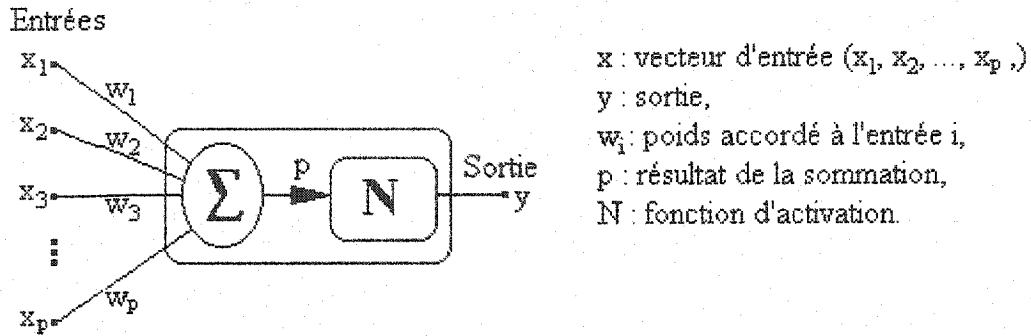


Figure 2.2: Schématisation d'un neurone (Caloz et Collet, 2001).

Le résultat de la sommation des poids est normalement normalisé entre 0 et 1 et est représenté par la variable 'p'. L'ajustement des poids détermine la relation entrée-sortie du neurone. Par ailleurs, le rôle fondamental de la fonction d'activation consiste à transformer le 'p' provenant de la sommation des poids associés aux entrées en une valeur de sortie 'y'. D'un point de vue mathématique, l'équation du neurone à son plus simple niveau est la suivante (Caloz et Collet, 2001):

$$y = N\left(\sum_i w_i x_i\right) = N(p) \quad (15)$$

où:

y est la sortie;

N est la fonction d'activation;

w_i est le poids de l'entrée i ;

x_i est le vecteur d'entrée;

p est le résultat de la sommation des poids accordé à l'entrée i .

Cependant, cette équation demeure au niveau théorique, car en réalité les poids associés aux entrées ne sont pas parfaitement ajustés pour produire en sortie la valeur que l'on désire obtenir. Pour remédier à ce problème, on doit ajouter au calcul un seuil de rendement. Si la valeur que l'on

désire obtenir est inférieure au seuil de rendement, la configuration des poids est satisfaite. Voici l'équation mathématique du neurone en tenant compte du seuil de rendement (Caloz et Collet, 2001):

$$y = N\left(\sum_i w_i x_i - \theta\right) = N(p - \theta) \quad (16)$$

où θ est le seuil de rendement (seuil de l'erreur de sortie admis).

Ajoutons que les entrées ' x_i ' ainsi que la sortie ' y ' d'un neurone sont toujours connues, car ces dernières correspondent respectivement aux différents canaux utilisés pour la classification et aux diverses classes que l'on désire obtenir. Le seuil de rendement θ est déterminé par l'utilisateur. Lors de la classification des images par la méthode des réseaux de neurones, le seuil de rendement fut de 0,01. Si le rendement était inférieur à ce seuil, la classification arrêterait automatiquement. Par contre, le neurone doit déterminer les poids ' w_i ' des entrées ' x_i ' pour que ces derniers soient conformes au seuil de rendement. Les poids ' w_i ' sont réajustés tant et aussi longtemps qu'ils ne conviennent pas au seuil de rendement de la valeur désirée (Caloz et Collet, 2001).

À lui seul, le neurone n'est pas assez puissant pour que les poids ' w_i ' s'ajustent correctement lors de la classification d'une image. Cependant, une série de neurones, plus communément nommée réseau de neurones, peut facilement résoudre ce genre d'équation. La schématisation d'un réseau de neurones à trois couches est démontrée à la figure 2.4. En effet, nous retrouvons trois couches distinctes soient la couche d'entrée, la couche cachée et la couche de sortie. Comme nous pouvons le constater, chaque entrée ' x_i ' de la couche d'entrée est connectée à tous les neurones de la couche cachée et ces derniers sont connectés aux sorties ' y_n ' de la couche de sortie (Goïta *et al.*, 1994).

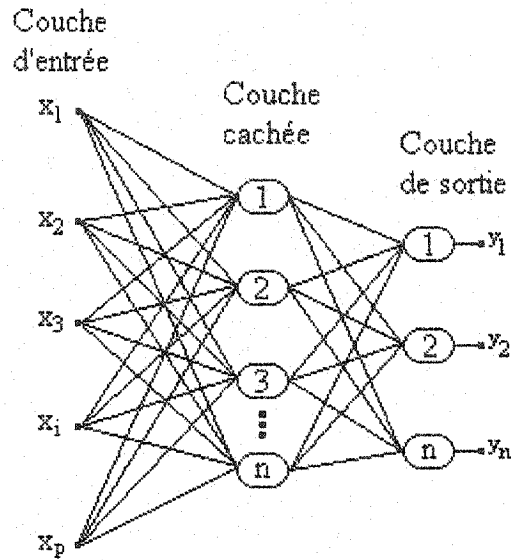


Figure 2.3: Schématisation d'un réseau de neurones à trois couches (Caloz et Collet, 2001).

He (2000) a démontré que trois couches cachées suffisent pour obtenir une bonne classification. Il a également démontré que le nombre de neurones par couche cachée doit être deux fois plus grand que le nombre d'entrées ' x_i '. En somme, l'opérateur a le contrôle sur certains paramètres, tels la quantité d'entrée ' x_i ', le nombre de couches cachées, le nombre de neurones par couche cachée, la quantité de sortie ' y_n ', le seuil de rendement θ désiré, le nombre d'itérations et la vitesse d'exécution, tandis que l'opérateur laisse le soin au réseau de calculer les poids ' w_i ' désirés.

2.4.2 Les avantages et les limites des réseaux de neurones

Dans un premier temps, affirmons que plusieurs scientifiques ont démontré la supériorité de cette méthode par rapport aux autres méthodes conventionnelles de classification d'image (He, 2000). L'un des grands avantages à utiliser cette méthode est que les informations pertinentes de chaque objet ou événement sont collectées ensemble. Or, cette technique améliore les solutions aux

problèmes de la manipulation et d'accessibilité à l'information (Robinson *et al.*, 1987). De plus, aucune connaissance antérieure de la distribution statistique des classes n'est nécessaire. Ceci est sans aucun doute un autre avantage, car il est difficile d'utiliser des fonctions de distribution sans connaissance (Benediktsson, *et al.*, 1990). Cette méthode de classification est également moins sensible au bruit statistique (Caloz et Collet, 2001). D'autre part, notons que la quantité des connexions et de poids permettent aux réseaux de neurones de résoudre des équations complexes (Key *et al.*, 1989). En outre, la classification d'une image par le biais des réseaux de neurones est avantagée, car le système classe bien les pixels dont les caractéristiques spectrales se trouvent à l'intérieur des intervalles des zones d'entraînement (Bischof *et al.*, 1992).

Passons aux limites des réseaux de neurones. Lorsque les caractéristiques spectrales des pixels ne se trouvent pas à l'intérieur des intervalles des zones d'entraînement, le système commet des erreurs très rapidement (Caloz et Collet, 2001). De plus, il classe les pixels d'une image selon les directives transmises, peu importe les caractéristiques de telle ou telle composante (Goïta *et al.*, 1994). Le plus grand désavantage à utiliser les réseaux de neurones en télédétection est le temps élevé de la phase d'apprentissage. Cependant, en raison de l'amélioration de la puissance des ordinateurs, la phase d'apprentissage a grandement été réduite. De plus, si l'on désire obtenir de meilleurs résultats, l'entraînement du système nécessite la sélection de grands sites (Goïta *et al.*, 1994), ce qui augmente encore une fois le temps d'apprentissage. Aussi, la configuration des différents paramètres du système (quantité d'entrées, le nombre de couches cachées, le nombre de neurones par couche cachée, la quantité de sortie, le seuil de rendement, le nombre d'itération et la

vitesse d'apprentissage) demeure assez complexe pour un opérateur n'ayant pas beaucoup d'expérience, car elle peut facilement influencer l'efficacité d'une classification.

2.5 Conclusions

En conclusion, les méthodes classiques d'identification des résidus de cultures ne peuvent être utilisées pour bien cartographier et estimer le pourcentage des résidus de cultures sur un grand territoire. Ces méthodes sont dépassées et ont été remplacées par une nouvelle gamme de méthodes plus précises, plus objectives et pouvant être utilisées à petite échelle. Par exemple, certains indices des résidus de cultures ont donné de bons résultats en matière d'estimation et de cartographie des résidus de cultures. De plus, les succès obtenus par la méthode des réseaux de neurones lors de la classification en milieu forestier et urbain, laisse envisager qu'elle pourrait être utilisée adéquatement dans un milieu agricole pour l'estimation et la cartographie précises des résidus de cultures.

Chapitre 3: Méthodologie

3.1 Introduction

La méthodologie de cette thèse peut se diviser en différentes étapes principales. Tout d'abord, nous allons nous concentrer quelques instants sur la description de notre site d'étude. Par ailleurs, nous allons porter notre attention sur la cueillette de nos données, c'est-à-dire sur les différentes mesures effectuées sur le terrain ainsi que sur l'acquisition de l'image aéroportée du capteur Probe-1. Finalement, nous allons nous concentrer sur les pré-traitements nécessaires de l'image aéroportée du capteur Probe-1. L'organigramme de la méthodologie de recherche est présenté à la figure 3.1.

3.2 Sites d'étude

Une première collecte de données a été effectuée entre le 26 juin au 7 juillet 2000 sur le site expérimental d'IHARF (*Indian Head Agricultural Research Foundation*) qui est une coopérative d'un petit village situé environ à trois kilomètres à l'est d'Indian Head qui se trouve au sud de la Saskatchewan ($50^{\circ}32'15''$ N, $103^{\circ}40'10''$ O) (Figure 3.2). L'activité économique principale de cette région est sans aucun doute celle reliée à l'agriculture. Par exemple, on y retrouve des cultures de blé, de canola, de pois etc. Plusieurs raisons expliquent le choix de ce site d'étude. Tout d'abord, il est très représentatif des terres que l'on retrouve dans toute la prairie canadienne, c'est-à-dire au Manitoba, en Saskatchewan et en Alberta. Étant donné que l'économie des prairies canadiennes est principalement basée sur l'agriculture, il est primordial d'accorder beaucoup d'importance afin d'être en mesure de mieux préserver le sol contre l'érosion éolienne et hydrique. De là vient l'importance

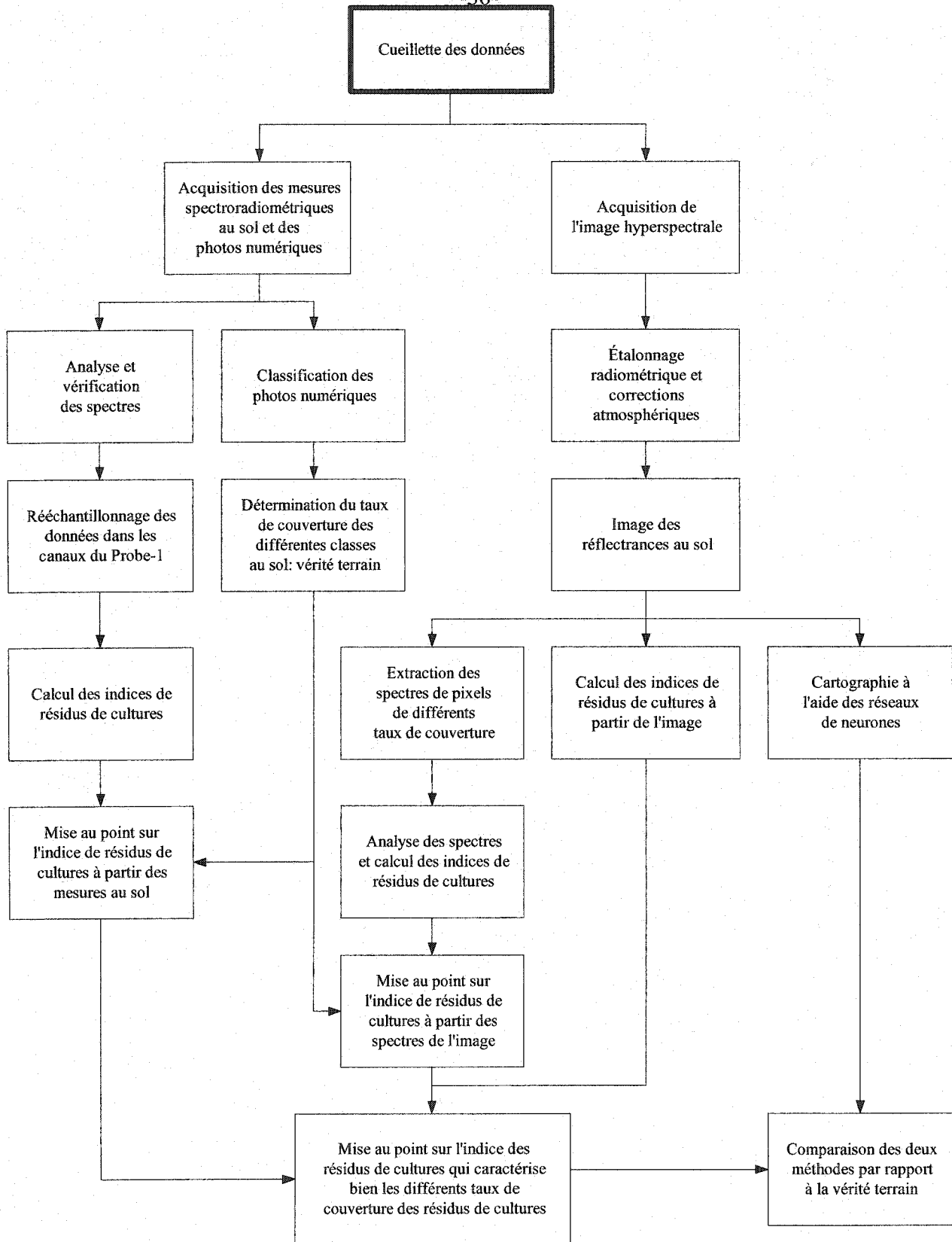


Figure 3.1: Organigramme de la méthodologie de recherche.

de la cartographie des résidus de cultures sur les terres des prairies canadiennes. Par ailleurs, différents types de résidus clutres ornent les terres agricoles du site expérimental d'IHARF. Bien que le résidu de culture principal de cette région est celui du blé, il n'en demeure pas moins que d'autres types de résidus de cultures sont présents dont celui du canola, du maïs et du petits pois. Mentionnons que lors de cette campagne de mesures d'envergure nationale supervisée par le Centre canadien de télédétection, plusieurs institutions ont participées. Par exemple, une trentaine de personnes du Centre canadien de télédétection, d'Agriculture Canada, de l'Université d'Ottawa, de l'Université de McGill, de l'Université de Lethbridge ainsi que de la ferme expérimentale d'IHARF étaient présents.

Les sols de la région d'Indian Head sont dominés par des sols noirs Chernozemic développés sur un dépôt lacustre argileux légèrement alcalin. Dans certaines régions, ces sols sont relativement superficiels (moins d'un mètre d'épaisseur) et reposent sur un till glaciaire argileux. La texture de surface varie entre de l'argile à un argile grossier (clay to heavy clay). La surface horizontale est normalement inférieure à 20 cm d'épaisseur, cependant elle peut atteindre 70 cm à certains endroits précis. La présence de pierres est absente sur la majorité des terres d'Indian Head, toutefois en raison de la proximité avec la couche sous-jacente de till glaciaire, de petites pierres ou de petits cailloux peuvent être présents (Kozak et Padbury, 1999). La géomorphologie de ce territoire est très représentative des territoires de la prairie canadienne. En effet, la très grande majorité de ce territoire peut être considérée comme étant un énorme plateau où de légères pentes peuvent varier entre 0,5 et 2,5 % (Kozak et Padbury, 1999).

Une seconde collecte de données a été effectuée le 10 octobre 1999 sur la ferme expérimentale d'agriculture Canada à Lennoxville (45°22'15"N, 71°51'35" W) qui est un petit village situé à quelques kilomètres de Sherbrooke. On y retrouve différents types de résidus de cultures, dont ceux de maïs, de blé, d'herbe, de tournesol et de soja. Ce site fut utilisé pour compléter la série de mesures spectroradiométriques des résidus et des sols nus obtenue à Indian Head. Contrairement au site d'étude d'Indian Head, aucune acquisition d'image fut prise. Les sols de ce site d'étude sont des sols lacustres développés de sédiments argileux et limoneux. De plus, le sol est imparfaitement égoutté (Cann et Lajoie, 1973).

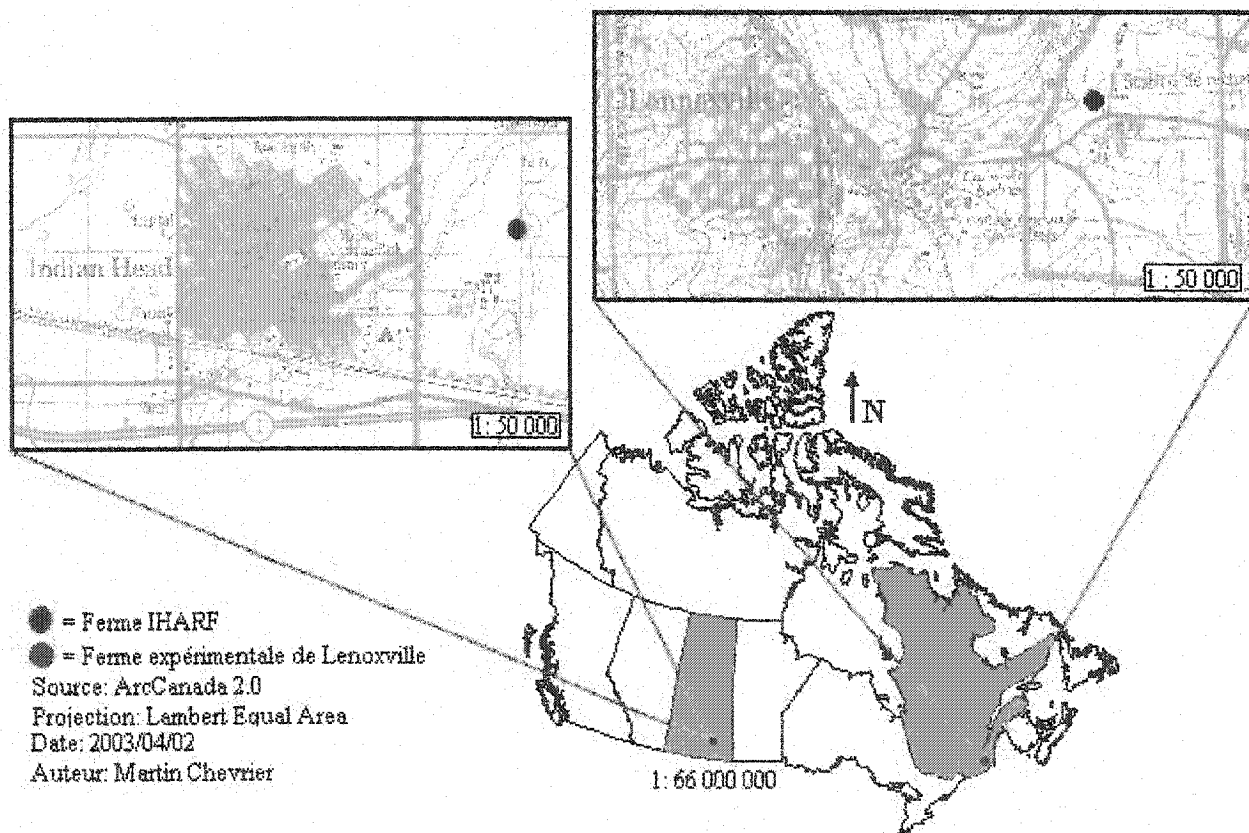


Figure 3.2: Régions d'études: Indian Head, Saskatchewan; et Lennoxville, Québec.

3.3 Cueillette des données

Pour sa part, la cueillette des données se divise en deux différentes étapes, c'est-à-dire celle des travaux effectués sur le terrain et celle de l'acquisition de l'image aéroportée. Il serait important de préciser que la cueillette de données nécessaire à ce projet de maîtrise a eu lieu à la fin du mois de juin et au début du mois de juillet 2000.

3.3.1 Mesures spectroradiométriques sur le terrain

Tout d'abord, les mesures sur le terrain ont eu lieu au cours de l'été 2000, plus précisément entre le lundi 26 juin et le vendredi 7 juillet. Plusieurs sites où l'on retrouvait des résidus de cultures ont été visités. Pour chaque site visité, différents points ont été observés. En effet, nous avons porté beaucoup d'attention et noté des informations concernant le type de résidus présent, la hauteur, l'orientation, une estimation visuelle de la couleur et de l'humidité du sol sous-jacent, la présence ou l'absence de la végétation verte et l'estimation du taux de recouvrement à l'aide des photographies numériques.

De plus, une série de mesures spectroradiométriques a été prise à l'aide du spectroradiomètre GER 3700. Celui-ci permet de mesurer la réflectance d'une cible entre $0,4 \mu\text{m}$ et $2,5 \mu\text{m}$. Le GER 3700 peut utiliser différents FOV (*Field Of View*). À Indian Head, un FOV de 3° fut utilisé. La distance entre la cible et la lentille était habituellement de l'ordre de 1,5 m, ce qui donne une surface de mesure d'environ $7,85 \text{ cm}$ de diamètre sur la cible. Au cours de cette séance, les spectres d'une trentaine de différents types de sols nus, dont les taux d'humidité, les niveaux de rugosité, de couleur et de brillance différaient d'un sol à l'autre (figure 3.3). Trois différents taux d'humidité de ces sols

ont été visuellement estimés. Ces taux variaient de très secs à très humides passant par des sols moyennement humides. Les sols de la région d'étude étaient soit lisses ou rugueux. Différentes couleurs de sols ont pu être visuellement identifiées. Effectivement, la couleur des sols variait entre le jaune, le brun pâle, le brun foncé, le noir et le rouge.

Tel que mentionné plus tôt, afin de compléter et de comparer la série de mesures spectroradiométriques obtenues en Saskatchewan, des mesures de résidus de cultures ont été prises à Lennoxville, Québec. Le FOV du GER 3700 fut de 10° et la distance entre la lentille et la cible était de 1,85 m, ce qui donne une distance de mesure de 32,37 cm de diamètre sur la cible. Les spectres de cinq différents types de résidus à différents taux de couvertures (figure 3.4) ont été mesurés, soient ceux des résidus de blé, de maïs, d'herbe, de soja et de tournesol. Les taux de couvertures des résidus étaient d'environ 0 %, 15 %, 25 %, 40 %, 50%, 75 %, 90 % et 100 %. De plus, nous avons pris la mesure des résidus sur différents types de sol dont les taux d'humidité, les niveaux de rugosité, de couleur et de brillance diversifiaient.

Des photographies numériques verticales ont été acquises après chaque mesure spectroradiométrique afin de déterminer le taux de recouvrement réel des résidus de cultures présents sur chaque parcelle. Cette vérité terrain servira à la validation des résultats obtenus lors du calcul des différents indices de résidus de cultures et lors de la cartographie par la méthode des réseaux de neurones. Tel que démontré à la figure 3.5, nous avons classifié les photographies verticales des résidus de cultures à l'aide du module IsoData du système de traitement d'image de PCI. Nous avons

normalement effectué une classification comprenant trois classes distinctes, soient celle des résidus de cultures, des sols nus et des sols ombrés.

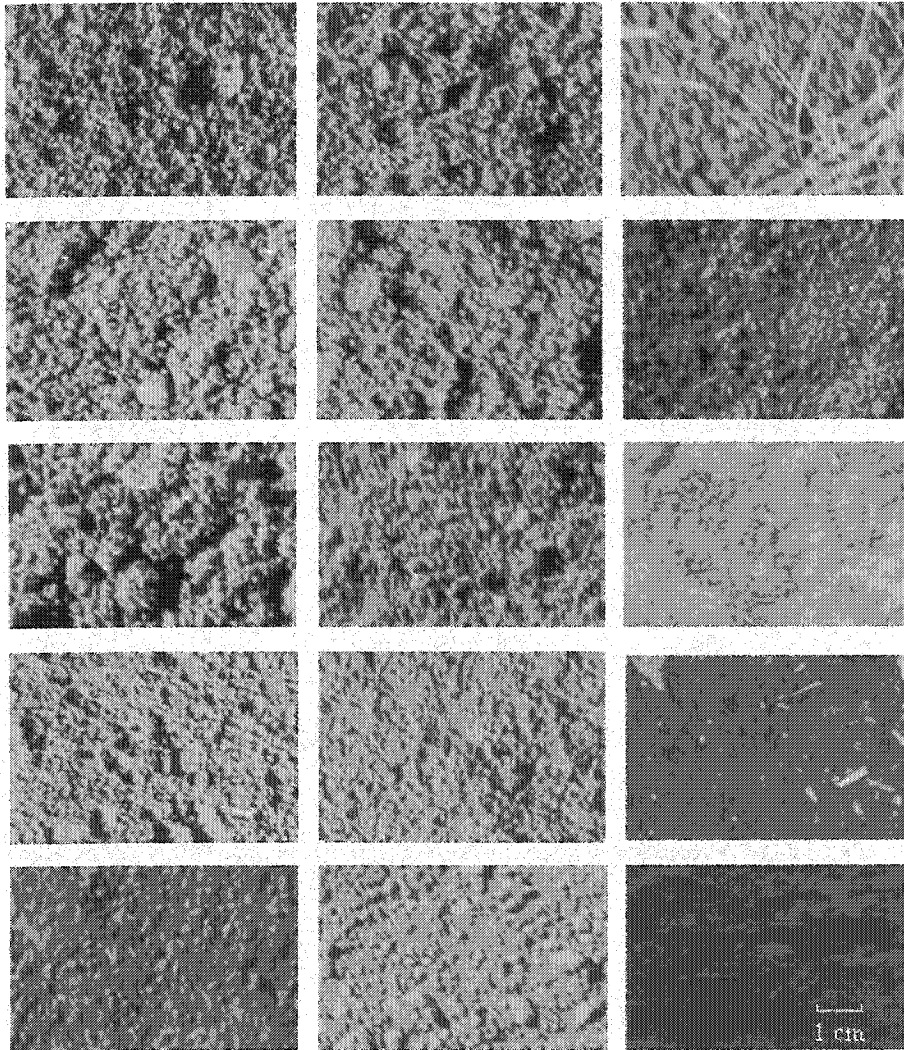


Figure 3.3: Photographies verticales de différents types de sols nus à différents taux d'humidité, de rugosité, de couleur et de brillance (Indian Head, 3 juillet 2000).

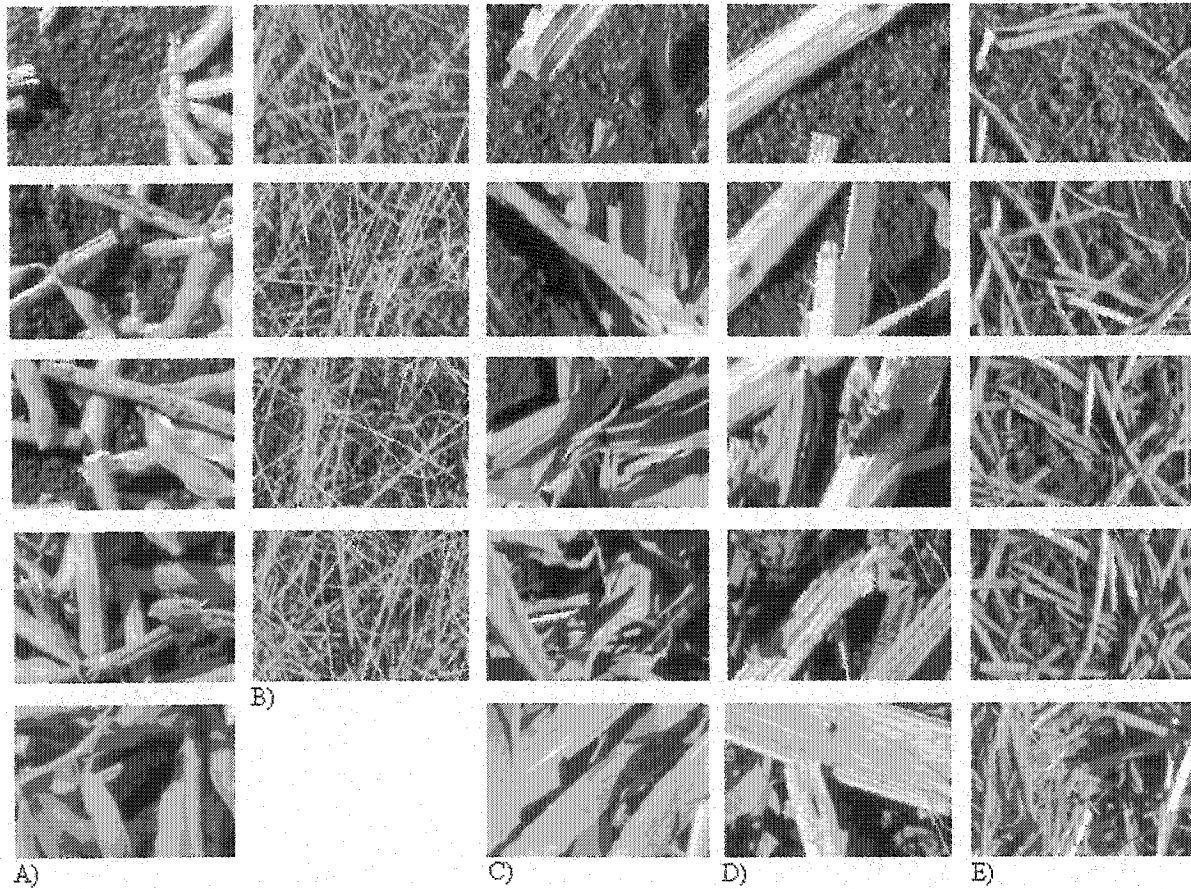
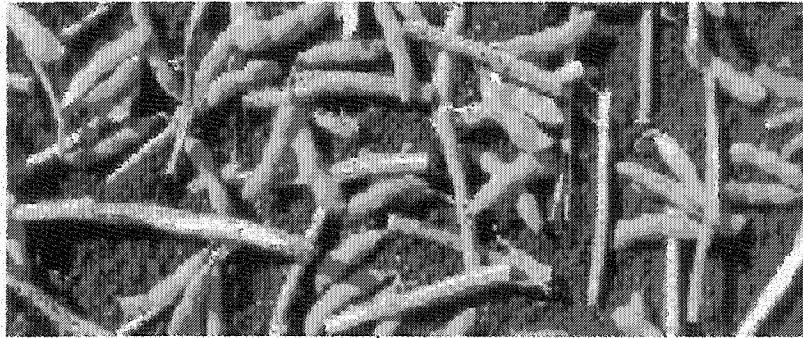
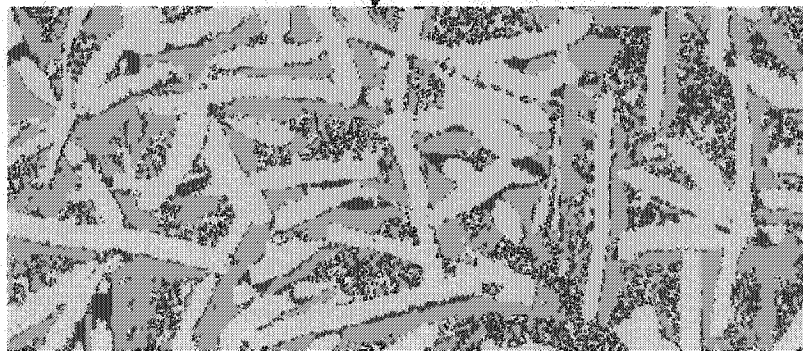


Figure 3.4: Photographies verticales des résidus de soja (A); d'herbe (B); de maïs (C); de tournesol (D) et de blé (E) à différents taux de couverture (Lennoxville, 10 octobre 1999).



Photographie numérique brute



Photographie numérique classifiée

Figure 3.5: Photographie verticale classifiée avec le module IsoData de PCI afin de déterminer le taux réel de recouvrement des résidus (résidus = jaune (51,7 %); sol nu = vert (37,8 %); sol nu avec ombre = bleu (10,5 %)).

3.3.2 Acquisition des images aéroportées

Les images hyperspectrales ont été acquises le mercredi 28 juin 2000 à l'aide du capteur aéroporté Probe-1. Celui-ci a été conçu et créé par la compagnie "Integrated Spectronics" pour aider au ESSI (*Earth Search Sciences Incorporated*). C'est un capteur hyperspectral couvrant les régions du visible, du proche et du moyen infrarouge (0,40 à 2,5 μm) dans 128 bandes. L'instrument utilise quatre spectromètres de 32 bandes chacun pour couvrir ces différentes régions spectrales. La largeur des bandes varie entre 15 à 20 nm. Le FOV de ce capteur est de 60°, tandis que l'IFOV (*Instantaneous Field of View*) est entre 2,0 et 2,5 mrad (voir tableau 3.1 pour spécifications du

capteur). Afin de minimiser les distorsions géométriques dues aux mouvements de l'avion, le capteur a été monté sur un gyrostabiliseur selon les trois axes. Le Probe-1 est considéré comme étant un capteur à balayage qui collecte les données par numérisation opto-mécanique ainsi que par direction le long de la voie par mouvements de plate-forme aéroportée. Le Probe-1 peut voler à différentes altitudes selon la résolution spatiale voulue (entre 1 et 10 m) et la trace au sol souhaitée (1 à 16 km). Nos images ont été acquises à une altitude de 2500 m avec une résolution spatiale de 5 m assurant une trace au sol de 3 km de large.

Tableau 3.1: Spécifications du capteur aéroporté hyperspectral Probe-1

Spécifications générales du Probe-1		
Capteur aéroporté hyperspectral		
Spécifications spatiales		
IFOV: 2,5 mrad (le long de la trace) 2,0 mrad (à travers la trace)		
FOV: 60 degrés		
Résolution spatiale: 5 m, 2,5 km de largeur a 2500 m		
Spécifications spectrales		
Région du spectre	Portée spectrale	Intervalle spectral
Visible	0,440-0,880 μm	16 nm
PIR	0,881-1,335 μm	13 nm
MIR 1	1,400-1,813 μm	12 nm
MIR 2	1,950-2,543 μm	16 nm

3.4 Pré-traitements des images

Les pré-traitements des images ont été fait à partir du système ISDAS (*Imaging Spectrometer Data Analysis System*). Ce système a été conçu et développé au Centre canadien de Télédétection pour le traitement et l'analyse des données hyperspectrales (Staenz *et al.*, 1997). Les pré-traitements et la standardisation des images consistent en l'étalonnage radiométrique du capteur et aux corrections atmosphériques des données images.

Pour l'étalonnage radiométrique propre au capteur, des spectres au sol furent mesurés simultanément au moment de l'acquisition des images. Un stationnement composé uniquement d'asphalte d'une grandeur d'environ 35 X 20 m fut sélectionné comme site d'étalonnage et une série de mesures de réflectances fut mesurée sur cette surface à l'aide du spectroradiomètre GER-3700. La moyenne de cinq spectres a été convoluée avec la réponse du profil Gaussien pour égaler la largeur des bandes et le centre des bandes du capteur Probe-1. Le site d'étalonnage a par la suite été localisé sur l'image et une série de spectres a été extraite de l'image. Les spectres du capteur Probe-1 ont été comparés avec les spectres moyens du GER-3700 en tenant compte des corrections atmosphériques. Le paramètre portant sur l'épaisseur atmosphérique et la concentration de la vapeur dans l'atmosphère furent mesurés à l'aide du photomètre solaire Mricrotops-II. La différence entre les deux spectres a été calculée et les coefficients d'étalonnage radiométrique du capteur Probe-1 ont été calculés. Ce processus a été calculé avec le système ISDAS par une technique numérique itérative ajustant les coefficients d'étalonnage radiométrique du Probe-1 dans le but de minimiser la différence des réflectances absolues entre les spectres mesurés au sol et ceux tirés de l'image Probe-1 à moins de 0,02 % (Secker *et al.*, 2001). Ceci a par la suite été appliqué aux données numériques brutes pour calculer les réflectances au sol. Les bandes situées à 895 et 908 nm ont été supprimées, car elles contenaient du bruit dû à leur position près du détecteur du proche infrarouge. Ceci a laissé un vide entre 903 nm (situé à la fin du visible) à 929 nm.

3.5 Conclusions

En conclusion, le choix du site d'étude est bon, car il est représentatif des prairies canadiennes, où l'économie est principalement basée sur l'agriculture. Quant aux mesures

spectroradiométriques, elles ont toutes été obtenues dans un environnement contrôlé, où différents paramètres ont été notés (hauteur entre la cible et la lentille, le FOV, la surface de mesure, les caractéristiques des sols nus, les caractéristiques des résidus, les taux de recouvrement des résidus). Les conditions atmosphériques lors de l'acquisition des images aéroportées du capteur Probe-1 étaient favorables. De plus, les pré-traitements des images (étalonnage radiométrique et corrections atmosphériques) ont été fait minutieusement par le système ISDAS.

Chapitre 4: Analyse des résultats

4.1 Introduction

Les résultats de cette thèse de maîtrise seront divisés en cinq sections distinctes. Tout d'abord, la première partie porte sur l'extraction des spectres des résidus de cultures mesurés au sol. La seconde partie est sur l'extraction des spectres de réflectances de l'image Probe-1. La troisième partie consiste en l'analyse du potentiel de l'hyperspectrale pour la distinction entre les résidus de cultures et les sols nus sous-jacents. En d'autres mots, cette partie du travail porte sur la mise au point des canaux les plus performants du capteur aéroporté hyperspectral Probe-1 en matière de distinction entre les résidus et les sols nus sous-jacents. La quatrième section des résultats traite de la mise au point de l'indice des résidus de culture le plus performant pour l'estimation du taux de couverture des résidus de cultures. La cinquième et dernière section des résultats repose sur l'utilisation de la méthode des réseaux de neurones pour la cartographie et l'estimation du taux de couverture des résidus de cultures en comparaison aux méthodes basées sur les indices de résidus.

4.2 Analyse des spectres mesurés au sol

Tel que mentionné précédemment, plusieurs mesures de réflectances de différents types de résidus de cultures à divers taux de couverture ont été prises à l'aide de l'instrument GER-3700. En effet, une série de mesures de résidus de maïs, de blé, d'herbe, de soja et de tournesol à différents taux de couverture a été prise. Étant donné l'espace requis pour présenter ces différents spectres, veuillez prendre note que la majorité des graphiques représentant ces spectres est située en annexe 1. Portons notre attention quelques instants sur la figure 4.1 représentant le spectre du résidu de blé à différents taux de couverture des résidus. Il est intéressant d'observer que les réflectances du résidu

de blé augmentent en fonction de l'augmentation du taux de couverture des résidus. En d'autres termes, plus le taux de recouvrement est élevé, plus la réflectance est grande. Les signatures spectrales des résidus montrent une augmentation constante dans le visible (400 à 700 nm) et dans le début du proche infrarouge (760 à 900 nm) suivie d'un pseudo-palier dans le proche infrarouge entre 1000 et 1300 nm. Ensuite, la réflectance diminue subitement entre 1367 à 1450 nm dans le moyen infrarouge. Cette intense diminution est marquée par une bande d'absorption de l'eau à 1450 nm. Par la suite, les signatures spectrales sont marquées par un deuxième pseudo-palier entre 1570 à 1810 toujours dans le moyen infrarouge. Notons, cependant, la présence d'un pic d'absorption de la lignine à 1650 nm. Entre 1810 nm à 1950 nm, une série de pics qui sont dus en partie à l'instabilité du spectroradiomètre GER-3700 à ces différentes zones précises et à la présence des perturbations atmosphériques. Par contre, nous pouvons apercevoir une deuxième bande d'absorption de l'eau à 1950 nm. Suite à la première série de pics, la réflectance diminue dans le moyen infrarouge jusqu'à la fin du spectre. Cependant, notons la présence d'une bande d'absorption de la cellulose à 2100 nm et d'une autre bande d'absorption de la lignine à 2330 nm. La figure 4.2 montre la présence d'une bande d'absorption de l'eau à 1450 nm; une bande d'absorption de la cellulose à 2100 nm; et deux bandes d'absorption de la lignine à 1680 nm et 2330 nm. Par ailleurs, le spectre du sol nu, tel que présenté à la figure 4.1, croît légèrement dans le visible (400 à 700 nm) suivi d'un long pseudo-palier dans le proche infrarouge (700 à 1300 nm) et dans le moyen infrarouge (1300 à 2400 nm). Notons encore une fois, la présence de deux bandes d'absorption de l'eau à 1450 nm et à 1950nm.

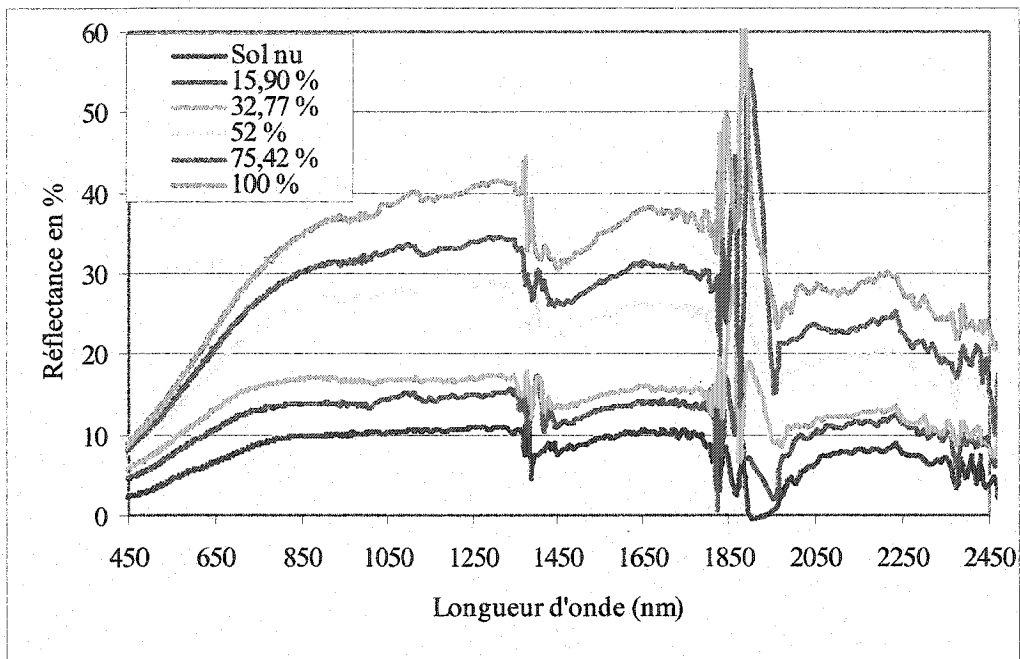


Figure 4.1: Spectres de résidus de blé à différents taux de couverture et spectre du sol nu mesurés à l'aide du spectroradiomètre GER-3700.

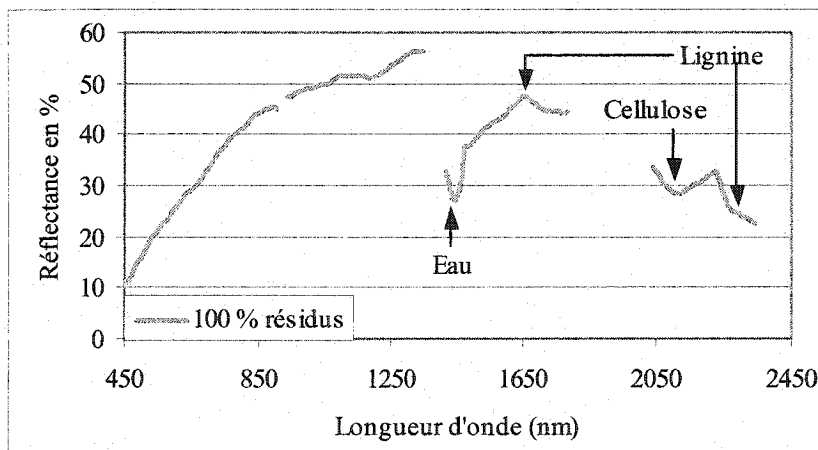


Figure 4.2: Spectre des résidus de blé à 100 % extrait de l'image hyperspectrale Probe-1 montrant les différentes bandes d'absorption.

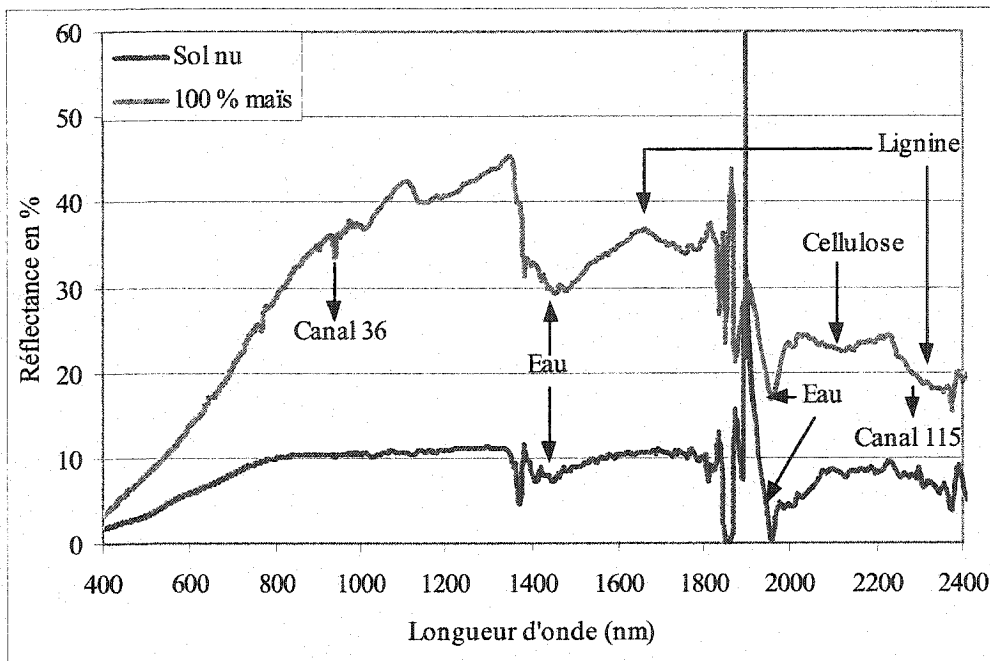


Figure 4.3: Spectre du résidu de maïs à un taux de couverture de 100 % et spectre du sol nu mesurés à l'aide du spectroradiomètre GER-3700.

La figure 4.3 montre le spectre du résidu de maïs à un taux de couverture de 100 % et celui du sol nu. Le résidu de maïs est très clair et loin d'être totalement décomposé, tandis que le sol est moyennement humide et de couleur foncée tirant vers le noir. En observant le spectre du maïs, nous constatons qu'il ressemble à celui du blé ayant un taux de couverture de 100 % (figure 4.1). Cependant, le but de ce graphique n'est pas de démontrer ce fait, mais plutôt d'attirer notre attention sur la grande différence entre le spectre du résidu de maïs non dégradé à un taux de couverture de 100 % et celui du sol nu pour la discrimination entre les résidus et les sols. La comparaison des spectres de la figure 4.3 laisse sous-entendre que le comportement spectral entre le résidu et le sol nu est quelque peu semblable dans le visible (400 à 700 nm). Au-delà du visible, on note une très grande différence dans le proche infrarouge (700 à 1300 nm). Effectivement, dans le proche infrarouge, le spectre du sol est plutôt stable, tandis que le spectre du résidu est croissant. La

différence est également remarquable dans le moyen infrarouge (1300 à 2400 nm). Encore une fois, le spectre du sol nu est plutôt stable, tandis que celui des résidus est décroissant. Notons, cependant, qu'il serait très difficile de différencier les résidus de sols nus entre 1800 à 2000 nm, car il s'agit de pics d'absorption, notamment celui de l'eau à 1950 nm.

La figure 4.4 démontre les spectres de différents résidus de cultures (maïs, blé, herbe, tournesol et soja) à un taux de recouvrement de 100 %. Différents éléments peuvent influencer la réponse spectrale d'un résidu. En effet, l'humidité, la couleur, la brillance, le stade de dégradation et la nature du résidu peuvent avoir une grande influence sur sa mesure spectrale. Par exemple, plus un résidu est humide, de couleur foncé et dans un stade de dégradation élevé, plus la réflectance de ce dernier sera basse. Bien que la réflectance des spectres soit plus élevée pour certains résidus, il n'en demeure pas moins que l'allure des spectres se ressemble. Les signatures spectrales des résidus accroissent dans le visible (400 à 700 nm) et dans le début du proche infrarouge (760 à 900 nm) suivies d'un pseudo-palier dans le proche infrarouge entre 1000 et 1300 nm. Par la suite, elles diminuent entre 1367 à 1450 nm dans le moyen infrarouge en raison de la bande d'absorption de l'eau. Nous pouvons identifier un second pseudo-palier entre 1500 à 1800. Par contre, ce palier est marqué par un pic d'absorption de la lignine à 1650 nm. Mis à part quelques pics nuisibles vers 1800 nm, nous pouvons observer une tendance décroissante dans le moyen infrarouge jusqu'à 2400 nm. La présence d'une bande d'absorption de la cellulose vers 2100 nm et d'une autre bande d'absorption de la lignine vers 2330 nm sont également visibles. Il est tout à fait normal que différents résidus à un même taux de couverture aient un comportement spectral similaire, car la réflectance de ces derniers dépendent des caractéristiques d'absorption de ses matériaux constitutifs, tels la lignine et

la cellulose. Les réflectances du soja sont plus basses que celles du maïs, du blé et de l'herbe, surtout dans le proche et dans le moyen infrarouge. De plus, les réflectances du tournesol sont plus basses que celles du maïs, du blé et de l'herbe, notamment dans le visible et dans le proche infrarouge. En somme, les réflectances des résidus foncés, tels le soja et le tournesol, sont nettement plus basses que celles des résidus de couleurs claires. De plus, le stade de dégradation relativement élevé des résidus de tournesol peut avoir influencé à la baisse sa mesure spectrale, car lorsque le stade de décomposition d'un résidu est élevé, il devient difficile de le différencier d'un sol nu. En ce qui concerne les résidus de cultures du maïs, du blé et de l'herbe, affirmons qu'ils sont plus clairs et ont par le fait même des mesures de réflectance plus élevées.

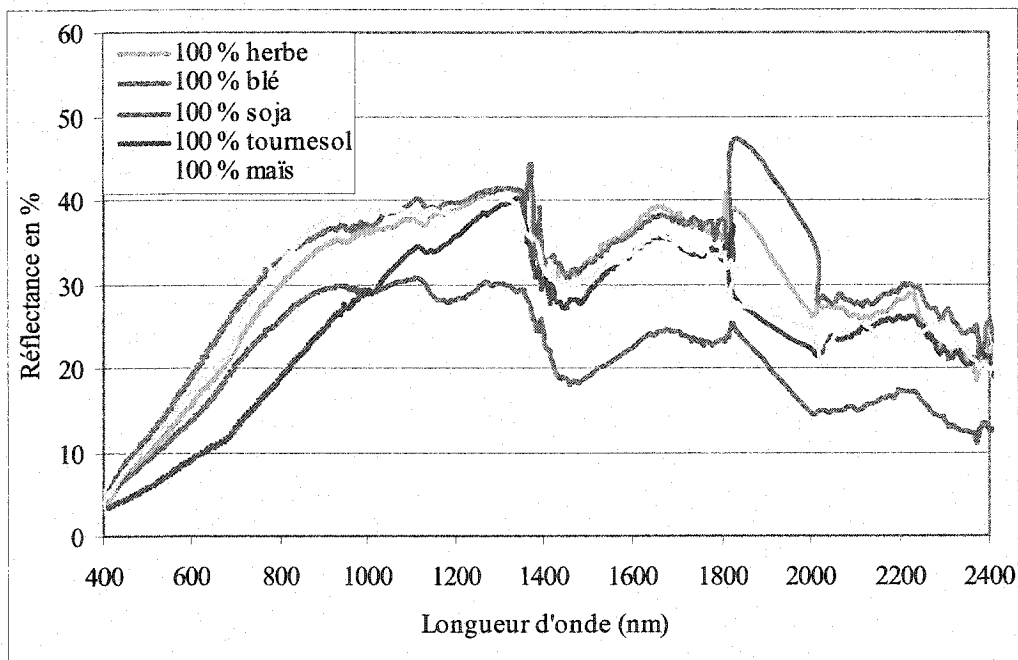


Figure 4.4: Spectres des résidus d'herbe, blé, soja, tournesol et maïs à un taux de recouvrement de 100 % mesurés à l'aide du spectroradiomètre GER-3700.

En guise de conclusion, différents points peuvent être soulignés. Tout d'abord, la réflectance d'un résidu augmente en fonction de l'augmentation de son taux de couverture. Par ailleurs, différents éléments (couleur, brillance, nature, stade de dégradation et humidité) peuvent influencer le comportement spectral des résidus. Tous les résidus (maïs, blé, herbe, soja et tournesol) utilisés au cours de cette étude ont eu les mêmes bandes d'absorption, notamment celles de l'eau à 1450 nm; de la lignine à 1650 nm et à 2330 nm; et de la cellulose à 2100 nm. En observant le comportement spectral des résidus de cultures et des sols nus, trois zones distinctes semblent plus efficaces pour différencier ces deux composantes. On y retrouve une zone dans le proche infrarouge (700 à 1300 nm) et deux zones dans le moyen infrarouge (1300 à 1800 nm et entre 2000 à 2400 nm).

4.3 Extraction des spectres de réflectances de l'image Probe-1

Plusieurs spectres de réflectances ont été extraits de l'image aéroporté Probe-1. Pour chaque parcelle ayant les mêmes caractéristiques, telle le même taux de recouvrement des résidus de cultures, plusieurs spectres de réflectances ont été extraits pour ainsi être en mesure de bien calculer la moyenne des spectres des pixels composant l'image. La figure 4.5 montre trois éléments distincts, soit une image hyperspectrale de la région d'étude, une photographie de la parcelle ainsi que le spectre de celle-ci extrait à partir de l'image. Ce spectre est celui d'un résidu de blé ayant un taux de couverture de 100 %. Il ressemble à celui mesuré au sol à l'aide du spectroradiomètre GER-3700. La signature spectrale augmente sans cesse dans le visible (400 à 700 nm) et dans le proche infrarouge (700 à 1300 nm) pour atteindre une réflectance maximale de 55 %. Par la suite, la réflectance diminue subitement en dessous de 30 % entre 1370 à 1450 nm. Cette diminution est le résultat de la bande d'absorption de l'eau à 1450 nm. Ensuite, le spectre augmente dans le moyen

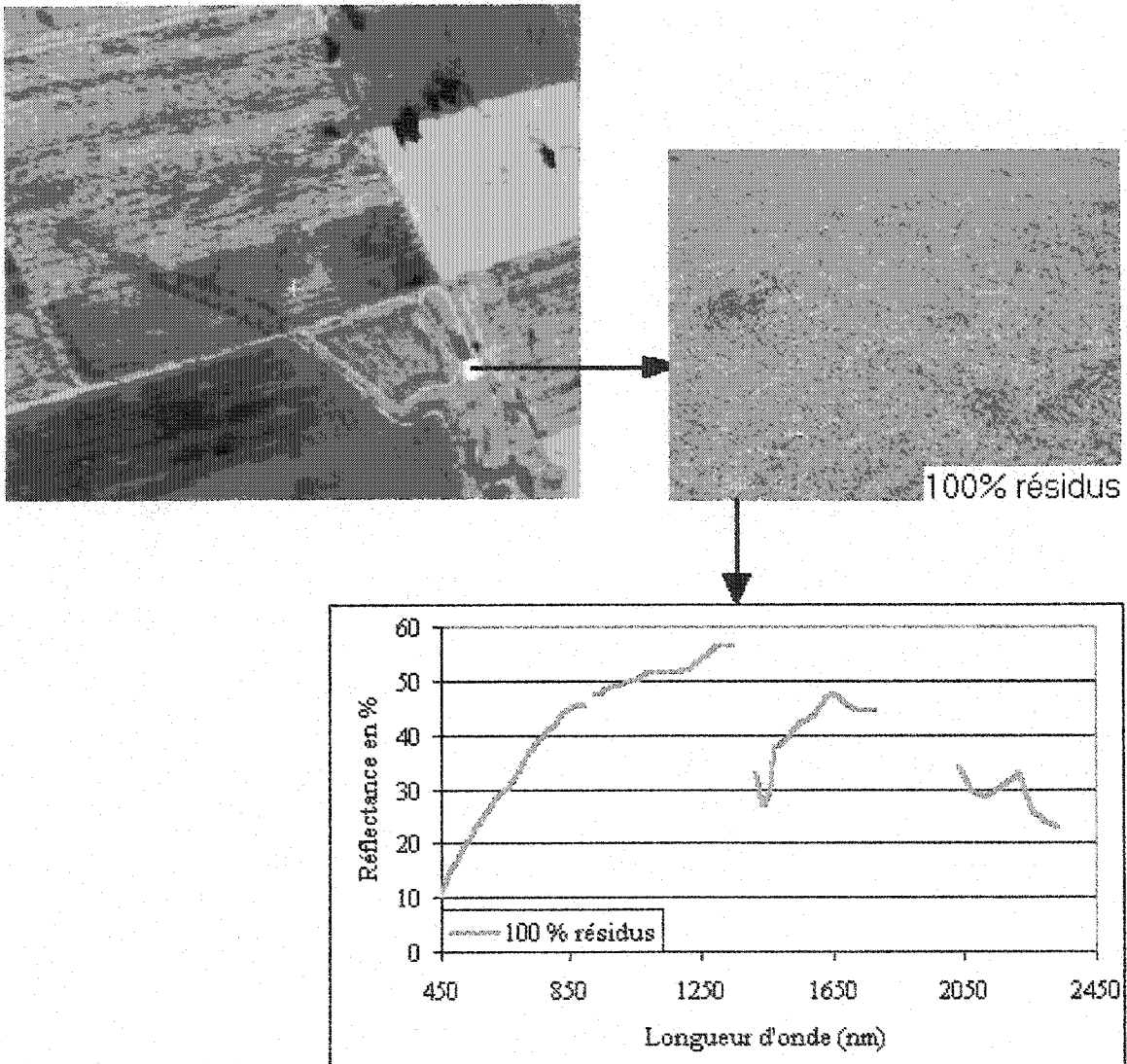


Figure 4.5: Image hyperspectrale du site d'étude, photographie de la parcelle ayant un taux de couverture de 100 % de résidus de blé et le spectre de cette parcelle extrait à partir de l'image.

infrarouge entre 1460 nm et 1800 nm. Notons la présence d'un pic d'absorption vers 1650 nm. Il s'agit d'un pic d'absorption de la cellulose. Pour ce qui est de la région du moyen infrarouge entre 1900 nm à 2350 nm, rapportons que la tendance est vers la baisse pour atteindre une réflectance de 22 %. Constatons la présence de deux bandes d'absorption vers 2100 nm et 2330 nm. Ces dernières sont dues à la cellulose (2100 nm) et à la lignine (2330 nm), respectivement. Mentionnons que certaines parties du spectre, plus précisément à 900 nm, entre 1340 nm à 1410 nm et entre 1780 nm à 2030 nm ne montrent aucune information en raison de la présence des perturbations atmosphériques.

Pour sa part, la figure 4.6 démontre, encore une fois, une image hyperspectrale de la région d'étude, une photographie d'une parcelle de sol nu ainsi que le spectre de celle-ci extrait à partir de l'image. En observant le spectre du sol nu, force est de constater que ce dernier fluctue moins que celui des résidus de cultures, car les réflectances s'étendent entre 5 % à 16 %. Il croît légèrement dans le visible (400 nm à 700 nm) et dans une partie du proche infrarouge (700 nm à 900 nm) suivie d'un long pseudo-palier dans le proche infrarouge (900 nm à 1300 nm) et dans le moyen infrarouge (1300 nm à 2350 nm). Signalons encore une fois la présence de la bande d'absorption de l'eau vers 1450 nm. Tout comme lors de la figure précédente, trois parties du spectre ont été éliminées. Le sol utilisé lors des mesures était sombre et humide, ce qui a résulté en un spectre d'amplitude faible, mais cette amplitude augmente progressivement au fur et à mesure que le sol devient clair et sec.

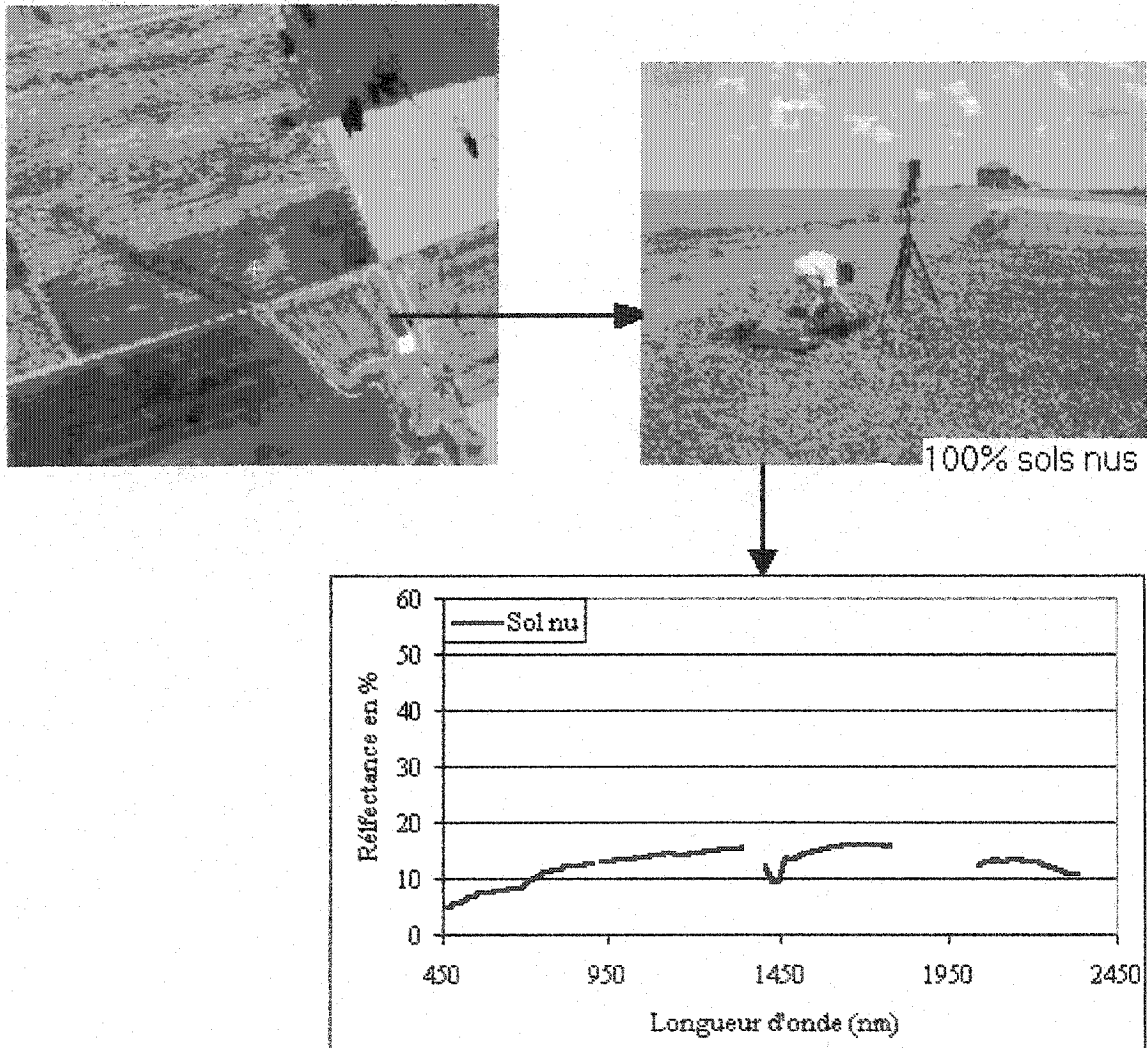


Figure 4.6: Image hyperspectrale du site d'étude, photographie d'une parcelle de sol nu et spectre extrait à partir de l'image.

La figure 4.7 représente le spectre des résidus de cultures de blé ayant un taux de couverture de 20, 40, 50, 90 et 100 %, ainsi que le spectre d'un sol nu extrait de l'image hyperspectrale. Notons que les réflectances augmentent toujours sans exception en fonction de l'augmentation du taux de couverture des résidus. Effectivement, les mesures de réflectances du sol nu sont toujours les plus basses, suivies des réflectances des résidus à 20 % de couverture, suivies des résidus à 40 % de couverture, suivies des résidus à 50 % de couverture, suivies des résidus à 90 % de couverture et finalement suivies des résidus à 100 % de couverture. La réflectance du sol nu augmente légèrement dans le visible et dans une partie du proche infrarouge, plus précisément jusqu'à 900 nm. De là, la réflectance entre dans un pseudo-palier entre 900 nm à 2350 nm où elle atteint son apogée d'environ 17 % à 1700 nm. À 1450 nm, nous remarquons la présence de la bande d'absorption de l'eau. Étant donné que l'allure de la courbe des réflectances des résidus à différents taux de recouvrement se ressemble, veuillez prendre note que la description détaillée du spectre des résidus sera faite une seule fois. Alors la signature spectrale des résidus à différents taux de recouvrement augmente dans le visible (400 nm à 700 nm) ainsi que dans le proche infrarouge (700 nm à 1300 nm). Ensuite, elle diminue vers 1450 nm en raison de la bande d'absorption de l'eau. Par la suite, la réflectance augmente dans la première partie du moyen infrarouge, c'est-à-dire entre 1460 nm à 1780 nm, pour diminuer de nouveau dans la deuxième partie du moyen infrarouge, plus précisément entre 2030 nm à 2340 nm. Notons la présence d'un pic d'absorption de la lignine vers 1650 nm pour les résidus ayant un taux de recouvrement supérieur à 40 %. Une bande d'absorption de la cellulose vers 2100 nm et une bande d'absorption de la lignine à 2330 nm sont également visibles pour les résidus ayant un taux de couverture supérieur à 40 %.

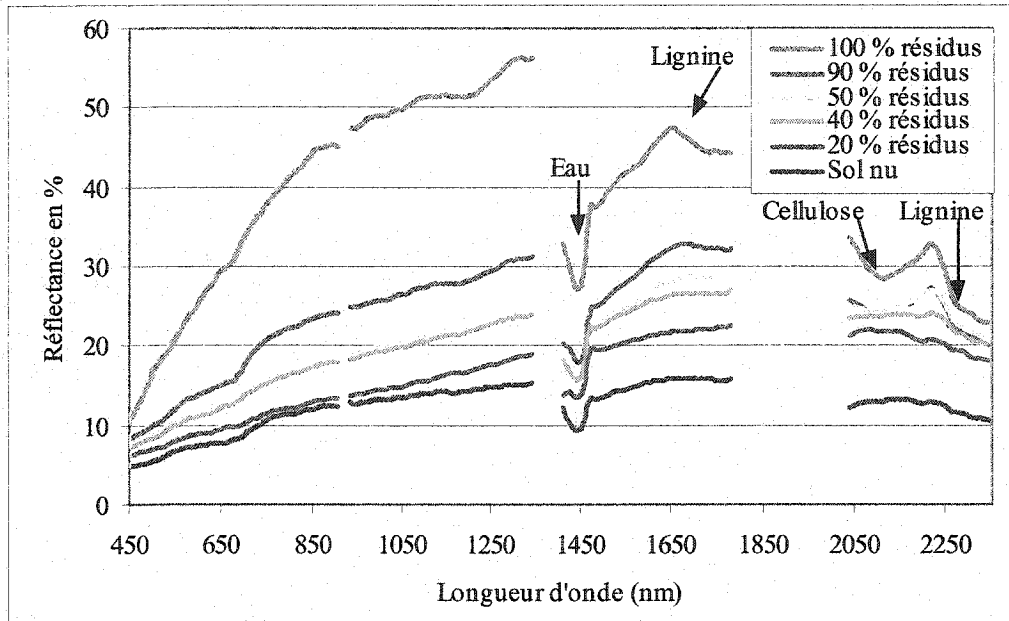


Figure 4.7: Spectres des résidus de blé ayant un taux de recouvrement de 20, 40, 50, 90 et 100 % ainsi qu'un spectre du sol nu extrait d'une image hyperspectrale du capteur Probe-1.

La figure 4.8 illustre les spectres de réflectances des résidus de blé à 100 % et du sol nu extraits de l'image Probe-1 et ceux mesurés à partir du GER3700. Cette figure démontre que la réflectance des sols nus est sensiblement la même pour les spectres extraits de l'image et ceux mesurés à partir du spectroradiomètre GER3700. Ces deux courbes de réflectances sont très semblables et nous pouvons apercevoir une bande d'absorption de l'eau à 1450 nm pour les deux courbes. Les réflectances des résidus à 100 % obtenues à l'aide du Probe-1 et du GER3700 montrent également une similarité. Par exemple, elles ont une bande d'absorption de l'eau à 1450 nm, une bande d'absorption de la cellulose à 2100 nm et deux bandes d'absorption de la lignine vers 1680 nm et 2330 nm. Par contre, la réflectance des résidus de blé à un taux de recouvrement de 100 % obtenue par le Probe-1 est supérieure d'environ 10 % dans le visible (400 nm à 700 nm), dans le proche infrarouge (760 nm à 1300 nm) et au début du moyen infrarouge (jusqu'à 1800 nm). Cette

différence est due au fait que les données du Probe-1 ont été soumises à des corrections atmosphériques, tandis que celles du GER3700 n'ont pas été soumises à de telles corrections. De plus, la nature des résidus n'est pas la même. Par exemple, ceux sur l'image hyperspectrale sont plus jeunes, plus brillants et de couleurs plus claires. Par contre, les résidus de blé utilisés lors des mesures de réflectances du GER3700 sont relativement plus vieux, moins brillants et moins clairs. Entre 2035 nm et 2350 nm la différence entre les deux spectres diminue à environ 3 %.

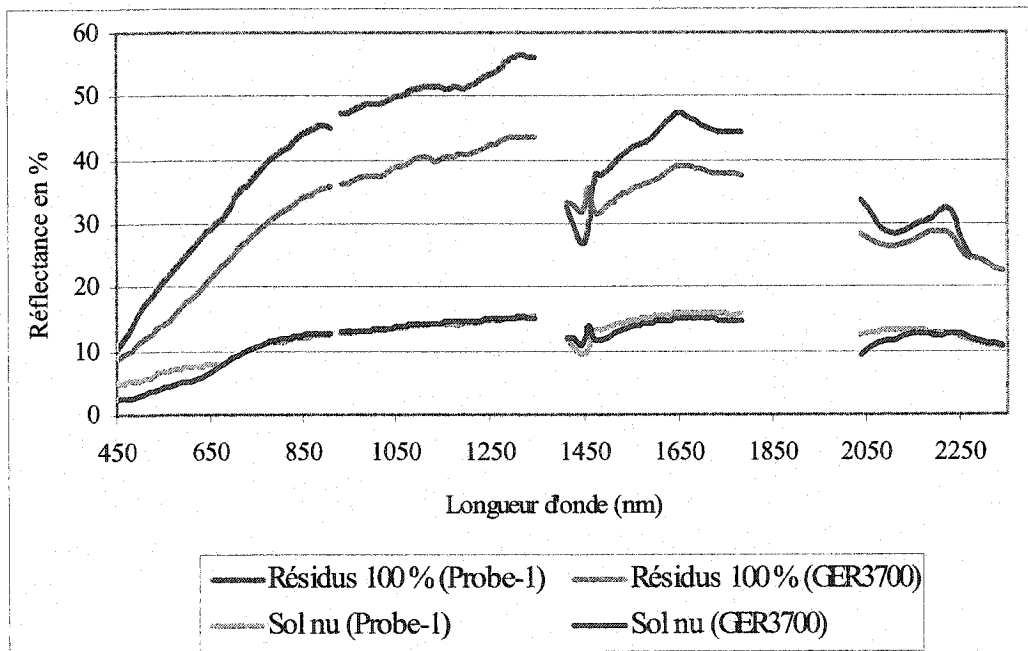


Figure 4.8: Spectres des résidus à 100 % et du sol nu extraits l'image Probe-1 ainsi que spectres des résidus à 100 % et du sol nu mesurés à l'aide du GER3700.

En somme, divers points méritent d'être récapitulés. Dans un premier temps, les résultats obtenus par le capteur Probe-1 démontrent que les réflectances d'un résidu augmentent en fonction de l'augmentation de son taux de couverture. Autrement dit, plus le taux de couverture des résidus

est élevé, plus la réflectance est grande. Dans un second temps, le taux de recouvrement des résidus n'a pas une grande influence sur la présence des bandes d'absorption. Par exemple, nous retrouvons la bande d'absorption de l'eau à 1450 nm dans tous les spectres, y compris celui du sol nu. De plus, lorsque le taux de recouvrement est supérieur à 40 %, nous retrouvons les bandes d'absorption de la lignine à 1650 nm et à 2330 nm ainsi que celle de la cellulose à 2100 nm. Cependant, plus le taux de couverture est élevé, plus les bandes d'absorption sont visibles, car la quantité de lignine et de cellulose est plus élevée lorsque le taux de recouvrement est grand. En observant le comportement spectral des résidus de cultures et celui des sols nus, trois zones distinctes semblent plus efficaces pour différencier ces deux composantes. En effet, la première zone est située dans le proche infrarouge (700 nm à 1300 nm); la seconde zone est située dans le moyen infrarouge, plus précisément entre 1470 nm à 1770 nm; et la troisième zone est située également dans le moyen infrarouge entre 2000 nm à 2340 nm.

4.4 Mise au point sur les canaux les plus performants parmi les cent dix-huit de l'image

Probe-1

Tel que mentionné précédemment, l'image acquise par le capteur aéroporté Probe-1 est composée de cent dix-huit canaux. Parmi ces derniers, il est primordial de sélectionner les plus appropriés afin de bien discriminer le sol nu des résidus de cultures. De plus, la sélection de ces bandes est très importante, car ces dernières seront utilisées ultérieurement lors de la classification de l'image par la méthode des réseaux de neurones et lors de la mise au point des indices de résidus de cultures les plus performants. Afin d'arriver à une bonne mise au point des canaux les plus performants parmi les cent dix-huit du capteur Probe-1, trois différentes étapes nécessitent une

attention particulière. Tout d'abord, nous devons vérifier la première dérivée d'un spectre de résidus à 100 % de couverture et celui d'un sol nu, afin de faire la mise au point sur les bandes ayant un meilleur pouvoir discriminant entre le sol et les résidus. Par la suite, nous analyserons la séparabilité entre les résidus de cultures et les sols nus obtenue à l'aide des mesures au sol. En troisième étape, nous analyserons la séparabilité entre les résidus de cultures et les sols nus obtenus à l'aide de l'image Probe-1. Cette étape comprend l'analyse de la séparabilité des scattogrammes ainsi que l'analyse des coefficients de séparabilité.

4.4.1 Analyse de la première dérivée pour la sélection des canaux

La première dérivée du spectre est généralement utilisée pour isoler les bandes d'absorption en accentuant les changements de la pente des réflectances. En d'autres termes, la première dérivée des résidus de cultures sert d'indicateur afin de vérifier les endroits du spectre marqués par un changement. Celui-ci prouve la sensibilité des canaux qui discriminent le mieux les sols nus des résidus de cultures. En observant la première dérivée du blé à un taux de couverture de 100 % ainsi que celle du sol nu, nous tenterons de vérifier quels canaux du capteur Probe-1 sont plus sensibles pour discriminer les résidus des sols nus. Étant donné la présence dominante des résidus de blé sur les terres étudiées à partir de l'image hyperspectrale, notons que la description de la première dérivée se limitera à ce résidu. Comme décrit dans la section précédente, trois régions du spectre semblent plus adéquates pour distinguer les résidus de cultures des sols nus. Effectivement, la première section est située dans le proche infrarouge, c'est-à-dire entre 700 nm à 1300 nm; la seconde section est située dans le moyen infrarouge, plus précisément entre 1470 nm à 1770 nm; et finalement la

troisième section est située également dans le moyen infrarouge entre 2000 nm à 2340 nm. L'analyse de la première dérivée sera donc concentrée sur ces trois sections du spectre.

La figure 4.9 montre le spectre des résidus de blé à un taux de recouvrement de 100 % ainsi que celui du sol nu entre 700 nm à 1300 nm. Cette figure ne dégage aucune information pertinente. Par contre, la figure 4.10 représentant la première dérivée des résidus et du sol nu dans cette région du spectre, met en évidence le pouvoir discriminatoire de plusieurs canaux. Les canaux 21 (727,80 nm à 743,80nm), 25 (788,8 nm à 805 nm), 26 (803,65 nm à 820,55 nm), 36 (935,15 nm à 950,85 nm), 39 (984,5 nm à 998,9 nm), 42 (1026,15 nm à 1045,85 nm), 50 (1149,2 nm à 1164,8 nm), 52 (1178,3 nm à 1194,5 nm), 56 (1235,8 nm à 1251,6 nm) et 60 (1292,65 nm à 1308,15 nm) semblent être sensibles pour distinguer les résidus de cultures des sols nus. En effet, on peut apercevoir des pics de changement de la première dérivée des résidus, tandis que celle du sol nu est stable à ces différentes longueurs d'onde.

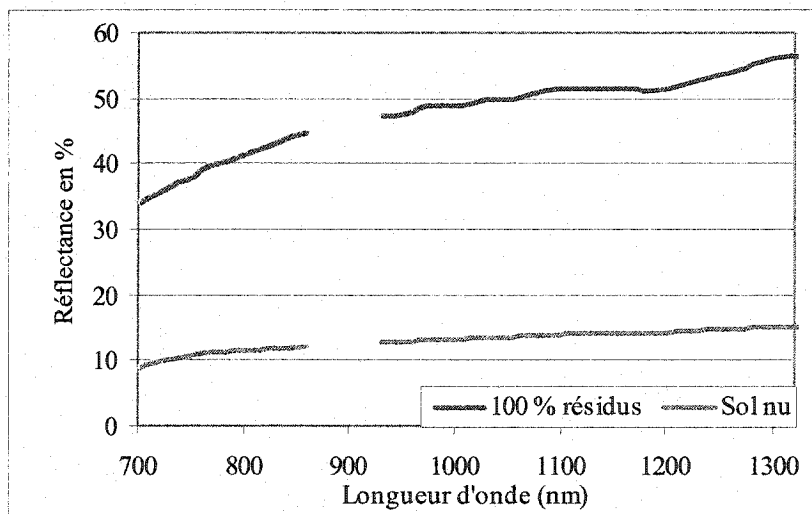


Figure 4.9: Spectres de réflectances des résidus de blé à un taux de couverture de 100 % et du sol nu dans le proche infrarouge (700 nm à 1320 nm).

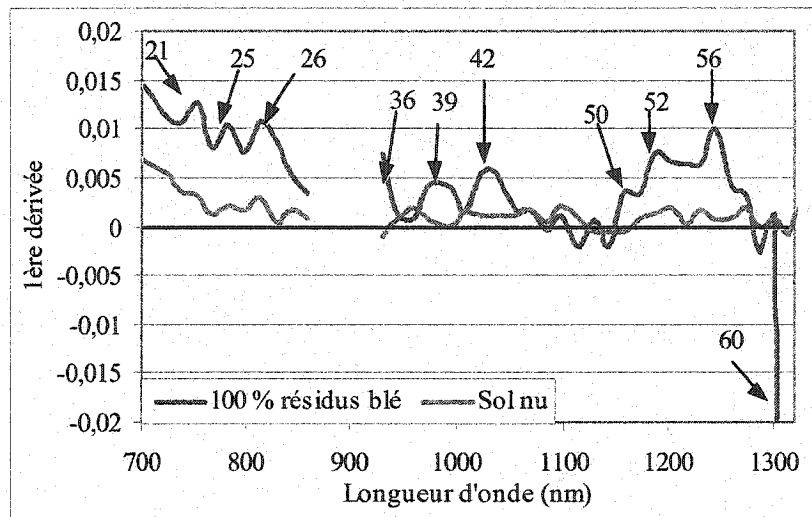


Figure 4.10: Première dérivée des spectres des résidus de blé à un taux de couverture de 100 % et du sol nu dans le proche infrarouge (700 nm à 1320 nm).

Pour sa part, la figure 4.11 illustre les spectres de réflectances des résidus de blé à un taux de recouvrement de 100 % et du sol nu entre 1470 nm à 1770 nm, où aucune information intéressante ne peut être tirée. Par contre, la figure 4.12 montre la première dérivée des résidus et du sol nu dans cette région du moyen infrarouge. Cette figure nous permet de constater que les canaux 70 (1460,45 nm à 1476,35 nm), 77 (1557,05 nm à 1572,15 nm) et 84 (1648,5 nm à 1663,1 nm) montrent une moyenne sensibilité, ce qui peut corroborer l'hypothèse de la sensibilité de ces canaux à la présence des résidus et des sols nus. Ajoutons que dans tout le spectre (1470 nm à 1770 nm), la première dérivée du sol nu est très stable. Par ailleurs, la première dérivée des résidus de blé au canal 92 (1748,5 nm à 1762,5 nm) témoigne d'une forte fluctuation, ce qui maintient l'hypothèse de la sensibilité de ce canal pour distinguer les résidus de cultures des sols nus.

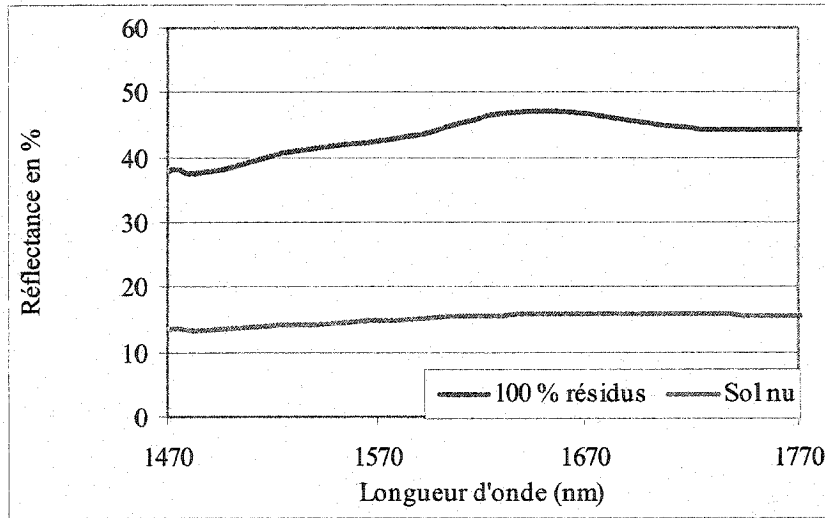


Figure 4.11: Spectres de réflectances des résidus de blé à un taux de couverture de 100 % et du sol nu dans le moyen infrarouge (1470 nm à 1770 nm).

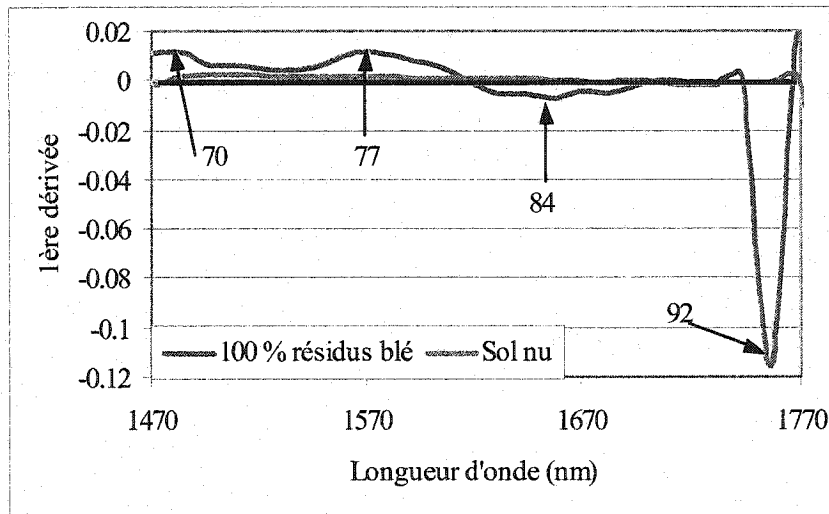


Figure 4.12: Première dérivée des spectres des résidus de blé à un taux de couverture de 100 % et du sol nu dans le moyen infrarouge (1470 nm à 1770 nm).

La figure 4.13 présente les spectres de réflectances des résidus de blé à un taux de recouvrement de 100 % et celui du sol nu entre 2000 nm à 2340 nm, tandis que la première dérivée des résidus de cultures et celle du sol nu sont représentées à la figure 4.14. En portant notre attention à cette figure, nous pouvons constater que les canaux 98 (1987,4 nm à 2008,6 nm), 101 (2044,05 nm à 2065,35 nm), 104 (2099,65 nm à 2119,75 nm), 107 (2153,75 nm à 2173,85 nm), 110 (2206,95 nm à 2226,05 nm) et 115 (2294,05 nm à 2311,95 nm) paraissent sensibles pour bien discriminer les résidus de cultures des sols nus, car à ces longueurs d'onde, la première dérivée des résidus fluctue, tandis que celle du sol nu est plutôt stable.

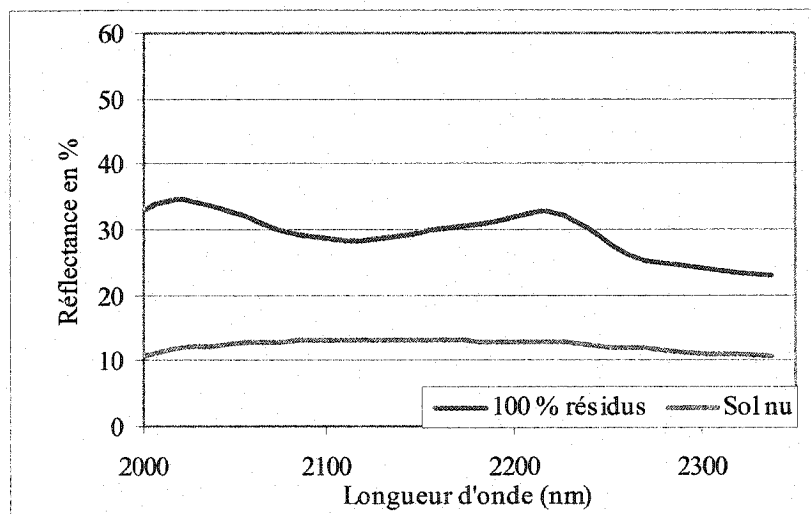


Figure 4.13: Spectres de réflectances des résidus de blé à un taux de couverture de 100 % et du sol nu dans le moyen infrarouge (2000 nm à 2340 nm).

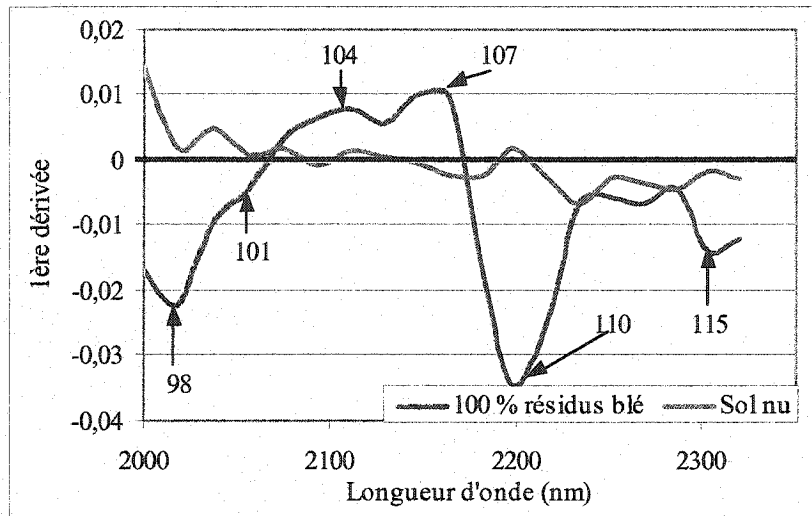


Figure 4.14: Première dérivée des spectres des résidus de blé à un taux de couverture de 100 % et du sol nu dans le moyen infrarouge (2000 nm à 2340 nm).

En somme, la première dérivée des résidus de blé et celle du sol nu des canaux 21 (727,8 nm à 743,8 nm), 25 (788,8 nm à 805,0 nm), 26 (803,65 nm à 820,55 nm), 36 (935,15 nm à 950,85 nm), 39 (984,5 nm à 998,9 nm), 42 (1026,15 nm à 1045,85 nm), 50 (1149,2 nm à 1164,8 nm), 52 (1178,3nm à 1194,5 nm), 56 (1235,8 nm à 1251,6 nm), 60 (1292,65 nm à 1308,15 nm), 70 (1460,45nm à 1576,35 nm), 77 (1557,05 nm à 1572,15 nm), 84 (1648,5 nm à 1663,1 nm), 92 (1748,5nm à 1762,5 nm), 98 (1987,4 nm à 2008,6 nm), 101 (2044,05 nm à 2046,5 nm), 104 (2099,65nm à 2119,75 nm), 107 (2153,75 nm à 2173,85 nm), 110 (2206,95 nm à 2226,05 nm) et 115 (2294,05 à 2311,95 nm) ont démontré une moyenne à une forte variabilité, ce qui prouve la sensibilité de ces canaux à la distinction entre les résidus de cultures et les sols nus. Cependant, avant de confirmer quels canaux sont les plus adéquats pour discriminer les résidus de cultures des sols nus, deux autres analyses méritent une attention particulière. Effectivement, nous devons nous attarder sur l'analyse de la séparabilité entre les résidus de cultures et les sols nus par le biais des spectres obtenus via les mesures au sol ainsi que par l'image hyperspectrale Probe-1.

4.4.2 Analyse de la séparabilité spectrale entre les résidus de cultures et les sols nus par le biais des mesures au sol

Avant de passer à l'analyse de la séparabilité spectrale entre les résidus de cultures et les sols nus par les mesures au sol, nous devons ré-échantillonner nos données dans les différentes bandes du Probe-1. Cette étape consiste à calculer la moyenne des réflectances selon les bandes spectrales du capteur aéroporté Probe-1 en considérant tous les spectres des différents types de sols nus et tous les différents types de résidus de cultures à différents taux de couvertures.

L'analyse de la séparabilité entre les sols nus et les résidus de cultures d'après les mesures au sol sera principalement basée sur les différents canaux sélectionnés lors de l'étude de la première dérivée des résidus et du sol nu. En observant les résultats, trois différentes situations peuvent être notées. Dans certains cas, nous constatons aucun niveau de séparabilité. En d'autres mots, les résidus de cultures ne se différencient aucunement des sols nus. À titre d'exemple, la figure 4.15 portant sur la comparaison entre le canal 21 (727,8 nm à 743,8 nm) versus le canal 26 (803,65 nm à 820,55 nm) ainsi que le canal 36 (935,15 nm à 950,85 nm) versus le canal 39 (984,5 nm à 998,9nm) n'offre aucune information pertinente entre la séparabilité des résidus et des sols, car les résidus de cultures ainsi que les sols nus sont distribués de façon linéaire le long de la première bissectrice. Or, nous devons éliminer les moins bons canaux en matière de discrimination entre les résidus et les sols nus. Dans ce cas-ci, nous avons éliminé les canaux 26 (803,65 nm à 820,55 nm) et 39 (984,5 nm à 998,9 nm). Cependant, il est intéressant d'observer la distribution des sols nus dans deux régions distinctes. Ceux situés vers le côté gauche dans la partie inférieure le long de la première bissectrice sont des sols humides, tandis que ceux situés dans la partie supérieure du côté

droit le long de la première bissectrice sont les sols secs. La raison expliquant la similitude de la distribution des résidus et des sols le long de la première bissectrice se justifie par le fait que les spectres des canaux 21 (727,8 nm à 743,8 nm) et 26 (803,65 nm à 820,55 nm) ainsi que ceux des canaux 36 (935,15 nm à 950,85 nm) et 39 (984,5 nm à 998,9 nm) se ressemblent énormément aux mêmes longueurs d'onde.

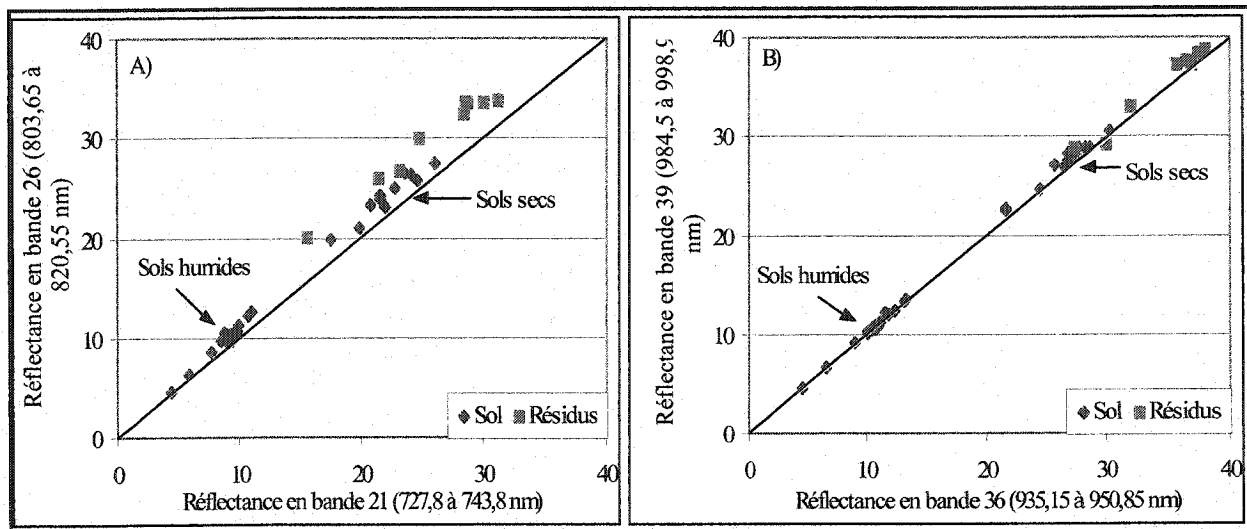


Figure 4.15: Réflectances des résidus de cultures à un taux de couverture de 100 % et des sols nus dans les bandes 21 versus 26 (A); et dans les bandes 36 versus 39 (B).

Dans d'autres cas, une bonne séparabilité entre les résidus de cultures et les sols nus peut être notée lorsque le taux de couverture des résidus de cultures est assez élevé. Cependant, la séparabilité peut devenir nulle lorsque le taux de couverture des résidus diminue. Par exemple, lorsque l'on observe cette séparabilité entre les canaux 70 versus 115, il est évident que les résidus se distinguent très bien des sols nus lorsque le taux de couverture des résidus de cultures est de 100 % et de 50 %, tandis que la séparabilité de ces deux mêmes canaux devient pratiquement nulle lorsque le taux de couverture des résidus de cultures atteint un taux de 25 % (figure 4.16). De plus, la distribution des

sols est semblable à celle retrouvée lors de la comparaison entre les canaux 21 versus 26 et 36 versus 39. En observant la distribution des résidus de cultures, il est intéressant de noter que les résidus plutôt foncés, tels le soja, sont distribués plus vers la gauche des figures en dessous de la première bissectrice, tandis que les résidus plus clairs, tels le maïs, sont situés dans la partie supérieure droite en dessous de la première bissectrice.

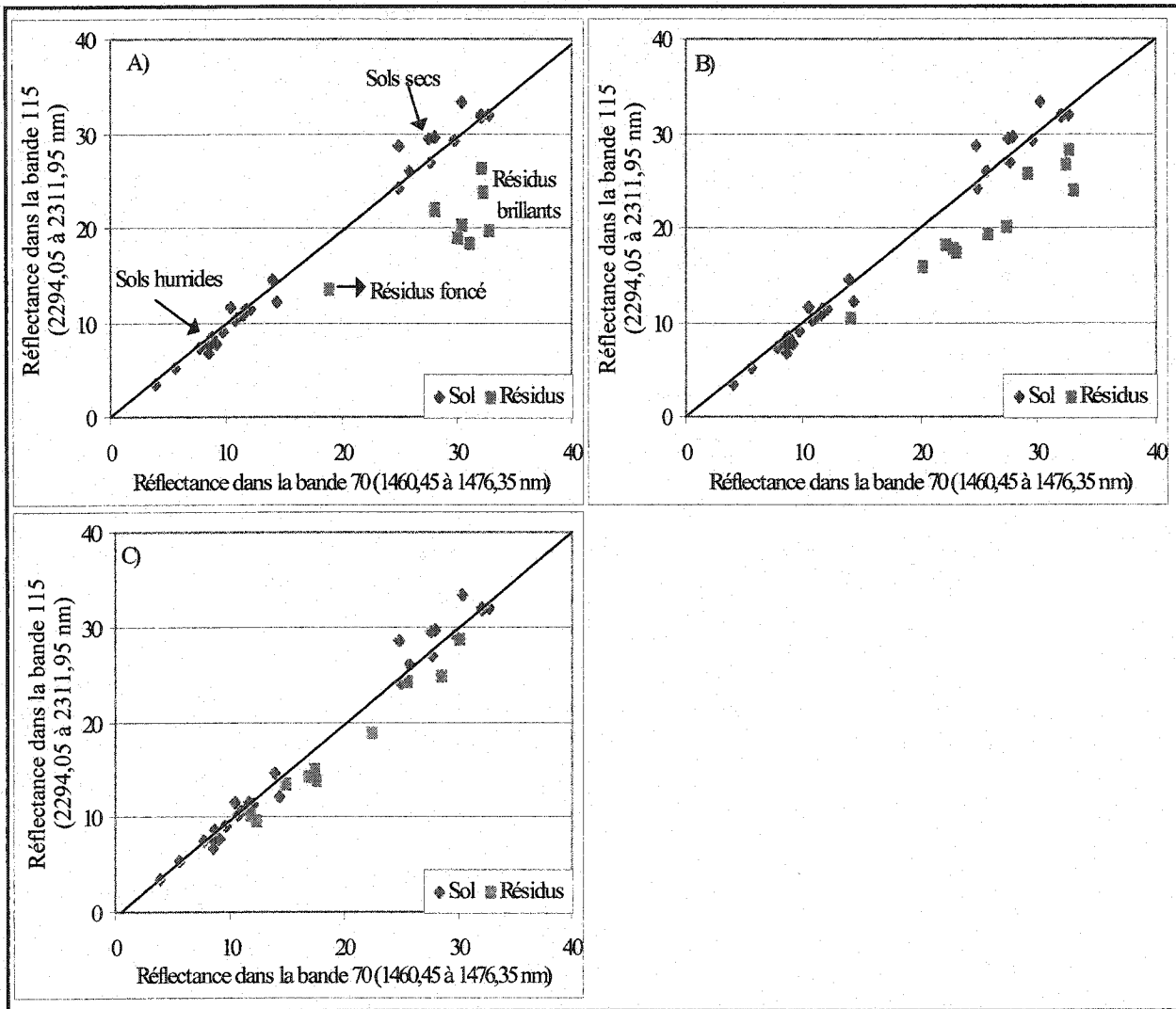


Figure 4.16: Réflectances des sols nus et des résidus de cultures dans les bandes 70 versus 115 à un taux de couverture de 100 % (A); 50 % (B) et 25 % (C).

Par ailleurs, dans certains cas, la séparabilité entre les résidus de cultures et les sols nus est toujours visible, peu importe le taux de recouvrement des résidus de cultures. Par exemple, lorsque l'on observe la séparabilité des résidus à différents taux de couverture et des sols nus en comparant les canaux 36 versus 115 (figure 4.17) ou celle des canaux 84 versus 115 (figure 4.18), nous constatons que ces couples de bandes ont un fort pouvoir discriminant entre les résidus de cultures et les sols nus.

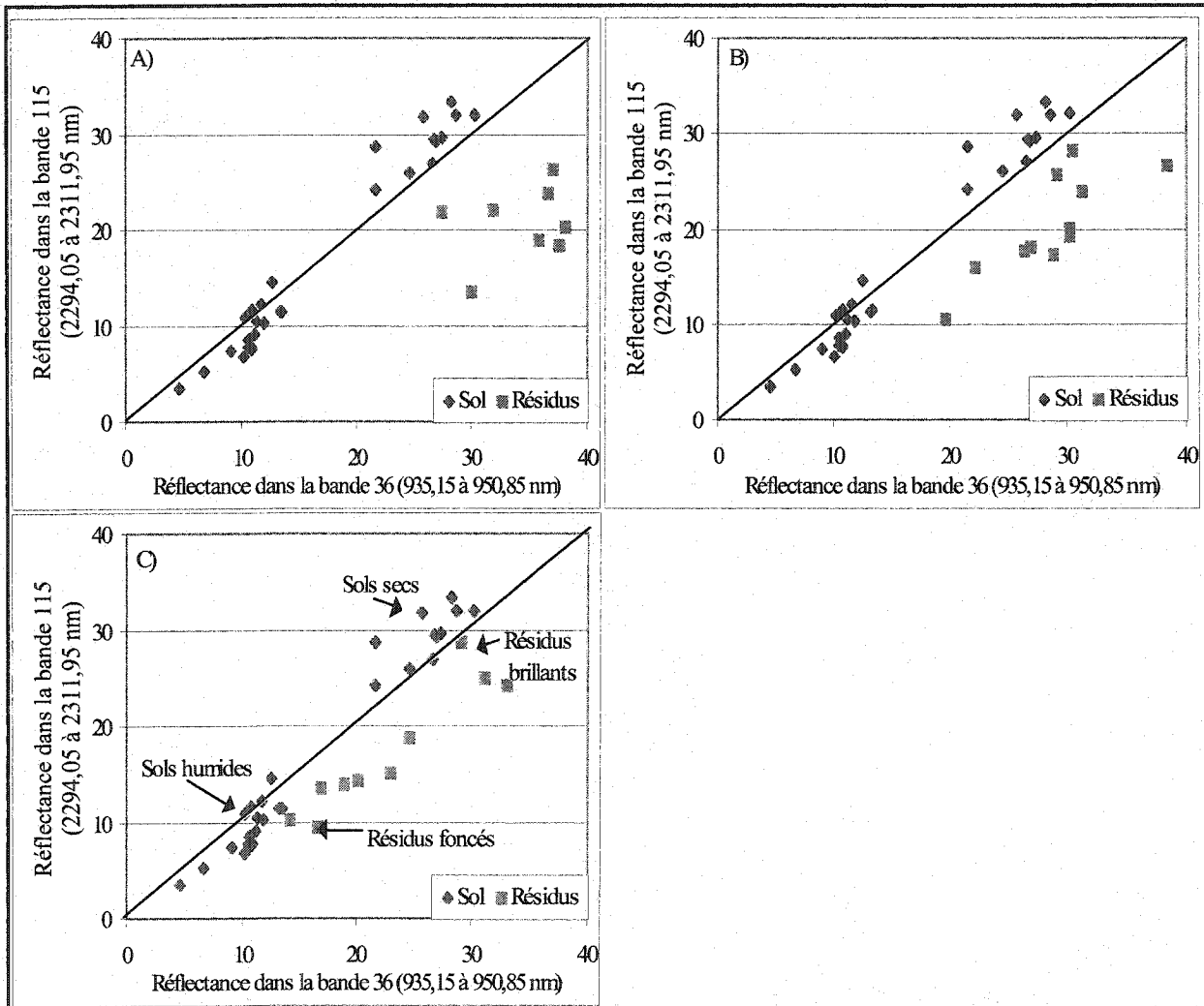


Figure 4.17: Réflectances des sols nus et des résidus de cultures dans les bandes 36 versus 115 à un taux de couverture de 100 % (A); 50 % (B) et 25 % (C).

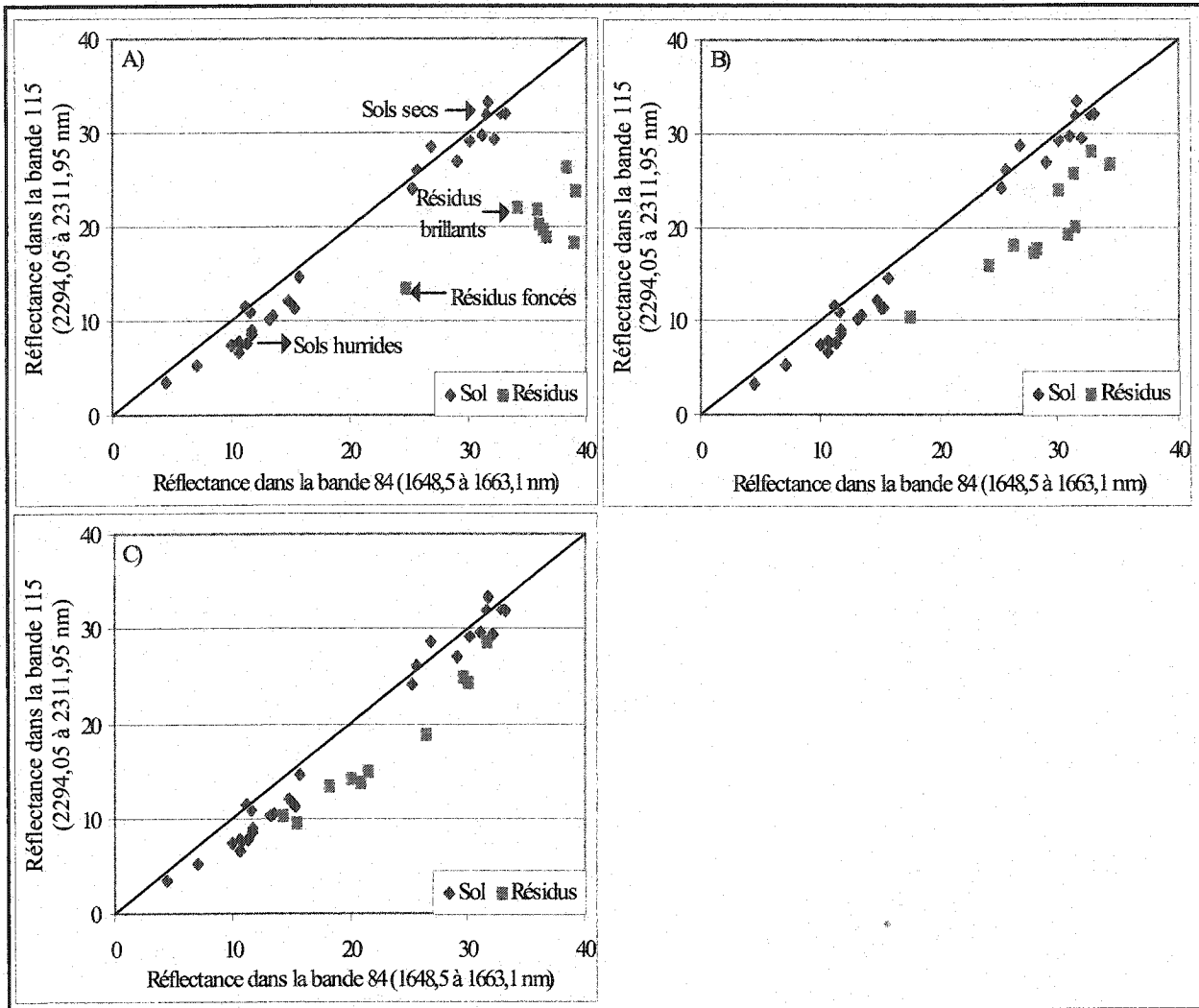


Figure 4.18: Réflectances des sols nus et des résidus de cultures dans les bandes 84 versus 115 à un taux de couverture de 100 % (A); 50 % (B) et 25 % (C).

Ayant vérifié toutes possibilités de combinaisons des canaux obtenus par l'analyse de la première dérivée des résidus et des sols nus, nous pouvons éliminer certains canaux. Effectivement, nous pouvons supprimer le canal 26 (803,65 nm à 820,55 nm), car son comportement spectral est trop similaire à celui du canal 21 (727,8 nm à 743,8 nm) avec un coefficient de corrélation de 0,9958. De plus, nous pouvons également retrancher le canal 39 (984,5 nm à 998,9 nm), car sa réponse

spectrale est trop similaire à celle du canal 36 (935,15 nm à 950,85 nm) avec un coefficient de corrélation de 0,9979.

Les comportements spectraux des canaux 50 (1149,2 nm à 1164,8 nm), 52 (1178,3 nm à 1194,5 nm) et 56 (1235,8 nm à 1251,6 nm) sont trop identiques à celui du canal 60 (1292,65 nm à 1308,15 nm) avec des coefficients de corrélation de 0,9862; 0,9857; et 0,9983 respectivement, donc nous devons éliminer ces derniers. Ajoutons que la réponse spectrale dans le canal 107 (2153,75 nm à 2173,85 nm) ressemble trop à celle dans le canal 110 (2206,95 nm à 2226,05 nm) avec un coefficient de corrélation de 0,9991 pour que nous le conservions. Ceci dit, les canaux 21, 25, 36, 42, 60, 70, 77, 84, 92, 98, 101, 104, 110 et 115 permettent de mieux discriminer les résidus de cultures des sols nus. Notons que le tableau 4.1 démontre les coefficients de corrélation des différents canaux sélectionnés lors de l'analyse de la première dérivée. De plus, dans ces différentes bandes ci-dessus, certaines réagissent mieux que d'autres. Par exemple, le couple de canaux réagissant le mieux, à une séparabilité sols nus-résidus de cultures, est nul autre que les canaux 36 versus 115.

Tableau 4.1: Tableau des coefficients de corrélation des différents canaux retenus lors de l'analyse de la première dérivée.

Canaux rejetés en rouge	Coefficient de corrélation
52 versus 60	0,9857
50 versus 60	0,9862
21 versus 26	0,9958
36 versus 39	0,9979
56 versus 60	0,9983
107 versus 110	0,9988
Canaux acceptés	Coefficient de corrélation
36 versus 115	0,6788
25 versus 104	0,723
42 versus 115	0,7396
21 versus 115	0,744
36 versus 110	0,7668
50 versus 77	0,7732
60 versus 115	0,802
84 versus 115	0,8071
70 versus 115	0,8467
92 versus 115	0,8662
36 versus 101	0,8667
36 versus 77	0,8832
98 versus 110	0,8874

4.4.3 Analyse de la séparabilité spectrale entre les résidus de cultures et les sols nus par le biais des spectres obtenus via le capteur Probe-1

Une fois la sélection des bandes démontrant une bonne séparabilité spectrale entre les résidus de cultures et les sols nus obtenue par les spectres mesurés au sol à l'aide du GER-3700, nous devons vérifier l'efficacité des canaux sélectionnés en analysant la séparabilité des résidus de cultures et des sols nus des spectres extraits de l'image hyperspectrale du capteur Probe-1. En d'autres termes, nous devons nous assurer du pouvoir discriminant des canaux sélectionnés au préavis. Dans un premier temps, attardons-nous sur une petite parcelle de terrain où nous retrouvons deux différents attributs, soit une parcelle de terrain où le taux de résidus atteint les 100 % et une parcelle de terrain de sols nus. La figure 4.19 démontre bien la présence de ces deux lots distincts, soient celui des résidus de cultures avec un taux de 100 % en arrière-plan et celui du sol nu en avant-plan. Notons la présence d'un sol nu avec un peu de végétation entre les deux parcelles mentionnées.

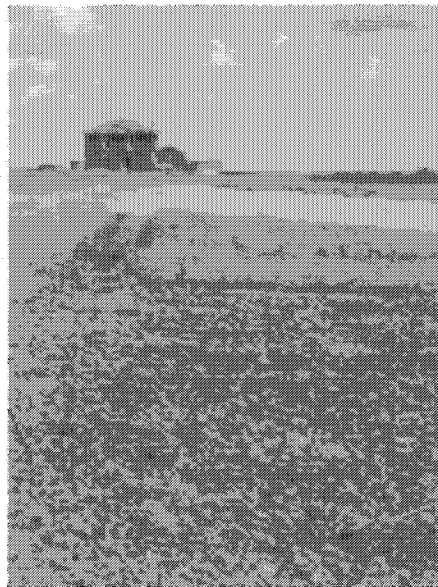


Figure 4.19: Photographie démontrant une parcelle d'un territoire recouvert d'un sol nu et d'un sol recouvert à 100 % de résidus de blé.

En observant la séparabilité d'une parcelle d'un territoire recouvert d'un sol nu et d'un sol recouvert à 100 % de résidus de blé obtenue en comparant les canaux 36 versus 115 (figure 4.20 a), il est évident que ces deux canaux ont bel et bien un pouvoir permettant de très bien discriminer les résidus de cultures des sols nus, car les pixels sont distribués dans deux zones distinctes, soient les résidus de cultures au-dessous de la première bissectrice et les sols nus au-dessus de cette dernière. Notons que chaque pixel retrouvé sur l'image est représenté par un petit point sur les graphiques. Par contre, en observant le pouvoir discriminant des canaux 73 versus 83 (figure 4.20b) il est clair que la combinaison entre ces deux canaux n'est pas du tout efficace, car les pixels des résidus et ceux des sols sont distribués linéairement le long de la première bissectrice. En d'autres termes, la distribution des pixels des résidus et des sols démontre une très grande confusion et ne permet pas de bien discriminer les résidus des sols nus.

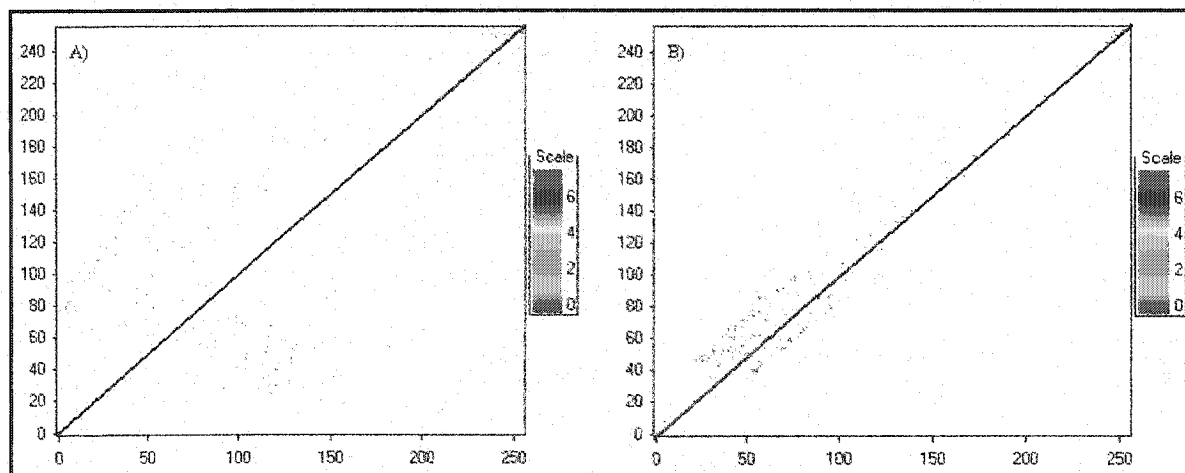


Figure 4.20: Scattogramme démontrant la distribution des pixels d'une parcelle d'un territoire recouvert d'un sol nu et d'un sol recouvert à 100 % de résidus de blé de la figure 4.18 des canaux 36 versus 115 (A), et des canaux 73 versus 83 (B).

Dans un second temps, portons notre attention sur la séparabilité entre les sols nus et les résidus de cultures d'une plus grande parcelle où le taux de recouvrement des résidus de cultures est d'environ 45 %. La photographie de ce territoire est montrée à la figure 4.21. Encore une fois, la séparabilité entre les résidus de cultures et les sols nus en utilisant les canaux 36 versus 115 est évidente (figure 4.22a). Effectivement, la distribution des pixels démontre bien les pouvoirs discriminants de ces deux canaux. Les pixels des résidus de cultures sont situés au-dessous de la première bissectrice. La raison qui explique le fait que les pixels des résidus de cultures ne soient pas tous en un endroit ou en un point précis est plutôt simple à comprendre. Certains résidus de cultures reposant sur le sol de ce site (figure 4.21) sont de couleur foncée et humide, or ces derniers se rapprochent plus vers le côté inférieur gauche de la figure 4.22 a. Par contre, les résidus de cultures de couleur brillante et sèche sont distribués un peu plus à droite des résidus humides et foncés. Les pixels des sols nus sont, quant à eux, bien éloignés des pixels des résidus de cultures et sont situés au-dessus de la première bissectrice. Notons la présence d'un groupement de pixels situés dans la partie supérieure du graphique 4.22 a. Ces différents pixels correspondent à la présence de la végétation verte éparse que l'on peut très bien apercevoir sur la figure 4.21. Or, les canaux 36 versus 115 peuvent non seulement différencier les résidus de cultures et les sols nus, mais également différencier la végétation verte de ces deux autres éléments.

En observant les pouvoirs discriminants des canaux 73 versus 88 du même territoire, tel que démontré à la figure 4.22 b, force est de constater que ces deux canaux n'ont pas le même degré de séparabilité entre les résidus de cultures et les sols nus. Les pixels sont tous situés le long de la première bissectrice et ne distinguent aucunement les résidus de cultures des sols nus. De plus, la

présence de la végétation verte passe inaperçue en utilisant la combinaison de ces deux canaux. La raison qui explique le fait qu'il y a beaucoup plus de pixels sur les graphiques 4.22 que sur les graphiques 4.20 se justifie par le fait que la parcelle utilisée pour vérifier la séparabilité entre les résidus de cultures et les sols nus de la figure 4.21 est plus grande que celle de la figure 4.19.



Figure 4.21: Photographie démontrant une parcelle d'un territoire où le taux de recouvrement des résidus de cultures est d'environ 45 %.

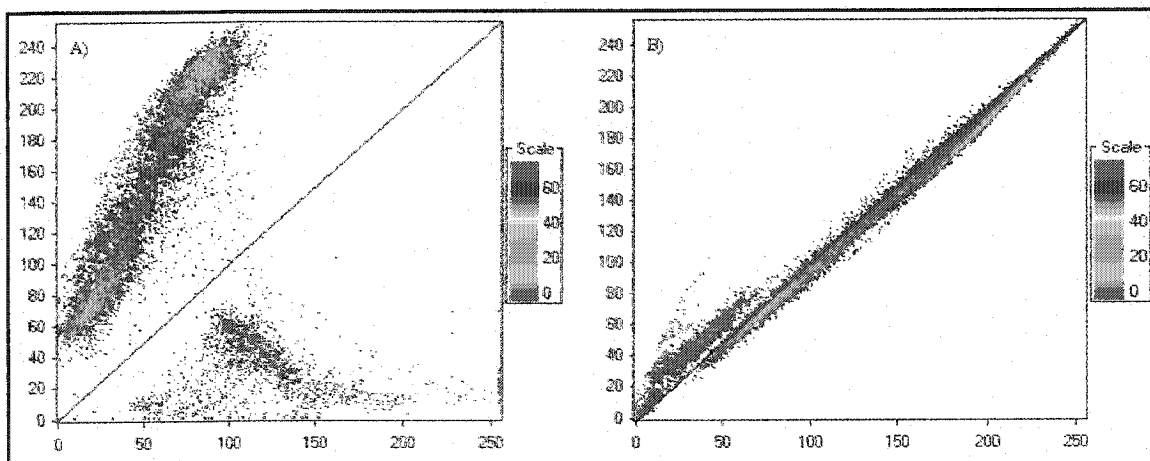


Figure 4.22: Scattogramme démontrant la distribution des pixels des résidus de cultures à un taux de couverture de 45 % et des sols nus de la figure 4.20 des canaux 36 versus 115 (A), et des canaux 73 versus 88 (B).

Dans un troisième temps, nous considérons un territoire où l'on peut observer une alternance constante entre les résidus de cultures et les sols nus. Le taux de recouvrement des résidus de cultures de ce territoire est de 35 %. La figure 4.23 démontre la séparabilité entre les résidus de cultures et les sols nus selon différents canaux. Par exemple, en observant la figure 4.23 a (canaux 36 versus 115) nous pouvons constater une belle distinction entre les résidus de cultures et les sols nus. Les pixels des résidus de cultures sont regroupés ensemble au-dessous de la première bissectrice, tandis que les pixels des sols nus sont regroupés au-dessus de cette dernière. Notons que le point central du regroupement des sols nus est entièrement au-dessus de cette première bissectrice. La figure 4.23 b démontrant la séparabilité entre les résidus de cultures et les sols nus selon les canaux 37 versus 71 nous permet de constater que ces deux canaux sont tout de même efficaces pour distinguer les résidus de cultures des sols nus. Les pixels des résidus de cultures sont encore une fois séparés des sols nus et situés au-dessous de la première bissectrice, tandis que les pixels des sols nus sont situés au-dessus de cette dernière. Bien que la combinaison des canaux 37 versus 71 soit efficace pour différencier les résidus de cultures des sols nus, il n'en demeure pas moins que son pouvoir discriminant soit quelque peu moins efficace que celui combinant les canaux 36 versus 115. Effectivement, en observant le point central du regroupement des sols nus, force est d'admettre que son coin inférieur droit touche légèrement la première bissectrice. La figure 4.23 c démontrant la séparabilité entre les résidus de cultures et les sols nus par le biais des canaux 50 versus 73, prouve que ces deux canaux ne sont pas aussi efficaces. Il apparaît que les sols nus soient situés au-dessus de la première bissectrice, mais que le point central des sols nus se démarque moins. En effet, ce dernier est situé directement sur la première bissectrice, ce qui rend difficile la distinction entre les résidus de cultures et les sols nus. La figure 4.23 d démontre la séparabilité entre les résidus de

cultures et les sols nus pour ce qui est des canaux 37 versus 50. En observant cette figure, il est évident que les pixels des sols nus et ceux des résidus de cultures ne se différencient aucunement, car ces derniers sont distribués de manière linéaire. De plus, la très grande majorité des pixels est située au-dessus de la première bissectrice, ce qui nous porterait à croire que ce territoire est uniquement composé de sols nus et qu'aucun résidu de cultures orne ce territoire, ce qui est totalement faux, car nous savons que ce terrain est doté d'un taux de recouvrement de 35 % de résidus de cultures.

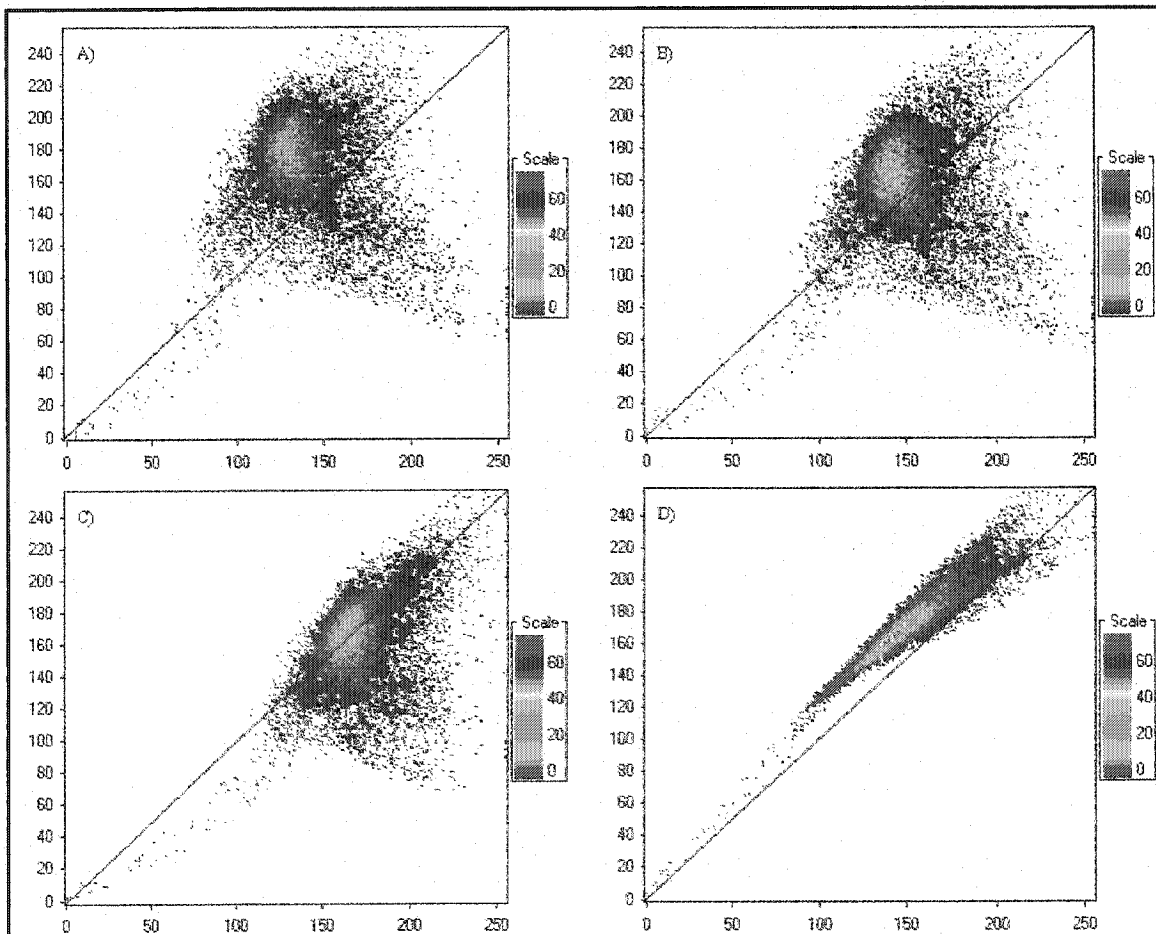


Figure 4.23: Scattogramme démontrant la distribution des pixels des résidus de cultures à un taux de couverture de 35 % et des sols nus des canaux 36 versus 115 (a), des canaux 37 versus 71 (b), des canaux 50 versus 73 (c) et des canaux 37 versus 50 (d).

Dans un quatrième temps, nous analysons la séparabilité entre les résidus de cultures et les sols nus d'une parcelle où le taux de recouvrement des résidus de cultures est d'environ 5 % seulement (figure 4.24). En portant notre attention sur la figure 4.25 a, représentant la séparabilité entre les résidus de cultures et les sols nus, il est intéressant de noter qu'avec même un taux de couverture de seulement 5 %, les canaux 36 versus 115 sont encore une fois en mesure de différencier les résidus de cultures des sols nus. Effectivement, la très grande majorité des pixels est située au-dessus de la première bissectrice et ces derniers représentent les sols nus. Par contre, un petit nombre de pixels situés au-dessous de la première bissectrice témoignent de la présence des résidus de cultures dans l'image. Cependant, lorsque nous observons la figure 4.25 b comparant les canaux 71 versus 115, nous constatons qu'il n'y a aucun niveau de séparabilité entre les résidus de cultures et les sols nus. En effet, les pixels sont tous situés le long de la première bissectrice, ce qui empêche de bien distinguer la présence des résidus de cultures sur cette parcelle.



Figure 4.24: Photographie démontrant une parcelle d'un territoire où le taux de recouvrement des résidus de cultures est d'environ 5 %.

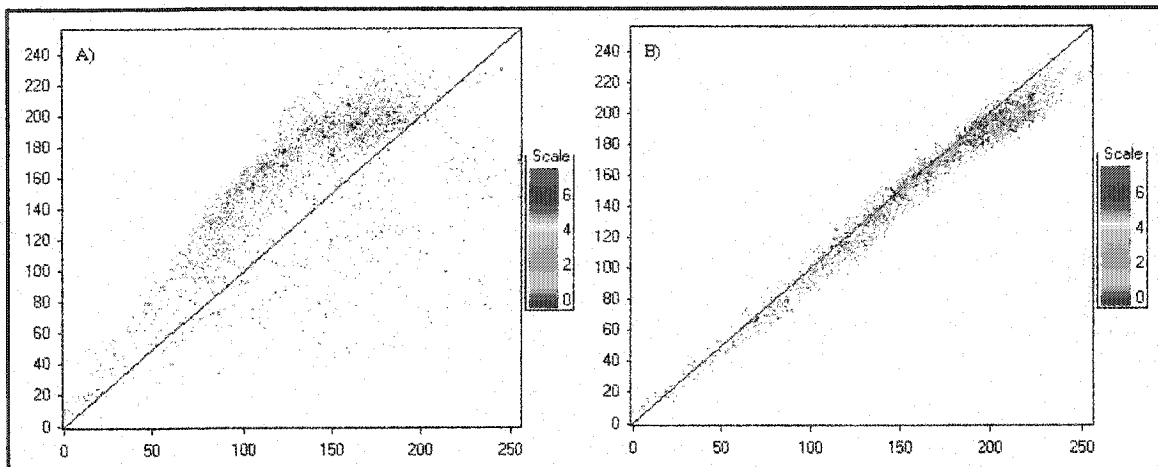


Figure 4.25: Scattogramme plot démontrant la distribution des pixels des résidus de cultures à un taux de couverture de 5 % et des sols nus de la figure 4.23 des canaux 36 versus 115 (A) et des canaux 71 versus 115 (B).

Le tableau 4.2 montre les coefficients de corrélation des différents canaux sélectionnés pour l'analyse de la séparabilité spectrale entre les résidus de cultures et les sols nus par le biais de l'image Probe-1. Pour les quatre scatter plots, les coefficients de corrélation des canaux 36 versus 115 sont plus bas. Ceci dit, les canaux 36 versus 115 réagissent mieux à une séparabilité sols nus-résidus.

Tableau 4.2: Tableau des coefficients de corrélation des différents canaux retenus lors de l'analyse de la séparabilité spectrale entre les résidus de cultures et les sols nus obtenus par le capteur Probe-1.

Scatter plot	Canaux utilisés	Coefficient de corrélation
Scattogramme 4.20	36 versus 115	0,66
	73 versus 83	0,98
Scattogramme 4.22	36 versus 115	0,07
	73 versus 88	0,99
Scattogramme 4.23	36 versus 115	0,05
	37 versus 71	0,16
	50 versus 73	0,48
	37 versus 50	0,95
Scattogramme 4.25	36 versus 115	0,68
	71 versus 115	0,99

Les analyses de la première dérivée des résidus et des sols nus et les analyses de la séparabilité entre les résidus de cultures et les sols nus obtenues par les mesures au sol ainsi que par l'image hyperspectrale Probe-1 ont permis de constater que certains canaux ont un fort pouvoir discriminant entre les résidus de cultures des sols nus. Bien qu'il a été prouvé que certaines combinaisons de canaux distinguent bien les résidus de cultures à différents taux de couverture des sols nus, il a également été prouvé que certaines combinaisons ne peuvent aucunement distinguer les résidus de cultures des sols nus. Parmi les canaux retenus pour l'analyse des indices de résidus de cultures et pour la classification par la méthode des réseaux de neurones, c'est-à-dire les canaux 21 (727,8 nm à 743,8nm), 25 (788,8 nm à 805,0 nm), 36 (935,15 nm à 950,85 nm), 42 (1026,15 nm à 1045,85 nm), 60 (1292,65 nm à 1308,15 nm), 70 (1460,45 nm à 1476,35 nm), 77 (1557,05 nm à

1572,15 nm), 84 (1648,5 nm à 1663,1 nm), 92 (1748,5 nm à 1762,5 nm), 98 (1987,4 nm à 2008,6nm), 101 (2044,05nm à 2065,35 nm), 104 (2099,65 nm à 2119,75 nm), 110 (2206,95 nm à 2226,05 nm) et 115 (2294,05 nm à 2311,95 nm) nous pouvons établir une classification à trois niveaux d'efficacité selon les résultats obtenus lors des différentes analyses. Le premier niveau de classification, où les résidus de cultures se discernent extrêmement bien des sols nus, est formé de trois canaux, soient le 36, 84 et 115. Le second niveau de classification, où les résidus de cultures se distinguent très bien des sols nus, est composé de six canaux, soient le 60, 92, 98, 101, 104 et 110. Le troisième niveau de classification, où les résidus de cultures se différencient bien des sols nus, est constitué de cinq canaux, soient le 21, 25, 42, 70 et 77.

Avant de passer à la méthode des indices de résidus de cultures pour la cartographie et l'estimation du taux de couverture, une autre analyse mérite une attention particulière. La distance bhattacharrya est une mesure de séparabilité dont la valeur est comprise entre 0 et 2 permettant d'affirmer si le degré de séparabilité entre les sites d'entraînement est élevé ou non. En d'autres termes, cette fonction permet de vérifier et d'augmenter la précision de séparabilité entre les signatures spectrales des sites d'entraînement par une analyse statistique. Une distance bhattacharrya de 2 signifie que les classes ont une séparabilité parfaite. Si la distance est supérieure ou égale à 1,9, il n'y a pas de confusion entre les classes. Par contre, les classes dont la distance est inférieure à 1,9 sont considérées comme étant non séparées. Lors de l'analyse de cette distance, seulement les canaux permettant de distinguer les résidus de cultures des sols nus (obtenus par la première dérivé des résidus et des sols nus; par la séparabilité obtenue par les mesures au sol; et par la séparabilité obtenue à partir de l'image hyperspectrale) ont été sélectionnés, c'est-à-dire les canaux 21, 25, 36,

42, 60, 70, 77, 84, 92, 98, 101, 104, 110 et 115. Trois imageries (figures 4.35, 4.40a et 4.40b) des terres agricoles ont été utilisées pour ce travail. Ces dernières ont été sélectionnées dans le but de bien représenter différents taux de recouvrement des résidus de cultures ainsi que d'avoir une bonne représentation des environs du site d'étude.

Tel que démontré au tableau 4.3, il n'y a pas de confusion entre les différents sites d'entraînement sélectionnés pour la classification de l'image hyperspectrale de la figure 4.35. En effet, la séparabilité moyenne entre les classes des résidus de cultures, des sols nus, de la végétation et des terres humides est de 1,988463. De plus, toutes les classes ont une séparabilité supérieure à 1,9. Par exemple, la distance bhattacharyya la plus faible est de 1,950984 entre la classe des résidus et des sols nus. La matrice de la distance bhattacharyya des différents sites d'entraînement pour la classification de l'image hyperspectrale de la figure 4.40a est montrée au tableau 4.4. Encore une fois, il n'y a pas de confusion entre les différentes classes (résidus, sols nus, végétation et eau), car la séparabilité moyenne est de 1,989981. La séparabilité entre les résidus et les sols nus (1,96037) est légèrement inférieure aux autres sites d'entraînements, mais il n'y a pas de confusion entre ces deux classes, car elle est supérieure à 1,9. Par ailleurs, le tableau 4.5 illustre la matrice de la distance bhattacharyya des sites d'entraînement sélectionnés pour la classification de l'image hyperspectrale de la figure 4.40b. Ce tableau démontre que les différentes classes sont très bien séparées l'une de l'autre. Effectivement, la séparabilité moyenne de 1,996151 prouve qu'il n'y a pas de confusion entre les signatures spectrales des sites d'entraînement des résidus de cultures, des sols nus, de la végétation et de l'eau.

Tableau 4.3: Matrice de la distance bhattacharrya des sites d'entraînement utilisés pour la classification de l'image hyperspectrale de la figure 4.35 (sites 1, 2, 3 et 4).

	Résidus	Sols nus	Terres humides
Sols nus	1,950984		
Eau	1,999953	1,988835	
Végétation	1,999998	1,999857	1,991153
Séparabilité moyenne: 1,988463			

Tableau 4.4: Matrice de la distance bhattacharrya des sites d'entraînement utilisés pour la classification de l'image hyperspectrale de la figure 4.40a (sites 5, 6, 7 et 8).

	Résidus	Sols nus	Eau
Sols nus	1,96037		
Eau	1,99995	1,99597	
Végétation	1,99715	1,99861	1,987842
Séparabilité moyenne: 1,989981			

Tableau 4.5: Matrice de la distance bhattacharrya des sites d'entraînement utilisés pour la classification de l'image hyperspectrale de la figure 4.40b (sites 9 et 10).

	Résidus	Sols nus	Eau
Sols nus	1,98206		
Eau	1,99999	1,99734	
Végétation	1,99993	1,9976	1,999997
Séparabilité moyenne: 1,996151			

La sélection des canaux 21, 25, 36, 42, 60, 70, 77, 84, 92, 98, 101, 104, 110, et 115 (annexe 2) s'avère un bon choix pour la discrimination entre les résidus de cultures, les sols nus, la végétation et l'eau. En effet, ils ont donné de bons résultats lors de l'analyse de la séparabilité entre les résidus de cultures et les sols nus obtenus par les mesures au sol ainsi qu'à l'aide de l'image hyperspectrale Probe-1. De plus, ces canaux ont été efficaces pour bien discriminer les résidus, les sols nus, la végétation, les terres humides et l'eau lors de l'analyse de la séparabilité entre les différentes classes par le biais de la distance bhattacharrya.

4.5 La méthode des indices de résidus de cultures pour la cartographie et l'estimation du taux de couverture

Les résultats obtenus par la méthode des indices de résidus de cultures seront développés dans sept sections. Lors des six premières sections, nous allons vérifier la précision des divers indices de résidus de cultures pour ce qui est de l'estimation du taux réel de couverture des différents types de résidus de cultures obtenue à l'aide du spectroradiomètre GER3700. Tel que mentionné précédemment, les indices de résidus de cultures sont les suivants: BI, CAI, NDI, SACRI, MSACRI et CRIM. Par ailleurs, dans la septième section nous utiliserons ces différents indices de résidus de cultures à des fins de cartographie afin d'estimer le taux des résidus de cultures présents sur l'image aéroportée hyperspectrale du capteur Probe-1.

4.5.1 BI (*Brightness Index*)

Étant donné que le BI (annexe 3) est basé sur l'addition des quatre premières bandes TM, nous avons utilisé les canaux 5 (483,0 nm à 499,0 nm), 10 (559,75 nm à 575,25 nm), 17 (667,5 nm

à 683,9 nm) et 28 (834,6 nm à 851,6 nm) du capteur Probe-1 du fait qu'ils couvrent ces mêmes régions spectrales et qu'ils sont situés le plus au centre des quatre bandes TM. En ce qui concerne la sensibilité du BI aux résidus de maïs, les valeurs s'étendent entre 25,05 % pour un sol nu à 80,95 % pour un sol recouvert à 100 % de résidus. Cet indice tend à surestimer le taux de couverture des résidus lorsque ce dernier est inférieur à 60 %. Par contre, il sous-estime ce même taux lorsque le recouvrement des résidus dépasse la marge des 70 %. L'erreur standard a été utilisée afin de mesurer l'efficacité des différents indices utilisés. Cette erreur mesure la précision entre les prédictions faites par une régression linéaire et les points réels obtenus. La formule de cette erreur est la suivante:

$$S_{y,x} = \sqrt{\frac{\sum (y - y_{est})^2}{n}} \quad (17)$$

où:

y est la valeur réelle obtenue à une observation x;

y_{est} est la valeur théorique qu'aurait du obtenir y à une observation x;

n est le nombre de points y mesurés.

L'erreur standard d'estimation moyenne du BI sur les résidus de maïs est de 19,92 %. En observant la figure 4.26a, force est de constater que les points du BI des résidus de maïs sont généralement bien distribués. En effet, plus le taux de recouvrement des résidus de maïs est élevé plus le BI augmente. Cependant, lorsque le taux de recouvrement dépasse le seuil de 75 %, cet indice a un problème de saturation.

Les valeurs du BI sur les résidus de blé s'échelonnent entre 24,92 % pour un sol nu à 86,89% pour un sol ayant un taux de recouvrement de 100 % (figure 4.26b). Cet indice surestime la quantité

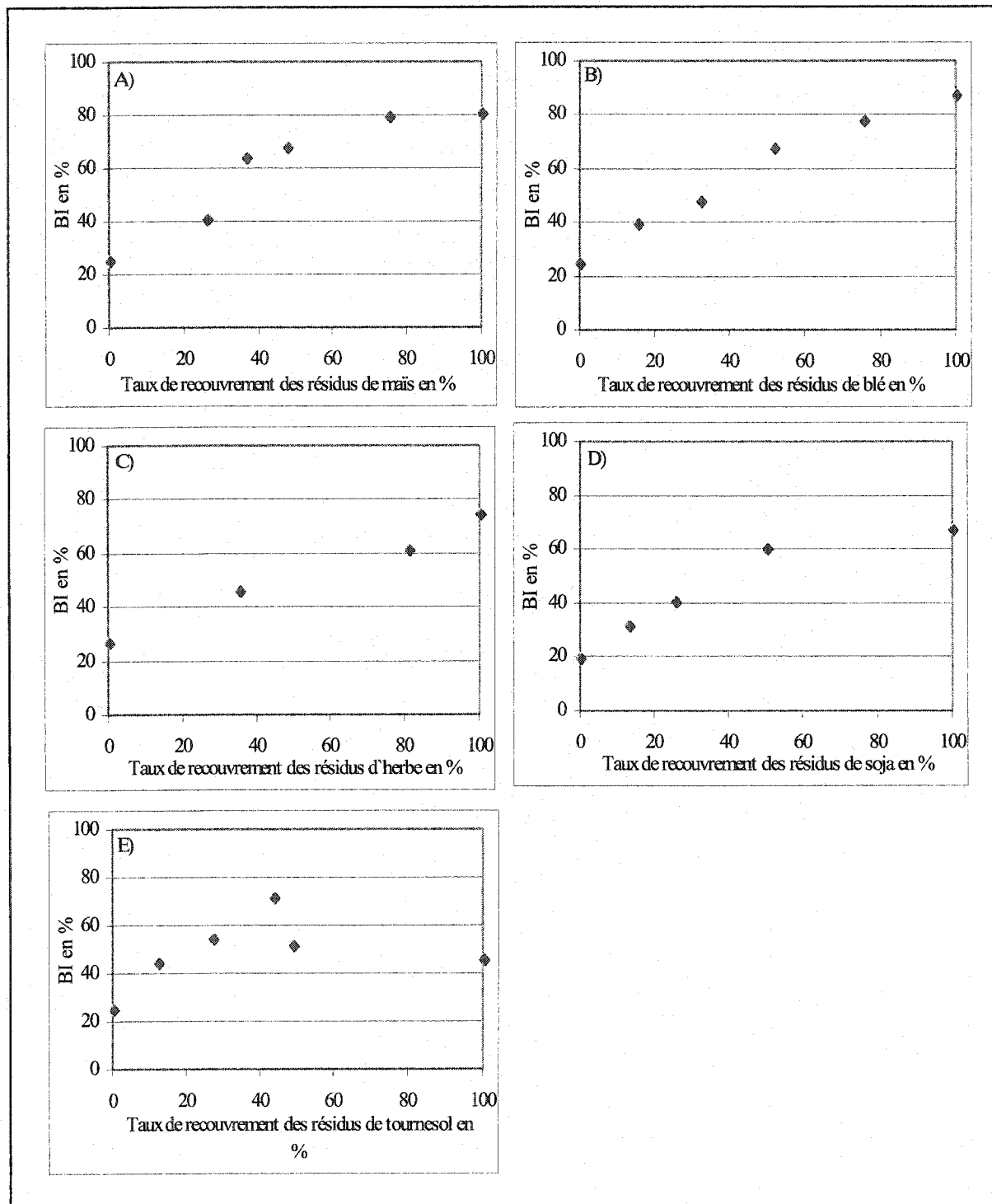


Figure 4.26: Indices de résidus de cultures BI de sols recouverts de différents taux de couvertures de résidus calculés à partir des mesures de réflectances au sol acquises à l'aide du GER3700 et ré-échantillonnées dans les bandes du capteur hyperspectral Probe-1: maïs (A), blé (B), herbe (C), soja (D) et tournesol (E).

de résidus de blé jusqu'à l'occurrence de 75 %. Au-delà de ce seuil, il sous-estime le taux réel des résidus. L'erreur standard d'estimation moyenne des résidus de blé est de 17,58 %. En portant notre attention à la figure 4.26b représentant la distribution des points du BI des résidus de blé, il est intéressant d'observer une linéarité acceptable des points. À un même taux de recouvrement, les valeurs du BI des résidus de blé sont inférieures à celles des résidus de maïs. Cette explication vient du fait que les résidus du maïs sont plus clairs que ceux du blé, or la réflectance du maïs est plus élevée. Étant donné que l'équation du BI se résume en l'addition des réflectances dans le bleu, le vert, le rouge et dans le proche infrarouge, il est tout à fait normal que le BI du maïs à un même taux de couverture soit plus élevé que celui du blé. Contrairement au maïs, aucun problème de saturation survient avec les résidus de blé.

Pour sa part, les valeurs du BI des résidus d'herbe se dispersent entre 26,78 % pour un sol nu à 74,66 % pour un sol recouvert à 100 % de résidus. La figure 4.26c représentant cet indice démontre que lorsque le taux réel de recouvrement est inférieur à 40 %, le BI surestime ce taux. Par contre, lorsque le taux réel de recouvrement est supérieur à 80 %, il sous-estime ce taux. L'erreur standard d'estimation moyenne des résidus d'herbe est de 21,67 %. De plus, les points de la figure 4.26c augmentent en fonction de l'augmentation du taux de couverture des résidus.

Pour ce qui est des valeurs du BI sur les résidus de soja (résidus sombres), affirmons qu'elles se répartissent entre 19,46 % pour un sol nu à 66,96 % pour un sol dont la couverture des résidus atteint 100 %. De plus, lorsque le taux de recouvrement des résidus d'herbe est inférieur à 60 %, le BI surestime la quantité réelle de résidus. Par contre, lorsque le taux est supérieur à 80 % cet indice

sous-estime la quantité de résidus. Mentionnons également que l'erreur standard d'estimation moyenne est de 20,56 %. Les points du BI, tels que démontrés à la figure 4.26d, augmentent en fonction de l'augmentation du taux de recouvrement des résidus jusqu'à l'occurrence de 50 %. Bien qu'il n'y a pas d'information entre 50 % et 100 %, il semblerait qu'il y a un problème de saturation, car la valeur du BI à 50 % de taux de couverture est de 60 % alors qu'elle est de 66 % à 100 % de taux de recouvrement.

Portons notre attention sur le BI des résidus de tournesol. Les valeurs de ce dernier se répandent entre 25,28 % pour un sol nu pour atteindre un maximum de 71,5 % à un taux réel de recouvrement de 43,82 % pour ensuite chuter à 46,05 % lorsque le taux réel atteint 100 %. La figure 4.26e démontre que le BI surestime les résidus de tournesol jusqu'à un taux réel de 50 %. Au-dessus de 60 %, il semble que l'indice sous-estime la quantité de résidus. L'erreur standard d'estimation moyenne des résidus de tournesol est de 31,79 %. La figure 4.26e démontre également les problèmes du BI en matière d'estimation des résidus de tournesol. En effet, la distribution des points n'est pas linéaire ni constante. Une raison pouvant expliquer ce fait est celle où les résidus de tournesol n'étaient pas en parfaite condition. Ces derniers étaient dans un stade de dégradation avancé, ce qui diminue la réflectance et rend la distinction entre le sol et les résidus très difficile.

Bref, l'indice BI a donné de meilleurs résultats pour les résidus de blé (résidus clairs) avec une erreur standard d'estimation de 17,58 %. Il a cependant donné de moins bons résultats lors de l'estimation du taux de recouvrement des résidus de tournesol avec une erreur standard d'estimation de 31,79 %. Pour tous les différents résidus de cultures, le BI a surestimé la première portion du

taux de recouvrement (0 % à environ 50 %), tandis qu'il a sous-estimé la seconde portion du taux de couverture (environ 50 % à 100 %).

4.5.2 CAI (*Cellulose Absorption Index*)

Par ailleurs, attardons-nous sur le comportement du CAI (annexe 3) en fonction de différents types de résidus de cultures. Cette fois-ci, les canaux 98 (1987,4 nm à 2008,6 nm), 109 (2188,4 nm à 2207,8nm) et 103 (2081,4 nm à 2101,6 nm) du capteur Probe-1 ont été utilisés, car ces canaux couvrent les régions spectrales utilisées pour le calcul du CAI (équation 3). À première vue, cet indice semble moins efficace que le BI, car il donne des valeurs négatives, ce qui témoigne des limites de ce dernier à des fins d'estimation du taux de couverture des résidus de cultures. Les valeurs du CAI des résidus de maïs s'étendent entre -104 % pour un sol nu à 84,5 % pour un taux de 100 % de résidus. En observant la figure 4.27a représentant cet indice sur un sol recouvert de résidus de maïs à différents taux de couverture, plusieurs conclusions peuvent être notées. Le CAI sous-estime le taux de recouvrement des résidus de maïs à l'exception d'une occasion où le taux réel de recouvrement des résidus est de 73,71 % alors qu'il estime ce taux à 76,5 %. L'erreur standard d'estimation moyenne du CAI sur les résidus de maïs est de 67,97 %. Cet indice donne de mauvais résultats lorsque le taux réel des résidus de maïs est moins couvrant (inférieur à 50 %). Cependant, il donne des résultats légèrement supérieurs lorsque ce taux dépasse 50 %.

La figure 4.27b représente le CAI sur les résidus de blé en démontrant des valeurs qui se dispersent énormément. En effet, elles s'étendent entre -104 % pour un sol nu à 139,5 % pour un sol ayant un taux de recouvrement de 100 %. Cet indice a tendance à sous-estimer le taux réel de

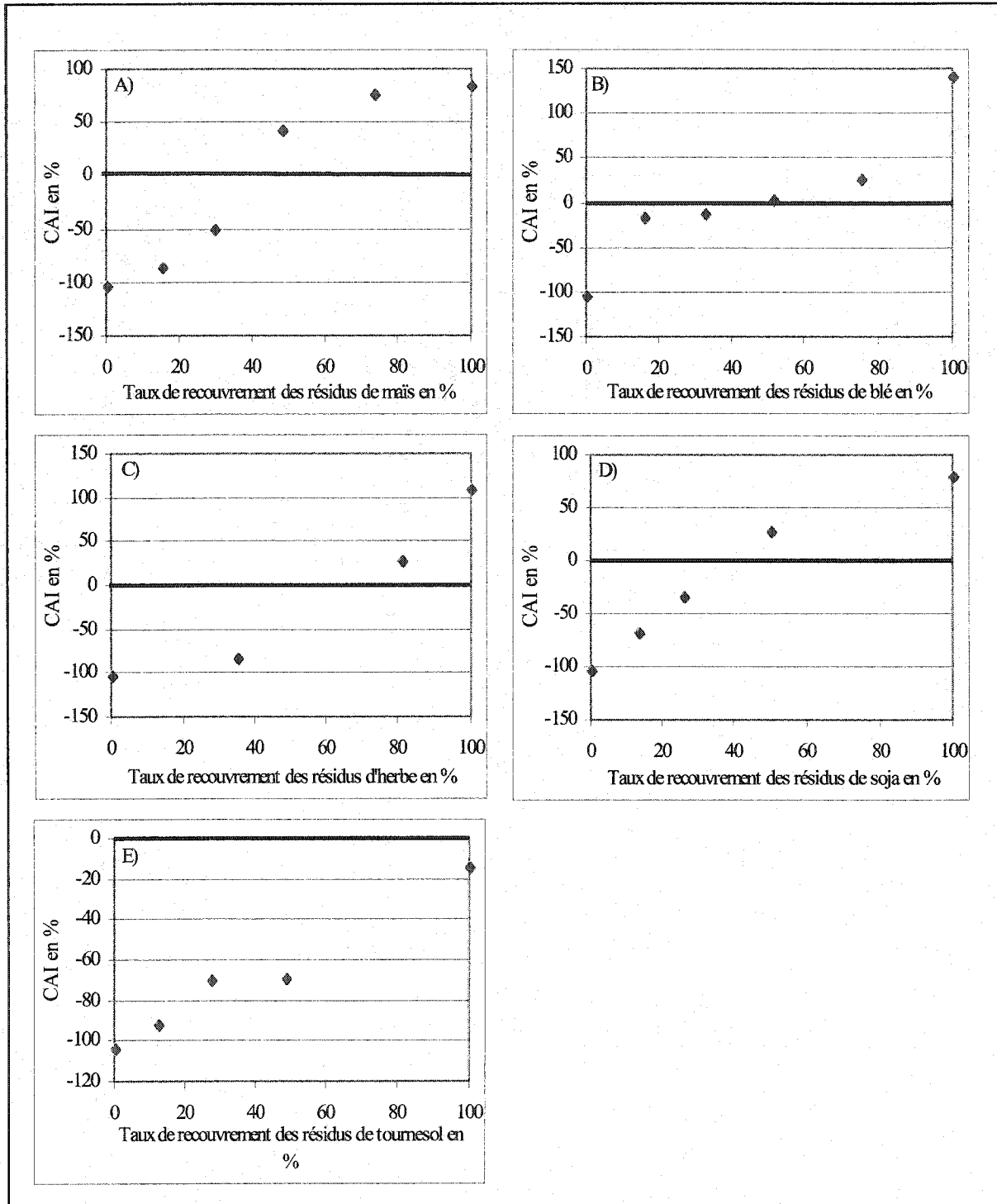


Figure 4.27: Indices de résidus de cultures CAI de sols recouverts de différents taux de couvertures de résidus calculés à partir des mesures de réflectances au sol acquise à l'aide du GER3700 et ré-échantillonnées dans les bandes du capteur hyperspectral Probe-1: maïs (A), blé (B), herbe (C), soja (D) et tournesol (E).

recouvrement des résidus de blé lorsque ce dernier est inférieur à 80 %. Cependant, il sur-estime le taux réel lorsque ce dernier est supérieur à 90 %. L'erreur standard d'estimation moyenne est d'environ 58,23 %, ce qui témoigne des faiblesses de cet indice en matière d'estimation des résidus de blé. Il est très intéressant d'observer qu'à un taux réel de couverture de 15,9 %, 32,77 % et 53%, les valeurs du CAI sont plutôt stables même si le taux réel de couverture fluctue de près de 40 %. Ce fait témoigne encore une fois des lacunes du CAI quant à l'estimation du taux de recouvrement des résidus de blé.

Pour ce qui est de la sensibilité du CAI aux résidus d'herbe, telle que démontrée à la figure 4.27c, les valeurs fluctuent entre -104 % pour un sol nu à 109 % pour 100 % de taux de couverture. Cet indice a tendance à sous-estimer le taux réel des résidus d'herbe à l'exception d'une occasion où le taux réel de recouvrement est de 100 %, alors que le CAI estime ce recouvrement à 109 %. L'erreur standard d'estimation moyenne de 83,85 % démontre à quel point cet indice donne des résultats insatisfaisants pour estimer adéquatement la quantité de résidus d'herbe. Aussi, le CAI fonctionne mieux lorsque le taux de recouvrement des résidus d'herbe est élevé. Par exemple, il a donné de très bon résultats lorsque le taux de recouvrement était supérieur à 90 %.

Les valeurs du CAI en fonction des résidus de soja sont démontrés à la figure 4.27d. Cette fois-ci, elles sont réparties entre -104 % pour un sol nu à 78,5 % pour un sol recouvert à 100 % de résidus. Le CAI sous-estime le taux réel de résidus de cultures. Mentionnons que l'erreur standard d'estimation moyenne est encore une fois très élevée, elle atteint 66,51 %. Aussi, le CAI estime le

pourcentage de résidus de cultures présents sur le sol de manière plus adéquate lorsque le taux de recouvrement de ces derniers est très élevé.

Les valeurs du CAI des résidus de tournesol, illustrés à la figure 4.27e, se répandent entre -104 % pour un sol nu à -14,5 % pour 100 % de taux de couverture. Cet indice sous-estime toujours le taux réel des résidus de tournesol. De plus, toutes les valeurs des résidus de tournesol recueillies par le CAI sont négatives. L'erreur standard d'estimation moyenne des résidus de tournesol obtenue par le CAI est de 108,04 %. Avec une telle erreur, il n'est pas surprenant de constater que cet indice fonctionne moins bien avec les résidus de tournesol qu'avec les autres types de résidus de cultures. Cependant, la couleur trop foncée ainsi que la présence de cellulose et de la lignine explique en très grande partie les déboires du CAI quant à la possibilité de l'utiliser pour estimer son taux de recouvrement.

En conclusion, il appert que le CAI est très limité pour l'estimation du taux de recouvrement des résidus de cultures. Il donne de moins bons résultats lors de l'estimation des résidus de tournesol avec une erreur standard d'estimation de 108,04 %. Bien que le CAI procure des résultats insatisfaisants en matière d'estimation du taux de recouvrement des résidus de cultures, il n'en demeure pas moins que cet indice semble donner des résultats légèrement supérieurs lorsque les taux sont assez élevés.

4.5.3 NDI (*Normalized Difference Index*)

Deux sources de données seront utilisées lors de l'analyse de la sensibilité du NDI (annexe 3) aux différents types de résidus. Le NDI-1 est l'indice traditionnel qui exploite la région spectrale démontré efficace dans le cas du capteur TM de Landsat. Les bandes 27 (827,6 nm) et 104 (2109,7nm) du capteur Probe-1 sont l'équivalent de cette zone spectrale. Par contre, le NDI-2 est l'indice modifié, il utilise les canaux du capteur Probe-1 les plus performants en matière de discrimination des résidus de cultures des sols nus, c'est-à-dire les canaux 36 (943 nm) et 115 (2303nm). En observant la figure 4.28a représentant le NDI calculé pour un sol recouvert de différents taux de résidus de maïs, plusieurs conclusions peuvent être notées. Tout d'abord, il est évident que l'indice traditionnel (NDI-1) est moins efficace que l'indice modifié (NDI-2). Par exemple, plusieurs valeurs du NDI-1 sont négatives et oscillent de -9,35 % pour un sol nu à 2,72 % pour 100 % de résidus. Tandis que les valeurs du NDI-2 sont plus représentatives et s'étendent entre 8,83 % pour un sol nu à 32,11 % pour un sol recouvert à 100 % de résidus. Cependant, ces deux indices tendent à sous-estimer le pourcentage de couverture des résidus de maïs. L'erreur standard d'estimation moyenne est de 57,89 % pour le NDI-1 et celle du NDI-2 est de 35,23 %. Ajoutons que lorsque le taux de recouvrement dépasse 75 %, il y a un problème de saturation avec le NDI-2. En effet, les valeurs de cet indice baissent légèrement lorsque le taux réel passe de 75 % à 100 %. L'indice traditionnel NDI-1 n'a pas été en mesure de bien estimer la quantité de résidus (Bannari *et al.*, 1999), car les valeurs de cet indice sont toutes proches de 0 %. Il serait primordial d'ajouter que l'estimation de la quantité du maïs par le NDI-2 semble fonctionner un peu mieux lorsque le taux est inférieur à 35 %.

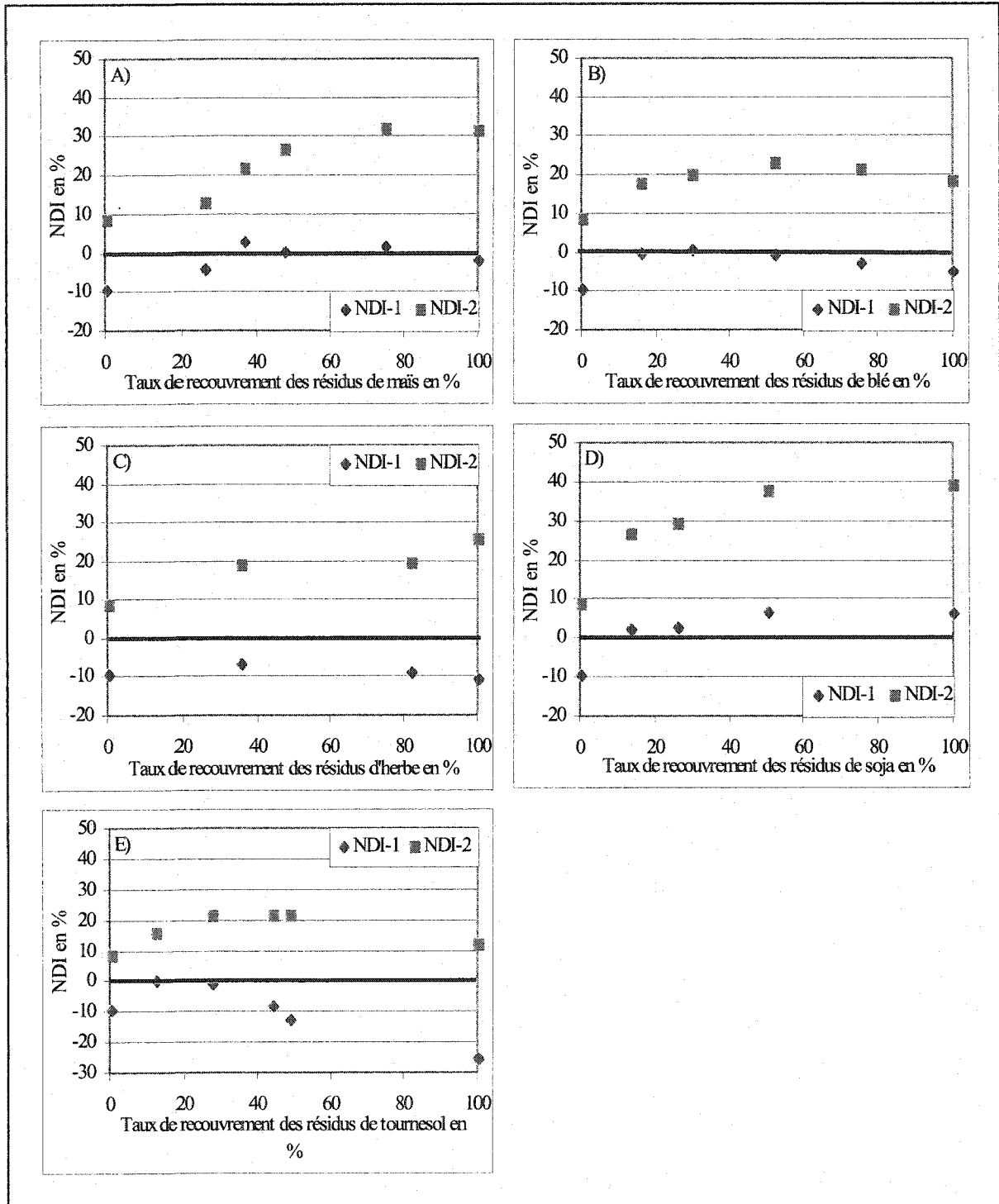


Figure 4.28: Indices de résidus de cultures NDI de sols recouverts de différents taux de couvertures de résidus calculés à partir des mesures de réflectances au sol acquises à l'aide du GER3700 et ré-échantillonnées dans les bandes du capteur hyperspectral Probe-1: maïs (A), blé (B), herbe (C), soja (D) et tournesol (E).

La figure 4.28b illustre la sensibilité du NDI-1 et du NDI-2 aux résidus de blé à différents taux de couvertures. Encore une fois, l'indice traditionnel (NDI-1) est moins efficace que l'indice modifié (NDI-2). Par exemple, plusieurs valeurs du NDI-1 sont négatives et oscillent entre -9,35 % pour un sol dépourvu de résidus à 2,6 % pour un sol entièrement recouvert de résidus. Par contre, les valeurs du NDI-2 sont un peu plus représentatives et s'étendent entre 8,83 % pour un sol nu à 23,14 % pour un sol recouvert à 100 % de résidus. Tout comme lors de l'estimation des résidus de maïs, les deux indices NDI sous-estiment le taux de recouvrement des résidus de blé. L'erreur standard d'estimation moyenne du NDI-1 est de 59,27 % et celle du NDI-2 est de 42,09 %. Les points du NDI-1 ont tous sensiblement une valeur de 0 % indépendamment du taux de couverture des résidus et ne peuvent bien estimer le taux de recouvrement des résidus de blé. L'estimation de la quantité des résidus de blé par le NDI-2 semble fonctionner uniquement lorsque le taux de recouvrement est inférieur à 20 %. Au-delà de 20 %, les valeurs du NDI-2 saturent.

La figure 4.28c démontre les valeurs du NDI-1 et du NDI-2 des résidus d'herbe. En matière d'estimation du taux réel des résidus d'herbe, le NDI-2 donne de meilleurs résultats que le NDI-1. Par exemple, toutes les valeurs de l'indice traditionnel sont négatives et oscillent entre -10,53 % pour un sol nu à -6,67 % pour un sol totalement couvert de résidus. Les valeurs de l'indice modifié sont un peu plus représentatives et s'étendent entre 8,83 % pour un sol nu à 25,48 % pour un sol recouvert à 100 % de résidus. Tout comme lors de l'estimation des résidus de maïs et de blé, les deux indices NDI sous-estiment généralement le taux de recouvrement des résidus d'herbe. L'erreur standard d'estimation moyenne est de 74,61 % pour NDI-1 et de 49,53 % pour NDI-2. La distribution des points retrouvés à la figure 4.28c est anormale pour le NDI-1, car la valeur de tous les points est

d'environ -10 %. Bien que les points du NDI-2 sont un peu mieux distribués à un faible taux de couverture, il n'en demeure pas moins que cet indice sature à 30 %.

Observons la figure 4.28d portant sur la sensibilité du NDI aux résidus de soja à différents taux de couvertures. Tout d'abord, il est évident que l'indice traditionnel (NDI-1) est moins efficace que l'indice modifié (NDI-2). Effectivement, certaines valeurs du NDI-1 sont négatives et s'étalent entre -9,35 % pour un sol nu à 6,15 % pour un sol entièrement recouvert de résidus. Par contre, les valeurs du NDI-2 sont plus représentatives et se répartissent entre 8,83 % pour un sol dépourvu de résidus à 39,27 % pour un sol totalement recouvert de résidus. Par ailleurs, le NDI-1 sous-estime le pourcentage de couverture des résidus de soja, tandis que le NDI-2 surestime ce taux de couverture jusqu'à l'occurrence de 30 %. Au-delà de 40 %, il a tendance à sous-estimer ce taux de recouvrement. L'erreur standard d'estimation moyenne est de 47,91 % pour le NDI-1 et de 28,73% pour le NDI-2. La distribution des points du NDI-1 retrouvés à la figure 4.28d prouve que cet indice ne peut être utilisé pour estimer convenablement le taux de recouvrement des résidus de soja, car les points sont tous situés près de 0 % indépendamment du taux de couverture des résidus. Par contre, le NDI-2 semble fonctionner relativement bien jusqu'à ce que son taux de recouvrement atteigne 30%. Dépassé le seuil des 30 %, cet indice sature.

La figure 4.28e illustre le comportement du NDI aux résidus de tournesol à différents taux de couverture. Il démontre que l'indice traditionnel (NDI-1) donne encore une fois de moins bons résultats que l'indice modifié (NDI-2). La très grande majorité des valeurs du NDI-1 sont négatives et se dispersent entre -25,56 % pour un sol nu à 0,14 % pour 100 % de résidus. Par contre, les

valeurs du NDI-2 s'étendent entre 8,83 % pour un sol nu à 21,47 % pour lorsque le taux réel de recouvrement est de 27,29 % pour ainsi chuter à 11,94 % lorsque ce taux de recouvrement atteint 100 %. Le NDI-1 sous-estime la quantité de résidus de tournesol, alors que le NDI-2 surestime les résidus de tournesol jusqu'à 20 %. Lorsque le taux de couverture dépasse la barre des 20 %, il sous-estime la quantité de tournesol. L'erreur standard d'estimation moyenne est de 62,32 % pour NDI-1 et de 39,04 % pour NDI-2. En observant la distribution des points du NDI-1, nous constatons que cet indice donne de mauvais résultats pour l'estimation des résidus de tournesol. Les points du NDI-1 ne suivent aucune logique, car plus le taux réel de recouvrement augmente, plus les valeurs de cet indice diminuent. Par ailleurs, le NDI-2 donne des résultats satisfaisants jusqu'à ce qu'il atteigne un taux de recouvrement de 30 %. Au-delà de ce taux, le NDI-2 sature et va même jusqu'à diminuer. Encore une fois, le stade de dégradation assez élevé des résidus de tournesol peut expliquer en très grande partie les problèmes de cet indice quant à l'estimation de son taux de recouvrement.

Pour conclure, il est évident que l'indice traditionnel (NDI-1) est moins efficace que l'indice modifié (NDI-2) pour l'estimation du taux de recouvrement des résidus de cultures. Le NDI-2 offre des résultats relativement acceptables lors de l'estimation des résidus de soja avec une erreur standard d'estimation de 28,73 %. L'indice NDI-1 donne, cependant, les moins bons résultats lors de l'estimation des résidus d'herbe (erreur standard d'estimation de 74,61 %). En général, les deux indices tendent à sous-estimer la quantité de résidus de cultures. De plus, le NDI-2 fonctionne mieux lorsque le taux est inférieur à environ 30 % pour tous les types de résidus.

4.5.4 SACRI (Soil Adjusted Corn Residue Index)

En ce qui concerne le comportement du SACRI (annexe 3) en fonction des différents types de résidus de cultures, deux versions du même indice ont été calculés. Le SACRI-1 est l'indice traditionnel qui considère les mêmes régions spectrales que celles démontrés efficaces dans le cas du TM de Landsat. Les bandes 27 (827,6 nm) et 104 (2109,7 nm) du capteur Probe-1 ont été considéré du fait qu'elles couvrent ces mêmes régions spectrales. Le SACRI-2 est l'indice modifié utilisant les canaux du capteur Probe-1 les plus performants, c'est-à-dire les canaux 36 (943 nm) et 115 (2303 nm). Lors du calcul des indices SACRI, un nouveau paramètre entre en considération, soit celui de la droite des sols nus. La figure 4.29 représente la droite des sols nus du SACRI-1 (Probe-1 (27/104)) ainsi que celle du SACRI-2 (Probe-1 (36/115)).

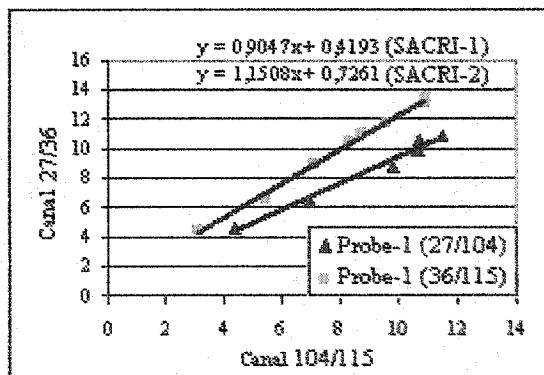


Figure 4.29: Droites des sols nus de l'indice SACRI (Probe-1 (27/104) = SACRI-1; Probe-1 (36/115) = SACRI-2).

La figure 4.30a représentant les valeurs du SACRI sur un sol recouvert de résidus de maïs démontre que l'indice traditionnel (SACRI-1) est moins efficace que l'indice modifié (SACRI-2). Le SACRI-1 génère des valeurs négatives oscillant entre -1,31 % pour un sol exempt de résidus à

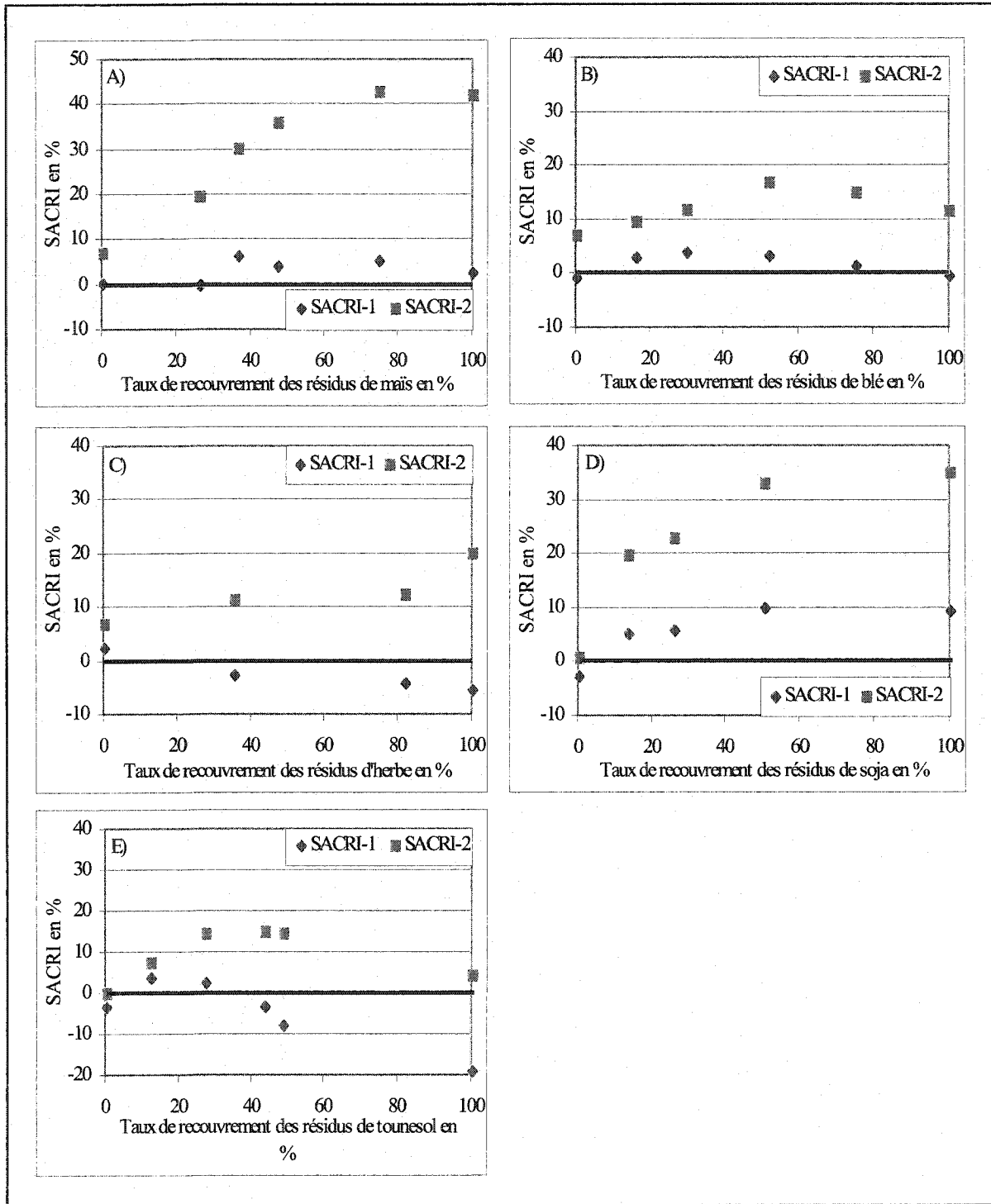


Figure 4.30: Indices de résidus de cultures SACRI de sols recouverts de différents taux de couvertures de résidus calculés à partir des mesures de réflectances au sol acquises à l'aide du GER3700 et ré-échantillonnées dans les bandes du capteur hyperspectral Probe-1: maïs (A), blé (B), herbe (C), soja (D) et tournesol (E).

6,23 % pour un sol recouvert à 100 % de résidus de maïs. Par contre, les valeurs du SACRI-2 sont plus représentatives et s'étendent entre 8,01 % pour un sol nu à 41,92 % pour un sol complètement couvert de résidus. L'erreur standard moyenne est estimée à 54,57 % pour SACRI-1 et à 28,59 % pour SACRI-2. Ces deux indices sous-estiment le pourcentage des résidus de maïs. La figure 4.30a démontre les limites du SACRI-1 pour estimer le pourcentage des résidus de maïs. Par exemple, toutes les valeurs sont proches de 0 % peu importe le taux réel de recouvrement des résidus. Par ailleurs, les estimations des résidus de maïs par le SACRI-2 sont plus adéquates lorsque le taux de recouvrement est inférieur à 45 %. Par contre, cet indice donne de mauvaises estimations lorsque le taux de recouvrement des résidus est supérieur à 60 %. Aussi, le problème de saturation survient lorsque ce taux excède 75 %.

La figure 4.30b représente la sensibilité du SACRI-1 et SACRI-2 aux résidus de blé. L'indice traditionnel (SACRI-1) ainsi que l'indice modifié (SACRI-2) laissent à désirer. Par exemple, les valeurs du SACRI-1 se répartissent entre -0,88 % pour un sol sans résidus à 3,81 % pour un sol entièrement couvert de résidus. Par contre, les valeurs du SACRI-2 s'étendent entre 7,0 % pour un sol sans résidus à 16,79 % lorsque le taux réel de recouvrement des résidus de blé est de 52 % pour ensuite chuter à 11,54 % lorsque ce taux de recouvrement atteint 100 %. Tout comme lors de l'estimation des résidus de maïs, les deux indices SACRI sous-estiment le taux réel de recouvrement des résidus de blé. L'erreur standard d'estimation moyenne est de 55,97 % et de 46,75 % pour SACRI-1 et SACRI-2, respectivement. Les points du SACRI-1 retrouvés à la figure 4.30b démontrent qu'il est tout simplement impossible d'estimer correctement la quantité des résidus de blé car ces points sont distribués horizontalement, ne dépassant jamais 3,81 %. Les points du

SACRI-2 sont assez bien distribués jusqu'à ce que le taux réel de recouvrement du blé atteigne 15,9%. Entre 15,9 % à 52 % les valeurs stagnent et entre dans un pseudo-palier de saturation pour ensuite diminuer graduellement.

La sensibilité du SACRI-1 et du SACRI-2 aux résidus d'herbe est montré à la figure 4.30c. Pour estimer le taux réel des résidus d'herbe, l'indice modifié donne des résultats un peu meilleurs que l'indice traditionnel. En effet, presque toutes les valeurs du SACRI-1 sont négatives et s'échelonnent entre -5,56 % pour un sol nu à 2,27 % pour un sol totalement recouvert de résidus. Par contre, les valeurs du SACRI-2 sont un peu plus représentatives et se dispersent entre 7,0 % pour un sol nu à 19,8 % pour un sol couvert à 100 % de résidus. Tout comme lors de l'estimation des résidus de maïs et de blé, les deux indices SACRI sous-estiment le taux de recouvrement des résidus d'herbe. L'erreur standard moyenne est d'environ 70,65 % pour l'indice traditionnel (SACRI-1) et 54,48 % pour l'indice modifié (SACRI-2). La distribution des points de la figure 4.30c est anormale pour le SACRI-1, car les valeurs des points diminuent de façon constante au lieu d'augmenter. En d'autres termes, plus le taux réel de recouvrement des résidus est élevé, plus les valeurs du SACRI-1 sont basses. La sensibilité du SACRI-2 est différente. Par exemple, entre 0 % et 80 % de taux de couverture des résidus d'herbe les valeurs du SACRI-2 sature pour ensuite augmenter un peu lorsque le taux réel de recouvrement croît à 100 %.

En observant la figure 4.30d portant sur le SACRI d'un sol recouvert de résidus de soja, plusieurs conclusions peuvent être notées. Tout d'abord, il est évident que l'indice traditionnel (SACRI-1) est moins efficace que l'indice modifié (SACRI-2), car les valeurs du SACRI-1 oscillent

entre -2,69 % pour un sol dépourvu de résidus à 9,43 % pour un sol entièrement couvert de résidus. Tandis que celles du SACRI-2 s'étendent entre 0,75 % pour un sol nu et 34,98 % pour un sol recouvert à 100 % de résidus. Ajoutons que les deux indices tendent à sous-estimer le pourcentage réel du taux de couverture des résidus de soja. L'erreur standard moyenne est d'environ 45,48 % pour SACRI-1 et 30,28 % pour SACRI-2. La valeur des points du SACRI-1, telle qu'elle est montrée à la figure 4.30d, ne permet pas de bien estimer la quantité réelle des résidus de soja. Dès 13,38 % de taux de recouvrement de résidus de soja, il y a un problème de saturation. Les points du SACRI-2 sont mieux distribués. Lorsque le taux de recouvrement des résidus de soja est inférieur à 25 %, cet indice donne de bons résultats. Par contre, lorsque le taux réel de couverture dépasse la marge des 50 %, le SACRI-2 sature.

La figure 4.30e porte sur la sensibilité du SACRI aux résidus de tournesol. Bien que le SACRI-1 ainsi que le SACRI-2 donnent des résultats insatisfaisants, il n'en demeure pas moins que l'indice traditionnel est encore moins efficace que l'indice modifié. Effectivement, la majorité des valeurs du SACRI-1 sont négatives et se répartissent entre -19,19 % pour un sol nu à 3,55 % pour un sol complètement couvert de résidus. Par contre, les valeurs du SACRI-2 s'étendent entre 0,19 % pour un sol nu à 14,89 % pour un sol couvert à 100 % de résidus. Les deux indices SACRI sous-estiment le taux de recouvrement des résidus de tournesol. L'erreur standard moyenne est d'environ 58,24 % pour l'indice traditionnel et 43,55 % pour l'indice modifié. La distribution des points du SACRI-1 démontre que cet indice est incapable de bien estimer le taux des résidus de tournesol. Les points ne suivent aucune logique, car dès 12,35 % de couverture des résidus de tournesol, les valeurs du SACRI-1 diminuent sans cesse au lieu d'augmenter. Par ailleurs, les points du SACRI-2 sont

relativement bien distribués lorsque le taux de recouvrement est faible, plus particulièrement entre 0 % à 27,29 %. Entre 27,29 % et 48,76 %, les valeurs du SACRI-2 stagnent, pour ensuite diminuer graduellement jusqu'à ce que le taux réel de recouvrement atteigne 100 %.

En somme, l'indice modifié (SACRI-2) est plus efficace que l'indice traditionnel (SACRI-1) pour estimer la quantité de résidus de cultures sur une terre agricole. Le SACRI-2 donne de meilleurs résultats pour l'estimation des résidus de maïs avec une erreur standard d'estimation moyenne de 28,59 %. L'indice traditionnel procure, quant à lui, les moins bons résultats pour l'estimation des résidus d'herbe avec une erreur standard d'estimation de 70,65 %. Les deux indices sous-estiment la présence des résidus de cultures. Ajoutons que le SACRI-2 se comporte mieux lorsque le taux de recouvrement est faible.

4.5.5 MSACRI (Modified Soil Adjusted Corn Residue Index)

Pour ce qui est du calcul du MSACRI (annexe 3) en considérant les divers types de résidus de cultures nous avons considéré deux différentes combinaisons. Le MSACRI-1 est l'indice traditionnel qui considère les mêmes régions spectrales que celles montrées efficaces dans le cas du TM de Landsat. Les canaux 84 (1655,8nm) et 110 (2216,5 nm) du capteur Probe-1 ont été considéré du fait qu'ils couvrent ces mêmes régions spectrales. Le MSACRI-2 est l'indice modifié utilisant les canaux du Probe-1 les plus performants, c'est-à-dire les canaux 36 (943 nm) et 115 (2303 nm). Tout comme lors du calcul du SACRI, le MSACRI prend également en considération la droite des sols nus. Les droites sont représentées à la figure 4.31.

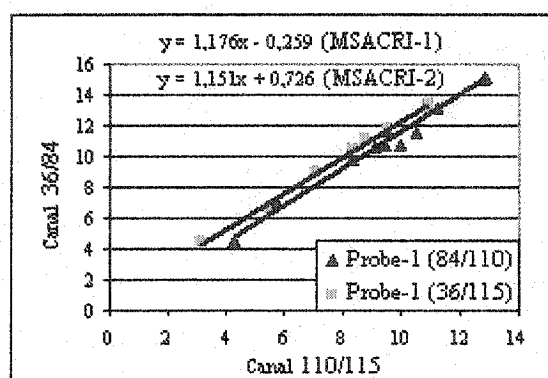


Figure 4.31: Droites des sols nus de l'indice MSACRI (Probe-1 (84/110) = MSACRI-1; Probe-1 (36/115) = MSACRI-2).

La figure 4.32a démontre que l'indice traditionnel (MSACRI-1) est plus efficace que l'indice modifié (MSACRI-2) pour l'estimation des résidus de maïs. À titre d'exemple, les valeurs estimées par MSACRI-1 oscillent entre -3,9 % pour un sol dépourvu de résidus à 73,24 % pour un sol recouvert à 100 % de résidus avec une erreur standard moyenne de 22,69 %. Par contre, les valeurs estimées par MSACRI-2 se répartissent entre 1,21 % pour un sol nu à 133,34 % pour un sol entièrement recouvert de résidus avec une erreur standard moyenne de 39,82 %. Il est très intéressant d'observer que toutes les valeurs du MSACRI-1 sous-estiment la quantité de résidus de maïs peu importe le taux de recouvrement, tandis que toutes les valeurs du MSACRI-2 surestiment cette quantité. En ce qui concerne MSACRI-2, tel qu'illustré à la figure 4.32a, un problème de saturation se manifeste lorsque le taux de couverture des résidus franchit la barre des 75 %.

Contrairement à l'estimation des résidus de maïs par le MSACRI, l'estimation des résidus de blé est relativement adéquate par l'indice modifié (MSACRI-2) que par l'indice traditionnel (MSACRI-1). Les valeurs du MSACRI-1 se dispersent entre -9,09 % pour un sol nu à 48,91 % pour

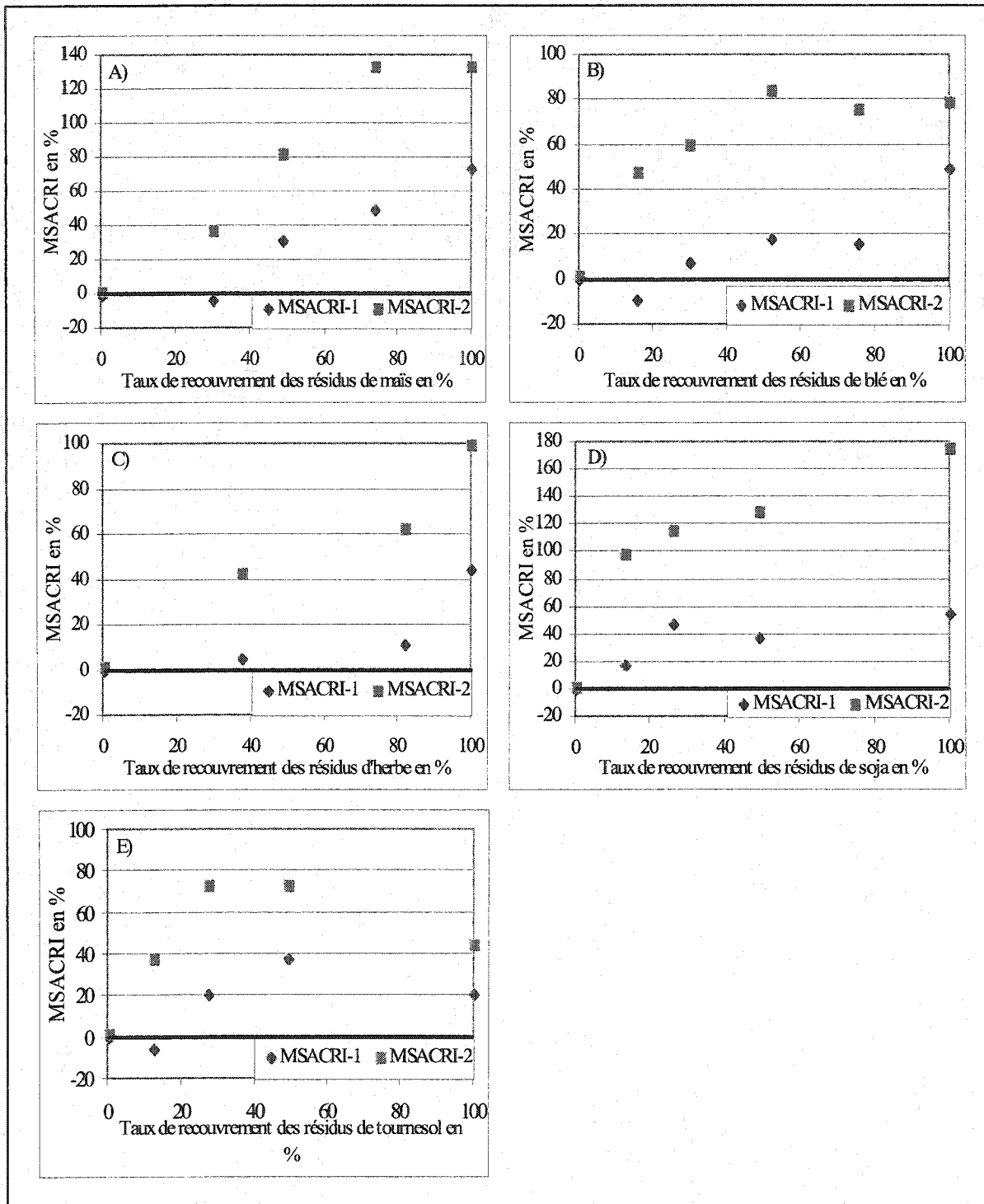


Figure 4.32: Indices de résidus de cultures MSACRI de sols recouverts de différents taux de couvertures de résidus calculés à partir des mesures de réflectances au sol acquises à l'aide du GER3700 et ré-échantillonnées dans les bandes du capteur hyperspectral Probe-1: maïs (A), blé (B), herbe (C), soja (D) et tournesol (E).

un sol couvert à 100 % de résidus, alors que celles du MSACRI-2 se répartissent entre 1,21 % pour un sol nu à 78,54 % pour un sol complètement recouvert de résidus. L'erreur standard moyenne est d'environ 37,5 % pour MSACRI-1 et 23,87 % pour MSACRI-2. L'indice traditionnel (MSACRI-1) sous-estime le taux de recouvrement des résidus de blé, tandis que l'indice modifié (MSACRI-2) surestime ce taux lorsque ce dernier est inférieur à 60 %. Tel que démontré à la figure 4.32b, la distribution des points du MSACRI-1 laisse à désirer. Lorsque le taux de recouvrement des résidus de blé est faible (15,9 %) la valeur du MSACRI-1 est négative. Entre 29,8 % et 75,42 % de taux de recouvrement des résidus de blé, les points sont répartis horizontalement à environ 15 % le long de l'axe des y, pour ensuite augmenter subitement lorsque le taux réel de recouvrement atteint 100 %. Pour le MSACRI-2, la distribution des points semble plus cohérente. Bien que l'indice surestime le taux réel de recouvrement, il n'en demeure pas moins que jusqu'à un taux de couverture de 50 %, les valeurs de cet indice augmentent. Au-delà de 50 %, la distribution devient moins bonne, car le MSACRI-2 sature et les points sont répartis horizontalement à environ 80 % le long de l'axe des y.

Par ailleurs, lorsque nous considérons les résidus d'herbes (figure 4.32c) le MSACRI-2 est efficace, tandis que l'indice traditionnel donne de moins bons résultats. En effet, les valeurs du MSACRI-2 sont situées entre 1,21 % pour un sol nu à 99,0 % pour un sol recouvert à 100 % de résidus avec une erreur standard moyenne de 10,21 %. Par contre, les valeurs du MSACRI-1 s'étendent entre -0,59 % pour un sol dépourvu de résidus à 44,02 % pour un sol entièrement couvert de résidus avec une erreur standard moyenne de 47,92 %. Le MSACRI-1 sous-estime la quantité de résidus d'herbes, tandis que le MSACRI-2 a tendance à très bien estimer cette quantité de résidus, à l'exception d'une occasion où le taux de recouvrement des résidus est de 81,84 % alors que

l'indice sous-estime la quantité de résidus d'herbe à 62,27 %. Ajoutons que la distribution des points de la figure 4.32c est excellente pour le MSACRI-2, car ces derniers sont répartis de manière linéaire. La distribution des points de MSACRI-1 est moins bonne, car entre 0 % et 81,84 % de taux réel de recouvrement, les valeurs de cet indice sont plutôt stables.

La figure 4.32d illustre le comportement de l'indice MSACRI vis-à-vis les résidus de soja. Cette fois-ci, le MSACRI-1 estime mieux le taux réel de résidus de soja que le MSACRI-2. Les valeurs de l'indice traditionnel se dispersent entre -0,59 % pour un sol nu à 55,07 % pour un sol recouvert à 100 % de résidus avec erreur standard moyenne de 22,82 %. Par contre, les valeurs de l'indice modifié s'échelonnent entre 1,21 % pour un sol nu à 174,92 % pour un sol entièrement recouvert de résidus avec une erreur standard moyenne de 73,64 %. Lorsque le taux de recouvrement des résidus est inférieur à 26,05 %, le MSACRI-1 surestime la quantité réelle de résidus. Cependant, lorsque ce taux dépasse 26,05 %, cet indice sous-estime la quantité des résidus de soja. Par ailleurs, le MSACRI-2 tend à surestimer de beaucoup les valeurs réelles des résidus de soja. La distribution des points du MSACRI-1, telle que présentée à la figure 4.32d, démontre que cet indice fonctionne mieux lorsque le taux de recouvrement est inférieur à 26,05 %, car au-delà de ce seuil, l'indice sature. Quant au MSACRI-2, il est évident qu'il ne peut être utilisé pour estimer adéquatement le taux réel des résidus de soja.

La figure 4.32e montre le comportement du MSACRI en considérant des résidus de tournesol. Les valeurs du MSACRI-1 se dispersent entre -0,59 % pour un sol nu à 37,91 % pour un sol recouvert à 100 % de résidus avec une erreur standard moyenne de 36,95 %. Par contre, les

valeurs du MSACRI-2 oscillent entre 1,21 % pour un sol nu à 73,26 % pour un sol totalement recouvert de résidus avec une erreur standard moyenne de 36 %. L'analyse des erreurs standards des deux indices ne permet pas de déterminer lequel est le meilleur pour estimer le taux réel des résidus de tournesol. Le MSACRI-1 sous-estime le taux de recouvrement des résidus de tournesol, tandis que MSACRI-2 surestime généralement ce taux de recouvrement. La distribution des points de la figure 4.32e démontre que le MSACRI-1 offre des résultats satisfaisants lorsque le taux de couverture est inférieur à 50 %. Au-delà de 50 %, l'indice laisse à désirer, car les valeurs diminuent au lieu d'augmenter. Par ailleurs, le MSACRI-2 donnent des résultats plutôt ordinaires peu importe le taux de recouvrement. Cependant, entre 0 % et 27,29 % de taux de recouvrement, les valeurs de l'indice augmentent, pour ensuite stagner entre 27,29 % et 48,76 % et diminuer à 100 %.

Pour conclure, il est extrêmement difficile de terminer en affirmant lequel des deux indices MSACRI est supérieur. Quoiqu'il en soit, pour l'estimation des résidus de plus grandes tailles (soja et maïs), le MSACRI-1 a donné de meilleurs résultats. Par contre, pour l'estimation des résidus de plus petites tailles, c'est-à-dire le blé et l'herbe, le MSACRI-2 s'avère le meilleur outil de travail. De plus, il est très intéressant d'observer que l'indice traditionnel (MSACRI-1) a généralement tendance à sous-estimer la quantité de résidus de cultures, tandis que l'indice modifié (MSACRI-2) surestime cette quantité de résidus.

4.5.6 CRIM (Crop Residue Index Multiband)

Le CRIM (annexe 3) est un indice de résidus qui est complètement différent des autres utilisés jusqu'à présent. Tel que démontré à la figure 4.33, pour trouver l'indice d'un point (M), il

faut diviser la tangente de l'angle entre la droite des sols (S) et celle du point (M) par la tangente de l'angle entre la droite des sols (S) et celle des résidus (R).

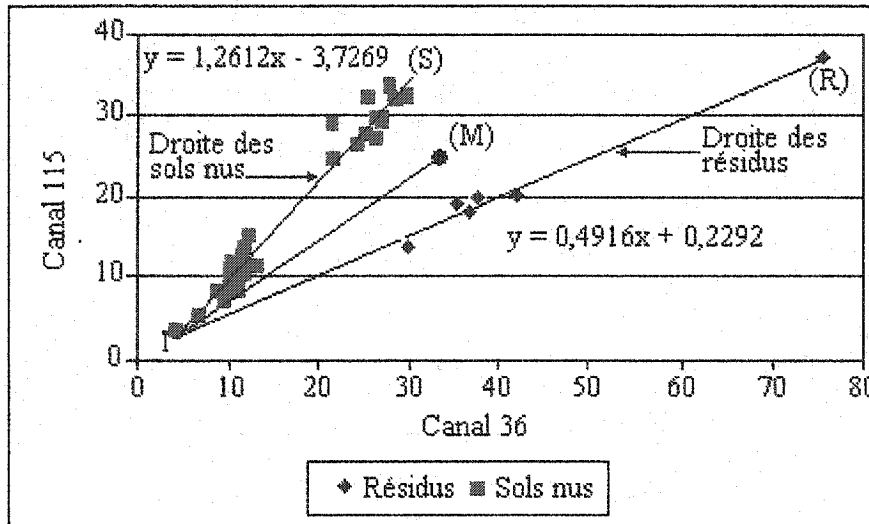


Figure 4.33: Droites des sols nus et des résidus de cultures (canaux 36 versus 115) utilisée pour le calcul de l'indice CRIM.

La figure 4.34a montre les valeurs du CRIM sur un sol recouvert de résidus de maïs. Les valeurs de cet indice s'étendent entre 18,98 % pour un sol nu à 94,82 % pour un sol totalement recouvert de résidus. Ce dernier a tendance à surestimer le taux réel des résidus de maïs à l'exception d'une occasion où le taux est de 100 % alors qu'il est estimé à 94,82 %. L'erreur standard d'estimation moyenne sur le CRIM pour les résidus de maïs est d'environ 20,2 %. Tel que démontré à la figure 4.34a, la quantité de résidus estimée augmente en fonction de l'augmentation du taux réel des résidus de maïs. Cet indice semble fonctionner mieux lorsque le taux de recouvrement est inférieur à 25 %. L'erreur moyenne est un peu plus grande lorsque le taux de recouvrement excède 25 % et un problème de saturation surgit lorsque le taux dépasse 75 %.

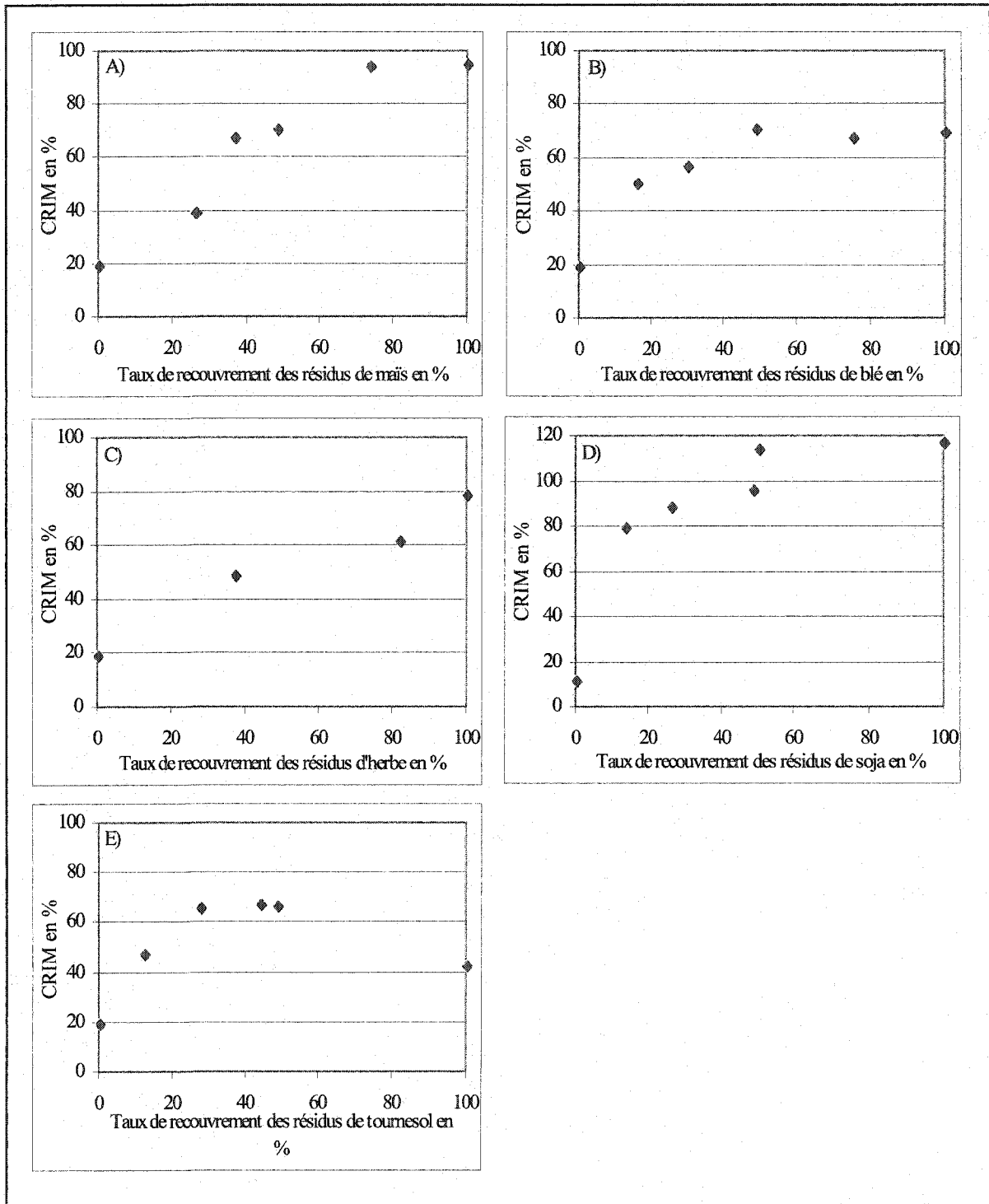


Figure 4.34: Indices de résidus de cultures CRIM de sols recouverts de différents taux de couvertures de résidus calculés à partir des mesures de réflectances au sol acquises à l'aide du GER3700 et ré-échantillonnées dans les bandes du capteur hyperspectral Probe-1: maïs (A), blé (B), herbe (C), soja (D) et tournesol (E).

Par ailleurs, si nous considérons les résidus de blé, les valeurs du CRIM se répartissent entre 18,98 % pour un sol dépourvu de résidus à 70,85 % pour un sol recouvert à 100 % de résidus. Tout comme lors de l'estimation des résidus de maïs, il surestime le taux de recouvrement des résidus de blé jusqu'à l'occurrence de 60 %. Dépassé ce seuil, il sous-estime le taux de recouvrement. L'erreur standard moyenne sur cet indice est de 24,97 %. En observant la figure 4.34b, force est de constater que le CRIM sature à 48,95 %.

Pour ce qui est des résidus d'herbe, affirmons que les valeurs du CRIM fluctuent entre 18,98% pour un sol nu à 78,56 % pour un sol complètement recouvert de résidus. De plus, cet indice a tendance à surestimer le taux réel des résidus à l'exception où le taux de recouvrement dépasse la marge des 80 %. L'erreur standard moyenne qui est de 18,54 % prouve l'acuité de cet indice. La distribution des points du CRIM lorsque nous considérons les résidus d'herbe présentée à la figure 4.34c est cohérente, car ils augmentent en fonction de l'augmentation du taux réel de recouvrement. Il est intéressant de noter que pour chaque point, l'erreur moyenne est toujours d'environ 20 % peu importe le taux de recouvrement.

La figure 4.34d montre le comportement et la sensibilité du CRIM aux résidus de soja. Les valeurs de cet indice se dispersent entre 18,98 % pour un sol nu à 116,86 % pour un sol entièrement couvert de résidus. Le CRIM tend à surestimer le taux réel des résidus de soja, peu importe son taux de recouvrement. L'erreur standard moyenne d'environ 50,05 % prouve qu'il est difficile d'utiliser cet indice pour estimer correctement la quantité réelle de résidus de soja. La distribution des points

présentée à la figure 4.34d est bien différente avec une saturation à environ 50,55 % du taux de couverture par les résidus de soja.

La sensibilité du CRIM aux résidus de tournesol est démontré à la figure 4.34e. Les valeurs de cet indice s'échelonnent entre 18,98 % pour un sol nu à 42,4 % pour un sol couvert à 100 % de résidus. Ajoutons que le CRIM surestime généralement le taux réel des résidus de tournesol, sauf lorsque ce taux atteint 100 %. L'erreur standard d'estimation moyenne des résidus de tournesol est de 34,79 %. La distribution des points (figure 4.34e) indique la faiblesse du CRIM pour l'estimation des résidus de tournesol. Par exemple, les valeurs augmentent de façon constante entre 0 % et 27,29%. De 27,29 % à 48,76 %, les valeurs du CRIM stagnent à environ 66 % dans un pseudo-palier pour ensuite diminuer. Cependant, le stade de dégradation assez élevé des résidus de tournesol peut expliquer en partie les déboires du CRIM pour bien estimer son taux de recouvrement.

En somme, cet indice semble relativement bien fonctionner pour des résidus clairs (maïs, blé et herbe). Par contre, il donne de moins bons résultats pour des résidus sombres et dans un stade de dégradation plus avancé (soja et tournesol). En général, l'indice CRIM surestime la quantité de résidus. Mis à part les résidus d'herbe, le CRIM sature assez facilement.

Afin de mesurer l'efficacité des divers indices utilisés, l'erreur standard moyenne des différents types de résidus de cultures (maïs, blé, herbe, soja et tournesol) a été calculée. Autrement dit, pour tous les indices utilisés, nous avons calculé la moyenne des erreurs standard en considérant les différents résidus et les divers taux de recouvrement. Tel que démontré au tableau 4.6, l'indice

ayant le plus faible erreur standard moyenne est le BI (22,30 %) suivie du CRIM (29,71 %), MSACRI-1 (33,58 %), MSACRI-2 (36,71%), NDI-2 (38,92 %), SACRI-2 (40,73 %), SACRI-1 (56,98 %), NDI-1 (60,4 %) et CAI (76,92 %). Il est très surprenant de constater que l'erreur standard moyenne du BI est plus basse que celle des indices semi-empiriques, c'est-à-dire le CRIM, SACRI et MSACRI, car ces derniers prennent en considération la droite des sols nus dans leurs calculs. Les sols nus de la ferme IHARF étaient foncés (basse réflectance). En raison de la formule du BI, les résultats ne seraient pas les mêmes si les sols de cette ferme étaient plus clairs. Effectivement, l'estimation du recouvrement des différents types de résidus serait plus élevée ce qui aurait augmenté l'erreur standard. Par conséquent, le CRIM, le MSACRI-1 ainsi que le MSACRI-2 sont les meilleurs indices pour estimer le taux de recouvrement des résidus en utilisant les mesures de réflectances acquises à l'aide du GER3700 et ré-échantillonnées dans les bandes du capteur hyperspectral Probe-1.

Il serait tout de même intéressant de noter les indices les plus performants pour estimer de façon individuelle les divers résidus de cultures utilisés. Le tableau 4.7 démontre que le CRIM et le MSACRI-1 sont les plus adéquats pour estimer le taux de recouvrement des résidus de maïs avec une erreur standard de 20,2 % et de 22,69 %, respectivement. Par ailleurs, les indices MSACRI-2 et CRIM s'avèrent les meilleurs pour l'estimation des résidus de blé avec une erreur standard de 23,87 % et 24,97 %, respectivement. En ce qui concerne les résidus d'herbe, mentionnons que le MSACRI-2 est le meilleur indice avec une erreur standard de 10,21 %. Avec une erreur standard de 22,82 %, le MSACRI-1 est le plus performant pour estimer la quantité réelle des résidus de soja.

Finalement, le CRIM (34,79 %), le MSACRI-2 (36,0 %) et le MSACRI-1 (36,95 %) sont les meilleurs indices pour estimer adéquatement les résidus de tournesol.

Tableau 4.6: Classification des indices de résidus selon l'erreur standard moyenne des différents résidus.

Rang final	Indice de résidus	Erreur standard moyenne
1 *	BI	22,30 %
2	CRIM	29,71 %
3	MSACRI-1	33,58 %
4	MSACRI-2	36,71 %
5	NDI-2	38,92 %
6	SACRI-2	40,73 %
7	SACRI-1	56,98 %
8	NDI-1	60,4 %
9	CAI	76,92 %

Tableau 4.7: Indices de résidus de cultures les plus adéquats pour estimer le taux réel de recouvrement des résidus de maïs, blé, herbe, soja et tournesol.

Résidus de cultures	Indices de résidus de cultures	Erreur standard
Maïs	CRIM et MSACRI-1	20,2 % et 22,69 %
Blé	MSACRI-2 et CRIM	23,87 % et 24,97 %
Herbe	MSACRI-2	10,21 %
Soja	MSACRI-1	22,82 %
Tournesol	CRIM, MSACRI-2 et MSACRI-1	34,79 %, 36,0 % et 36,95 %

4.5.7 Estimation du taux de couverture des résidus à l'aide des indices en considérant l'image hyperspectrale du capteur Probe-1

Les résultats des différents indices de résidus de cultures dérivés de l'image hyperspectrale Probe-1 sont limités à quatre sites spécifiques de la ferme IHARF (Figure 4.35). Le site 1 est une parcelle d'une dimension de 25 m par 25 m d'un sol nu fraîchement labouré où aucune trace de végétation et de résidus n'est présente. La parcelle du site 2 ayant la même dimension est recouverte à 100 % de résidus de cultures. Les résidus de cette parcelle ont été ajoutés quelques jours avant la prise de l'image hyperspectrale pour que ces derniers soient jeunes et brillants sans avoir commencé leur stade de dégradation et aussi pour avoir une parcelle de référence pour 100 % de taux de couverture. Le site 3 est composé de 71,32 % de résidus, 9,12 % de sol nu et 19,56 % de végétation vivante. Par ailleurs, le site 4 est composé de 44,62 % de résidus de cultures, 25,26% de sol nu et 30,12 % de végétation vivante. Afin de trouver les taux réels des résidus, de la végétation et des sols nus présents sur ces sites, des classifications de photographies numériques ont été effectuées par le module IsoData du logiciel PCI. La série de figures 4.36 représente diverses cartes des résidus dérivées par les indices empiriques BI, CAI, NDI-1 et NDI-2 de la ferme IHARF. Par contre, la série de figures 4.37 représente différentes cartes des résidus dérivées par le biais des indices semi-empiriques SACRI-1, SACRI-2, MSACRI-1 et MSACRI-2 de la ferme IHARF. Ajoutons que les valeurs des ces indices ont été regroupées en sept différentes classes (tableau 4.8).

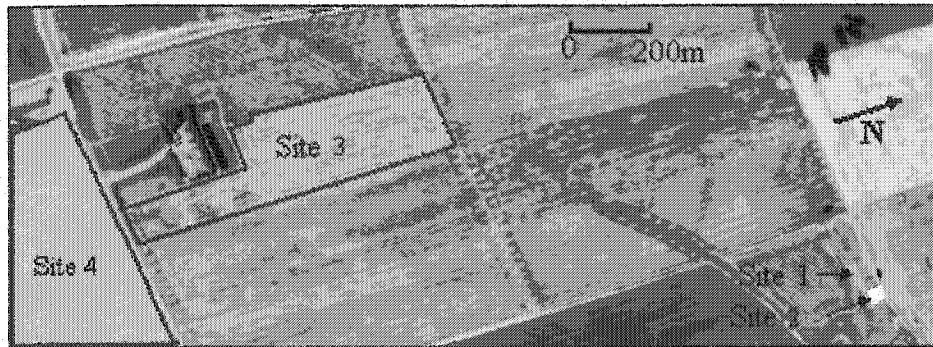


Figure 4.35: Composé coloré de l'image hyperspectrale du capteur Probe-1 de la ferme IHARF en Saskatchewan (Canaux 36, 84 et 115).

Tableau 4.8: Distribution des valeurs des indices regroupée en sept classes.

Numéro de la classe	Distribution en % des classes
1	0 % à 15 %
2	15 % à 30 %
3	30 % à 45 %
4	45 % à 60 %
5	60 % à 75 %
6	75 % à 90 %
7	90 % à 100 %

Tout d'abord, il est assez difficile de mesurer la précision des indices de résidus de cultures, car les résultats sont distribués dans sept classes, dont les six premières sont divisées en tranches de 15 %. Par exemple, au site 1, le taux réel des résidus est de 0 %, alors que le taux estimé par tous les indices est situé entre 15 % et 30 %. Est-ce que l'estimation est plus proche de 15 % ou plus proche de 30 % ? Afin de faciliter la tâche, nous allons prendre la moyenne des résultats. Or, le site 1 a été estimé entre 15 % et 30 % pour une estimation moyenne de 22,5 %.

En ce qui concerne le BI, tel que démontré à la figure 4.36a, plusieurs points peuvent être notés. Le site 2, où l'on retrouve un taux de couverture de 100 % de résidus de cultures, a très bien été estimé avec une valeur située entre 90 et 100 % pour une estimation moyenne de 95 %. Pour ce qui est du site 1 (0 % de résidus de culture), le BI a surestimé ce taux entre 15 et 30 % pour une estimation moyenne de 22,5 %. Quant au site 3 (71,32 % de résidus; 9,12 % de sol nu; 19,56 % de végétation), cet indice a sous-estimé la quantité de résidus avec une estimation entre 30 et 60 % pour une estimation moyenne de 45 %. De plus, aucun pixel représentant les sols nus n'a été identifié. Sur une note positive, le site 4 (44,62 % de résidus; 25,26 % de sol nu; 30,12 % de végétation) a bien été estimé par le BI (30 à 60 %) avec une estimation moyenne de 45 %. Cependant, aucun pixel des sols nus n'a été identifié. En guise de conclusion, les résultats obtenus avec cet indice ne sont pas adéquats pour bien estimer le taux de résidus de cultures de la ferme IHARF. Par exemple, lorsque le taux réel de recouvrement est d'environ 71,32 %, cet indice sous-estime ce taux avec une erreur relative de 36,9 % par rapport à la vérité terrain.

Les résultats obtenus par le CAI sont représentés à la figure 4.36b. Tout comme lors de l'estimation des résidus par le BI, le CAI a correctement estimé le taux de recouvrement des résidus du site 2 (100 % de résidus) avec des valeurs entre 90 et 100 % pour une estimation moyenne de 95%. Le site 1 (0 % de résidus) a encore une fois été surestimé avec des données variant entre 15 à 30 % pour une estimation moyenne de 22,5 %. L'indice a bien estimé la quantité de résidus du site 3 (71,32 % de résidus). La presque totalité des pixels de ce site a été estimée entre 60 à 75 % pour une estimation moyenne 67,5 %. Cependant, aucun pixel représentant le sol nu n'a été démontré. Le CAI a surestimé la quantité de résidus du site 4. La très grande majorité des pixels a été estimée entre 60

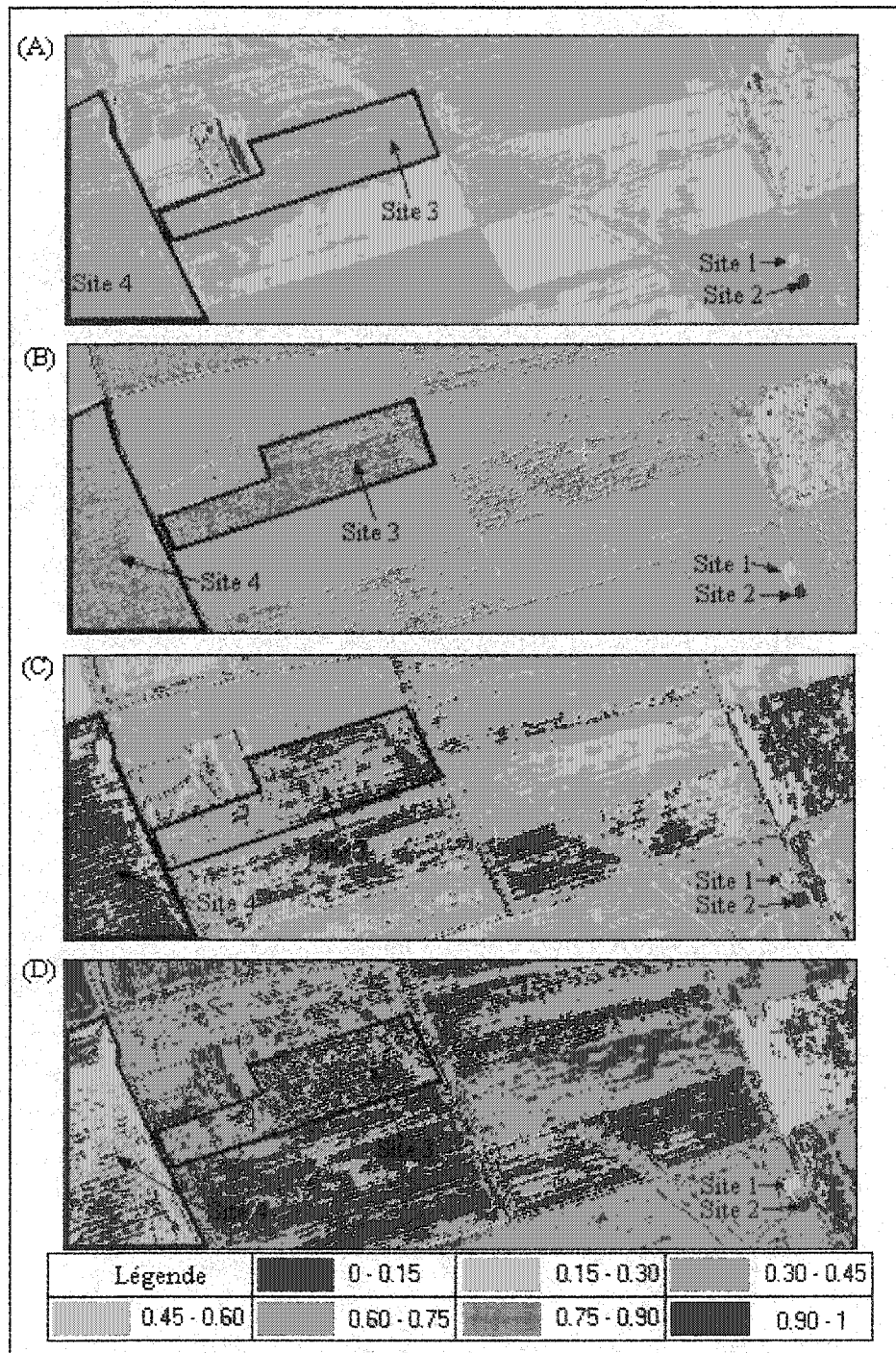


Figure 4.36: Indices empiriques BI (A), CAI (B), NDI-1 (C) et NDI-2 (D) de la ferme IHARF extraits de l'image hyperspectrale du capteur Probe-1.

à 75 % pour une estimation moyenne de 67,5 %, alors que le taux réel était de 44,62 %. De plus, aucun sol nu n'a été démontré même si la portion de ce dernier était de 25,26 %. En somme, les résultats du CAI permettent d'affirmer que cet indice a incorrectement estimé la quantité de résidus de la ferme IHARF. En effet, lorsque le taux de recouvrement est d'environ 45 %, cet indice surestime ce taux avec une erreur relative de 51,28 % par rapport à la vérité terrain.

Les valeurs des indices NDI-1 et NDI-2 de la ferme IHARF sont démontrées aux figures 4.36c et 4.35d. Ces deux indices ont correctement estimé le site 2 (100 % de résidus de cultures) avec une estimation entre 90 et 100 % pour une estimation moyenne de 95 %. En ce qui concerne le site 1 (0% de résidus de cultures), NDI-1 ainsi que le NDI-2 ont surestimé la quantité de résidus entre 15 et 30% pour une estimation moyenne de 22,5 %. En observant les résultats de ces deux indices du site 3 (71,32 % de résidus), plusieurs conclusions peuvent être notées. En ce qui concerne le NDI-1, un tiers des pixels a été classifié comme ayant un taux de recouvrement de résidus entre 30 à 45 %; un tiers a été classifié comme ayant un taux de recouvrement entre 45 à 60 % et un tiers entre 90 à 100%. Cependant, aucun pixel représentant le sol nu n'a été démontré. La grande majorité des pixels du NDI-2 ont surestimé le taux de couverture des résidus. Effectivement, ils ont été classifiés entre 90 et 100 % pour une estimation moyenne de 95 %. Le NDI-1 a grandement surestimé la quantité de pixels du site 4 (44,62 % de résidus). La majorité des pixels a été classifiée comme ayant un taux de recouvrement des résidus entre 90 à 100 % pour une estimation moyenne de 95 %. Environ un dixième des pixels a été classifiée comme ayant un taux de recouvrement variant de 15 à 30 %, ce qui représente les sols nus. Le NDI-2 a donné des résultats supérieurs au NDI-1. La majorité des pixels a été classifiée comme ayant un taux de recouvrement des résidus entre 45 à 60 % pour une

estimation moyenne de 52,5 %. Par contre, un tiers des pixels a été classifié comme ayant un taux de recouvrement des résidus entre 90 à 100 %, tandis qu'un dixième des pixels a été estimé comme ayant un taux de recouvrement entre 15 à 30 %, ce qui représente le sol nu. Les résultats obtenus avec le NDI-1 et le NDI-2 ne sont pas adéquats, car à maintes reprises ces derniers ont incorrectement estimé la quantité de résidus de la ferme IHARF. Par exemple, lorsque le taux de recouvrement est d'environ 45 %, le NDI-1 a surestimé ce taux avec une erreur relative de 112,91 % par rapport à la vérité terrain. De plus, lorsque le taux de recouvrement est d'environ 70 %, le NDI-2 a surestimé ce taux avec une erreur relative de 33,20 % par rapport à la vérité terrain, tandis que NDI-1 a sous-estimé ce taux avec une erreur relative de 36,90 % par rapport à la vérité terrain.

Les valeurs du SACRI-1 et SACRI-2 de la ferme IHARF sont démontrées aux figures 4.37a et 4.37b. En portant notre attention au site 2 (100 % de résidus), force est de constater que ces deux indices ont très bien estimé la quantité de résidus (90 à 100 %) avec une estimation moyenne de 95%. Pour le site 1 (0 % de résidus) ils ont surestimé la quantité de résidus entre 15 à 30 % pour une estimation moyenne de 22,5 %. En ce qui concerne le site 3, le SACRI-1 ainsi que le SACRI-2 ont sous-estimé le taux de recouvrement des résidus. Effectivement, la grande majorité des pixels a été classifiée comme ayant un taux de recouvrement entre 30 à 60 % pour une estimation moyenne de 45 %. Aucun sol nu n'a été démontré pour les deux indices. Le SACRI-1 a bien estimé la quantité de résidus du site 4 en ayant un taux de recouvrement entre 30 à 60 % pour une estimation moyenne de 45 %. Par contre, seulement quelques pixels ont été classifiés comme étant un sol nu alors que le taux réel du sol nu est de 25,26 %. De son côté, le SACRI-2 a mieux estimé la quantité de résidus du site 4. En effet, la moitié des pixels a été classifiée comme ayant un taux de recouvrement des

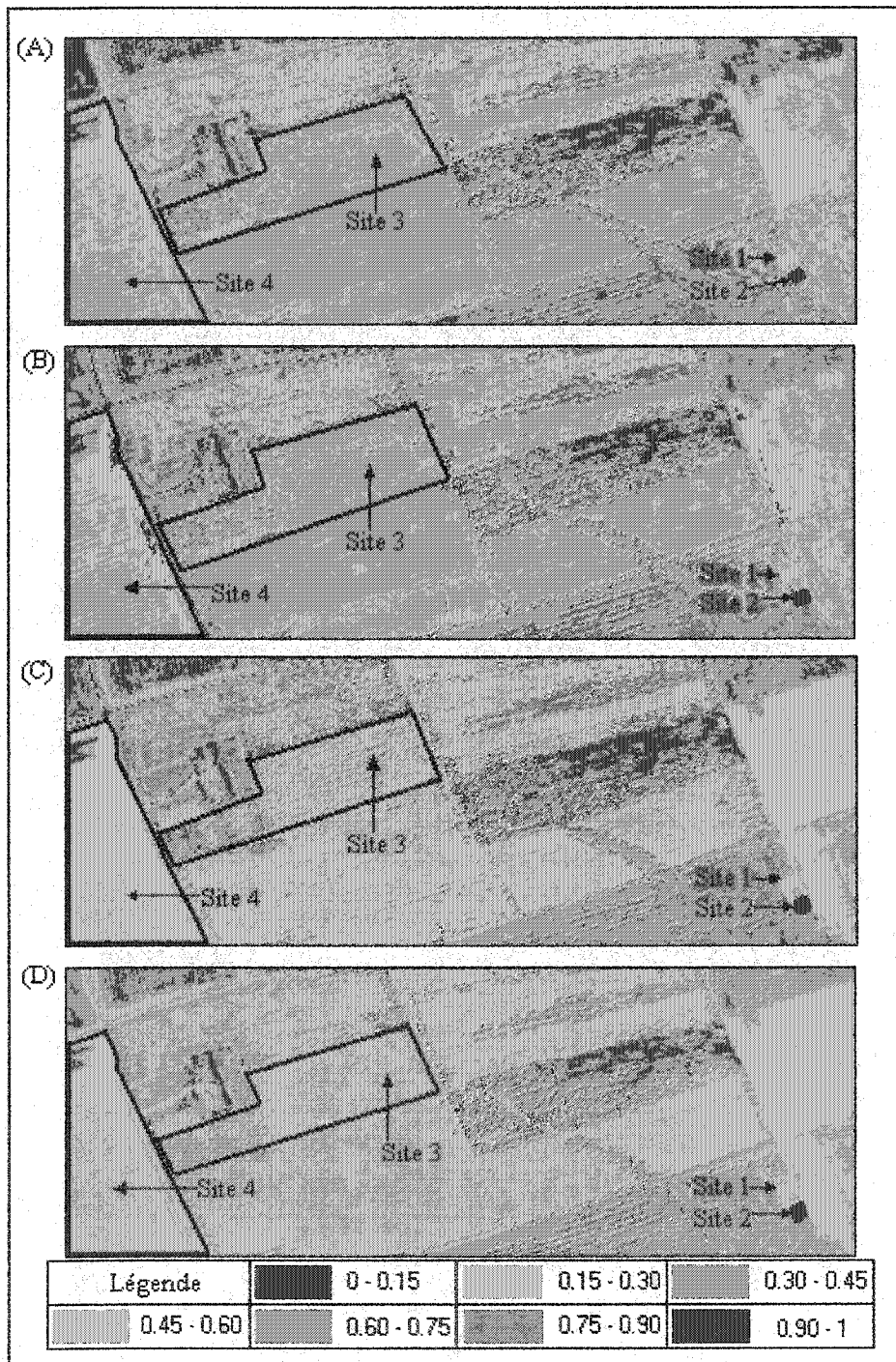


Figure 4.37: Indices semi-empiriques SACRI-1 (A), SACRI-2 (B), MSACRI-1 (C) et MSACRI-2 (D) de la ferme IHARF extraits de l'image hyperspectrale du capteur Probe-1.

résidus entre 30 à 45 % pour une estimation moyenne de 37,5 %, tandis que l'autre moitié a été estimée comme ayant un taux de recouvrement entre 15 à 30 % (sol nu). En conclusion, les deux indices SACRI ont sous-estimé la quantité de résidus du site 3 avec une erreur relative de 36,9 % par rapport à la vérité terrain. Par contre, le SACRI-2 a été plus adéquat lors de l'estimation des résidus du site 4.

En ce qui concerne les indices MSACRI-1 et MSACRI-2, tels que démontrés aux figures 4.37c et 4.37d, plusieurs conclusions peuvent être tirées. Les deux indices ont correctement estimé le taux de recouvrement des résidus du site 2 (100 % de résidus) avec une estimation entre 90 à 100% pour une estimation moyenne de 95 %. Pour le site 1 (0 % de résidus), ces deux indices ont surestimé la quantité de résidus entre 15 à 30 % pour une estimation moyenne de 22,5 %, alors que le taux réel du recouvrement des résidus est de 0 %. Le MSACRI-1 a correctement estimé la quantité de résidus du site 3. En effet, la grande majorité des pixels a été classifiée comme ayant un taux de recouvrement entre 45 et 75 % pour une estimation moyenne de 60 %, alors qu'environ un dixième des pixels représentant le sol nu a été estimé entre 15 à 30 %. Notons que la quantité réelle de sol nu du site 3 est de 9,12 %. Le MSACRI-2 n'a pas été aussi adéquat que le MSACRI-1 pour classifier les pixels du site 3. La très grande majorité des pixels a été classifiée comme ayant un taux de recouvrement des résidus entre 45 et 60 % pour une estimation moyenne de 52,5 %. En ce qui concerne le site 4 (44,62 % de résidus; 25,26 % de sol nu; et 30,12 % de végétation), six dixièmes des pixels de MSACRI-1 ont été classifiés comme ayant un taux de recouvrement des résidus entre 15 à 30 % et quatre dixièmes des pixels ont été classifiés comme ayant un taux de recouvrement entre 45 à 60 % pour une estimation moyenne de 52,5 %. Les résultats de MSACRI-2 sont similaires. La

moitié des pixels ont été estimés comme ayant un taux de recouvrement entre 15 à 30 %, tandis que l'autre moitié entre 45 à 60 % pour une estimation moyenne de 52,5 %. Bien que les indices MSACRI ont donné de bons résultats, il n'en demeure pas moins que le MSACRI-1 s'avère le meilleur indice, car il a été plus performant lors de l'estimation des quatre différents sites de la ferme IHARF. Les estimations des résidus de cultures des différents sites sont démontrées au tableau 4.9.

Tableau 4.9: Estimation du taux de recouvrement des résidus de cultures pour les sites 1, 2, 3 et 4 obtenue par les indices de résidus de cultures.

Indices	Site 1 (0 %)	Site 2 (100 %)	Site 3 (71,32 %)	Site 4 (44,62 %)
BI	15 - 30 %	90 - 100 %	30- 60 %	30 - 60 %
CAI	15 - 30 %	90 - 100 %	60 - 75 %	60 - 75 %
NDI-1	15 - 30 %	90 - 100 %	30- 60 % et 90 - 100 %	90 - 100 %
NDI-2	15 - 30 %	90 - 100 %	90 - 100 % et 30 - 60 %	45 - 60 %
SACRI-1	15 - 30 %	90 - 100 %	30- 60 %	30 - 60 %
SACRI-2	15 - 30 %	90 - 100 %	30- 60 %	30 - 45 %
MSACRI-1	15 - 30 %	90 - 100 %	45 - 75 %	45 - 60 %
MSACRI-2	15 - 30 %	90 - 100 %	45 - 60 %	45 - 60 %

En guise de conclusion, nous devons admettre que tous les indices de résidus de cultures utilisés ont très bien estimé le taux de recouvrement des résidus du site 2 (100 % de résidus). Le taux réel de couverture des résidus de ce site était de 100 %, alors que tous les indices ont estimé ce taux entre 90 et 100 % pour une estimation moyenne de 95 %. Les différents indices ont tous surestimé le taux de recouvrement du site 1 (0 % de résidus) avec une erreur absolue de 22,5 % par rapport à la vérité terrain. La quantité de résidus du site 3 (71,32 % de résidus) a été sous-estimée par le BI,

le NDI-1, le SACRI-1, le SACRI-2 et le MSACRI-2 avec des erreurs relatives de 36,9 %, 36,9 %, 36,9 %, 36,9 % et 26,39 %, respectivement, par rapport à la vérité terrain. Par contre, le NDI-2 a surestimé la quantité de résidus de ce site avec une erreur relative de 33,2 %. Le CAI a correctement estimé le nombre de résidus, cependant aucun pixel représentant le sol nu n'a été démontré même si 9,12 % de recouvrement de ce site est du sol nu. Quant au MSACRI-1, il a été en mesure de mieux estimer la quantité de résidus du site 3 avec une estimation moyenne de 60 %, alors qu'environ un dixième des pixels représentant le sol nu a été estimé entre 15 à 30 %. Par ailleurs, la quantité de résidus du site 4 (44,62 % de résidus) a été surestimée par deux indices, soient par le CAI et par le NDI-1 avec des erreurs relatives de 51,28 % et 112,91 %, respectivement. Le BI, le NDI-2 ainsi que le SACRI-1 ont bien estimé le taux de couverture des résidus de culture du site 4. Par contre, ces trois indices n'ont pas été en mesure de bien estimer la présence du sol nu. Quant aux indices SACRI-2, MSACRI-1 et MSACRI-2, notons que ces derniers ont relativement bien estimé la quantité de résidus du site 4 avec des erreurs relatives, respectivement de 15,96 %, 17,66 % et 17,66 % par rapport à la vérité terrain. De plus, ces trois indices ont démontré la présence du sol nu. Bref, le MSACRI-1 est l'indice le plus performant pour la cartographie et l'estimation adéquate pour l'ensemble des quatre sites de la ferme IHARF.

Le tableau 4.10 illustre la classification des indices selon l'erreur standard moyenne obtenue par les mesures au sol ainsi que la classification des indices selon l'erreur relative moyenne obtenue par les mesures de l'image hyperspectrale de la ferme IHARF. D'après les résultats récapitulés dans ce tableau, l'indice ayant la plus faible erreur relative moyenne est le MSACRI-1 (15,26 %) suivi du SACRI-1 (16,31 %), BI* (16,31 %), MSACRI-2 (17,89 %), NDI-2 (19,59 %), SACRI-2 (20,09 %),

CAI (21,04 %) et NDI-1 (44,33 %). Les résultats indiquent que les indices de résidus de cultures obtenus à l'aide de l'image hyperspectrale du capteur Probe-1 corroborent en partie ceux obtenus par les mesures au sol. Par exemple, les meilleurs indices obtenus lors des mesures au sol des différents types de résidus sont le CRIM et le MSACRI-1. Tel que mentionné précédemment, l'indice le plus adéquat lors de l'estimation des résidus de cultures de l'image hyperspectrale de la ferme IHARF est également le MSACRI-1. Il ne faut pas oublier que la validation des indices ne se fait pas uniquement au niveau de la précision de l'estimation des résidus de cultures, mais également au niveau de la cartographie représentative de ces derniers par rapport à la vérité terrain. Le MSACRI-1 est l'indice ayant cartographié plus adéquatement la répartition des résidus de cultures sur les terres agricoles de la ferme IHARF. C'est ainsi que cet indice sera utilisé ultérieurement pour être comparé à la méthode des réseaux de neurones pour l'estimation et la cartographie d'autres sites.

Tableau 4.10: Classification des indices selon l'erreur standard moyenne (ESM) obtenue ainsi que selon l'erreur relative moyenne (ERM) de la ferme IHARF.

Rang	Mesures au sol		Image hyperspectrale		
	Indices	ESM	Rang	Indices	ERM
1 *	BI	22,30 %	2	BI *	16,31 %
2	CRIM	29,71 %		-----	-----
3	MSACRI-1	33,58 %	1	MSACRI-1	15,26 %
4	MSACRI-2	36,71 %	4	MSACRI-2	17,89 %
5	NDI-2	38,92 %	5	NDI-2	19,59 %
6	SACRI-2	40,73 %	6	SACRI-2	20,09 %
7	SACRI-1	56,98 %	2	SACRI-1	16,31 %
8	NDI-1	60,4 %	8	NDI-1	44,33 %
9	CAI	76,92 %	7	CAI	21,04 %

4.6 La méthode des réseaux de neurones pour la cartographie et l'estimation du taux de couverture des résidus de cultures

La section portant sur la méthode des réseaux de neurones est divisée en deux parties distinctes: la première consiste en la cartographie et l'estimation du taux de recouvrement des résidus de cultures; et la deuxième sur la cartographie et l'estimation du taux de couverture de la végétation et des sols nus. Afin d'être en mesure de bien vérifier et valider l'efficacité de cette méthode, dix sites à différents taux de résidus de cultures, de végétation et de sols nus ont été considérés par rapport à la vérité terrain. Dans le but de trouver le taux réel des résidus de cultures, de la végétation et des sols nus, des classifications des photographies numériques ont été effectuées avec le module IsoData du système PCI. Ces classifications sont représentées aux figures 4.38 et 4.39. Ensuite, une classification de l'image hyperspectrale du capteur aéroporté Probe-1 a été effectuée par la méthode des réseaux de neurones et celle du meilleur indice de résidus de cultures, c'est-à-dire le MSACRI-1, afin de comparer ces résultats avec ceux de la vérité terrain.

Un composé coloré des images hyperspectrales du capteur Probe-1 des dix sites a été affiché (figures 4.35, 4.40a et 4.40b). Le pourcentage réel des résidus de cultures diffère énormément d'un site à l'autre. Par exemple, les taux de recouvrement réel des résidus pour les sites 1, 2, 3 et 4 sont respectivement de 0 %, de 100 %, de 71,32 % et de 44,62 % (figure 4.35). Pour les sites 5, 6, 7 et 8, les taux de recouvrement des résidus sont respectivement de 35,88 %, de 0 %, de 55,26 % et de 5,37% (figure 4.40a). Pour les sites 9 et 10, les taux de recouvrement sont à leur tour de 35,45 % et de 83,82 % (figure 4.40b).

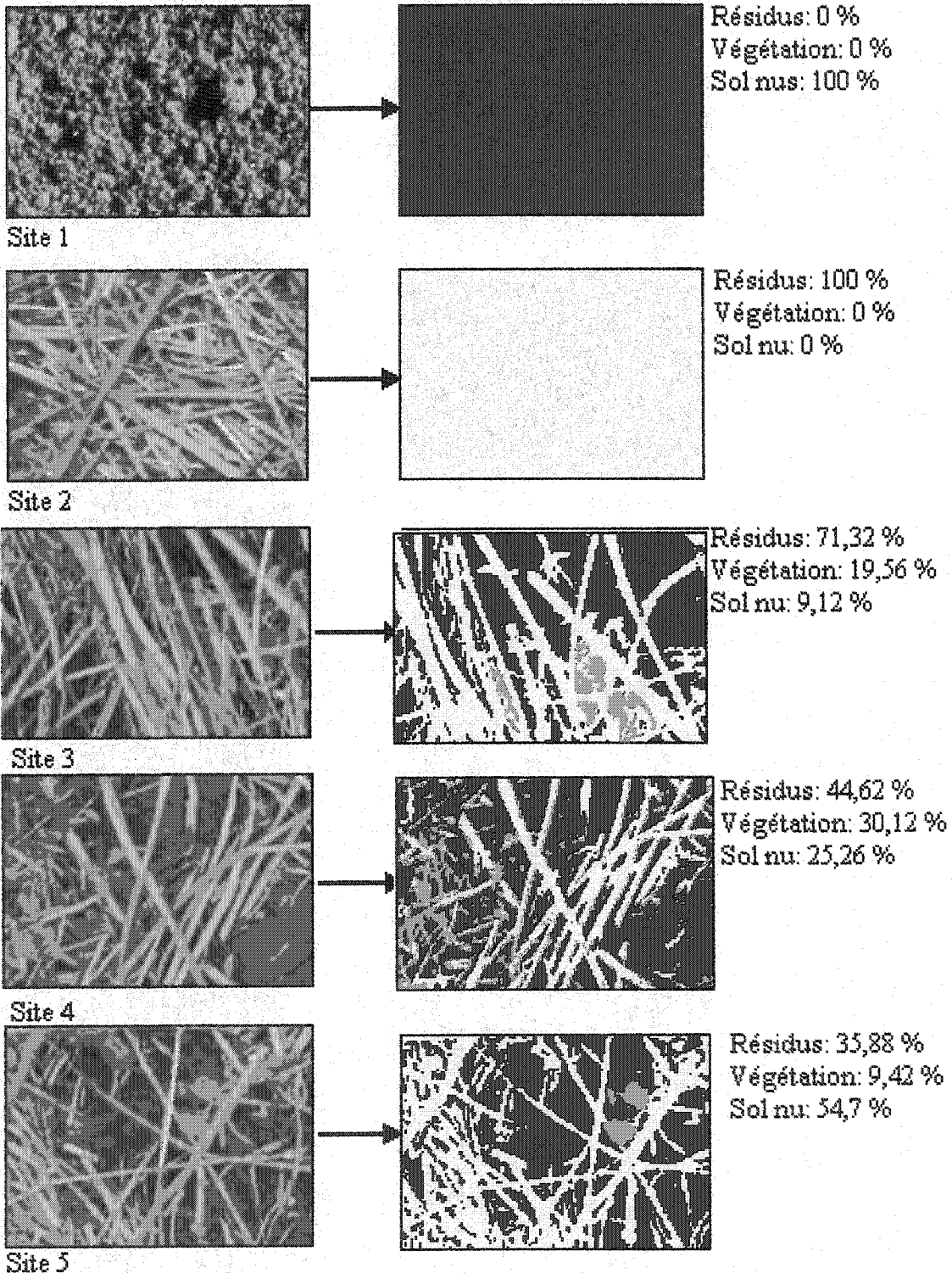


Figure 4.38: Photographies des sites 1 à 5 classifiées avec le module IsoData de PCI pour déterminer les taux de recouvrement des résidus (jaune), de la végétation (vert) et des sols nus (rouge).

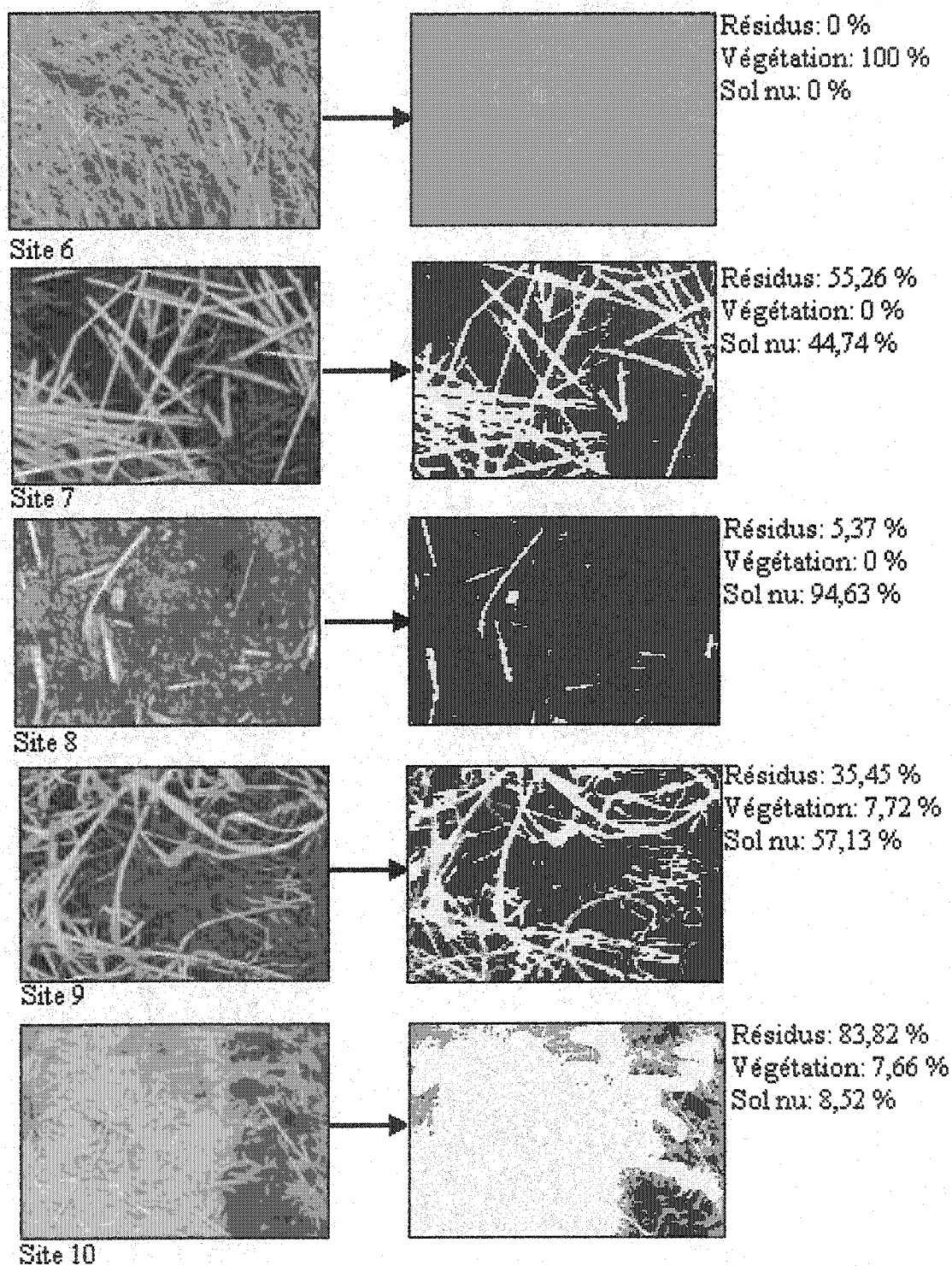


Figure 4.39: Photographies des sites 6 à 10 classifiées avec le module IsoData de PCI pour déterminer les taux de recouvrement des résidus (jaune), de la végétation (vert) et des sols nus (rouge).

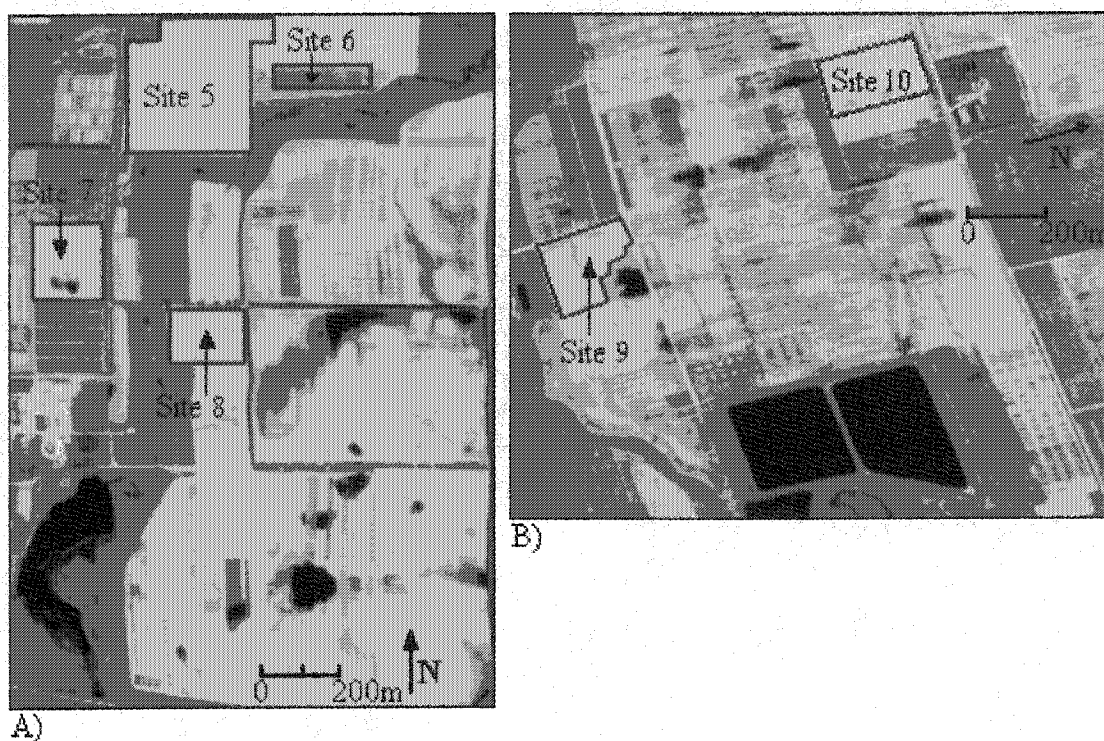


Figure 4.40: Composé coloré de l'image hyperspectrale du capteur Probe-1 des sites 5, 6, 7 et 8 (A) ainsi que des sites 9 et 10 (B) (Canaux 36, 84 et 115).

4.6.1 Estimation et cartographie du taux de couverture des résidus de cultures

Les images classifiées par les réseaux de neurones sont illustrées par les figures 4.41 et 4.42. Ces images sont composées de quatre classes distinctes, soient les résidus de cultures en jaune, les sols nus en rouge, la végétation en vert et l'eau et/ou les terres humectées d'eau en bleu pâle. Les images classifiées par le MSACRI-1, sont présentées aux figures 4.43 et 4.44. Tel que mentionné précédemment, les valeurs de cet indice ont été regroupées en sept différentes classes dont les six premières sont divisées en tranches de 15 % (tableau 4.4).

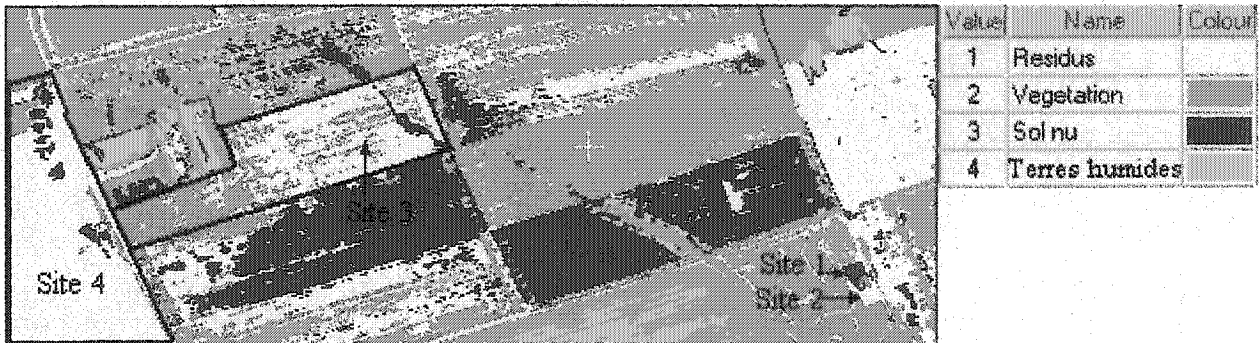
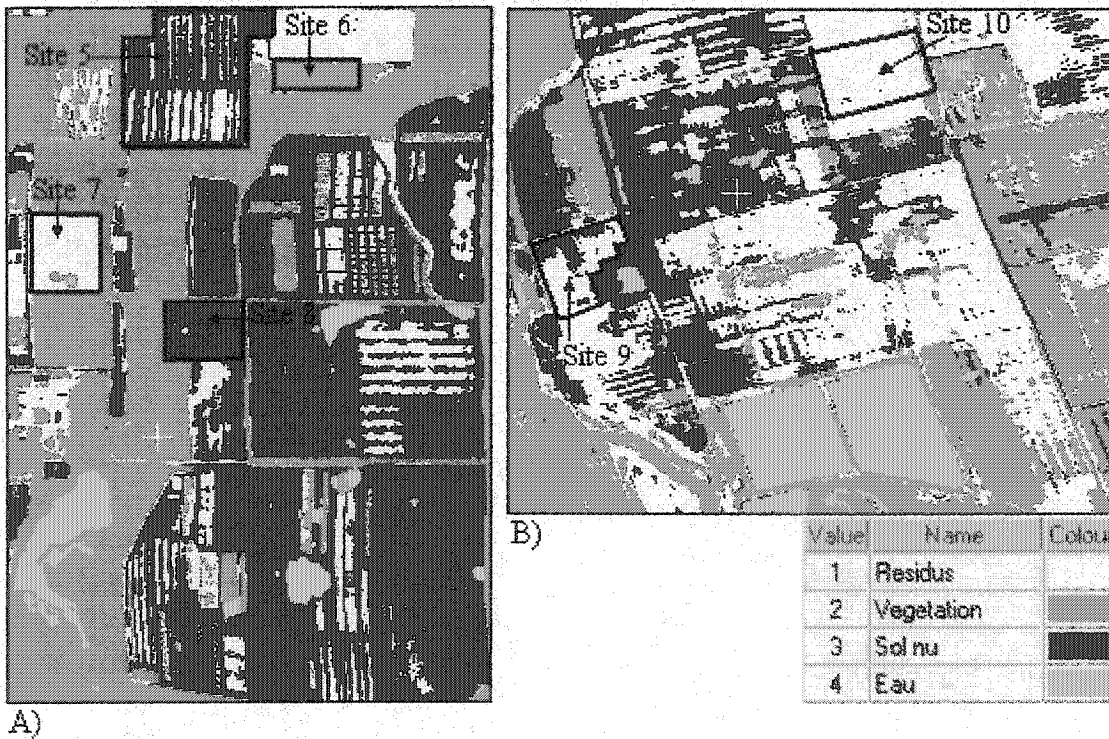


Figure 4.41: Classification des résidus de cultures, de la végétation, des sols nus et des terres humides par la méthode des réseaux de neurones des sites 1, 2, 3 et 4.



A)
B)
Figure 4.42: Classification des résidus de cultures, de la végétation, des sols nus et de l'eau par la méthode des réseaux de neurones des sites 5, 6, 7 et 8 (A) ainsi que des sites 9 et 10 (B).

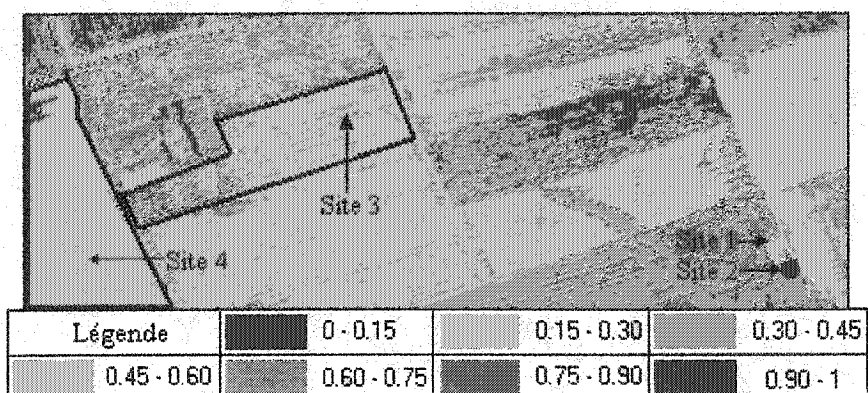


Figure 4.43: Indice semi-empirique MSACRI-1 extrait de l'image hyperspectrale du capteur Probe-1 des sites 1, 2, 3 et 4.

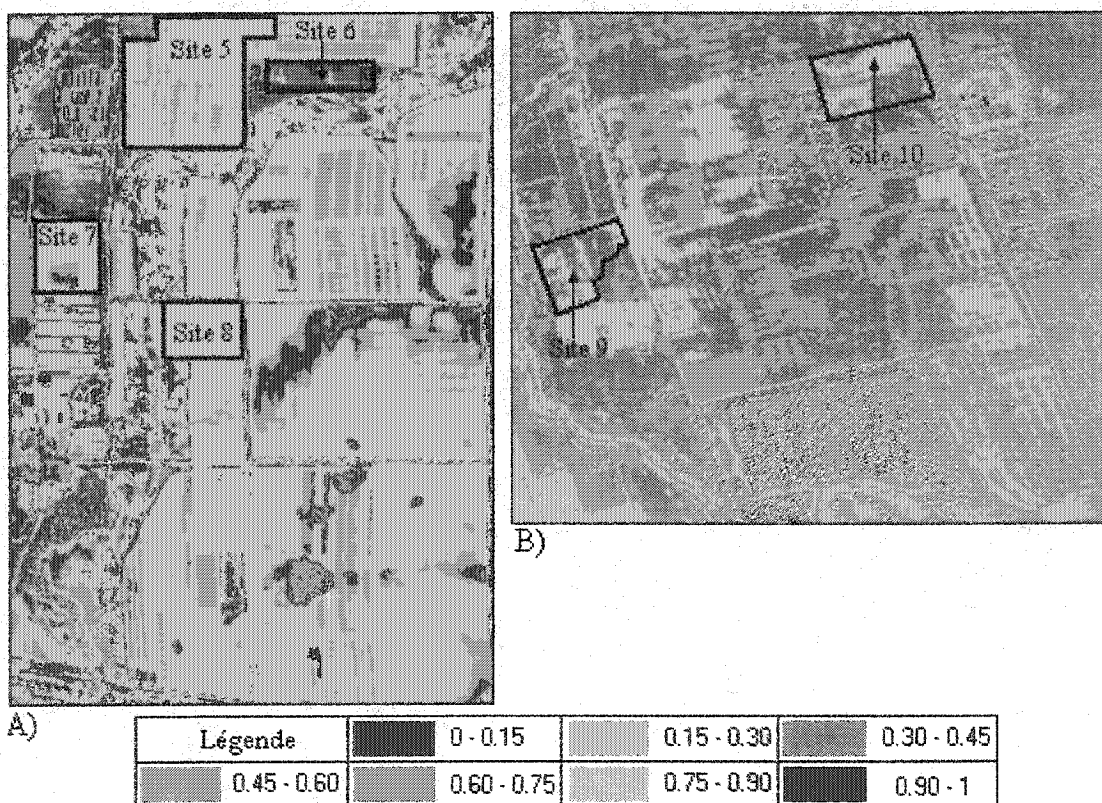


Figure 4.44: Indice semi-empirique MSACRI-1 extrait de l'image hyperspectrale du capteur Probe-1 des sites 5, 6, 7 et 8 (A) ainsi que des sites 9 et 10 (B).

Le tableau 4.11 résume la comparaison des réseaux de neurones avec l'indice MSACRI-1 par rapport à la vérité terrain. Comme nous pouvons le constater, cinq sources de données sont présentées dans ce tableau, soient le pourcentage réel des résidus de cultures, le pourcentage estimé par les réseaux de neurones, la différence en pourcentage entre les taux réels et ceux obtenus par les réseaux de neurones, le pourcentage estimé par le MSACRI-1 et la différence en pourcentage entre les taux réels et ceux obtenus par le MSACRI-1. La figure 4.47 tirée de ce tableau, résume l'estimation du taux réel des résidus de cultures et le taux estimé par la méthode des réseaux de neurones ainsi que par celle du MSACRI-1 des différents sites.

Tableau 4.11: Comparaison des réseaux de neurones avec le MSACRI-1 par rapport à la vérité terrain pour l'estimation des résidus de cultures.

Sites	Taux réel des résidus au sol	Taux estimé par les R.N.	Différence en pourcentage	Taux estimé par le MSACRI-1	Différence en pourcentage
Site 1	0	0	0	22,5	22,5
Site 2	100	100	0	95	-5
Site 3	71,32	74,64	3,32	60	-11,32
Site 4	44,62	75,8	31,18	52,5	7,88
Site 5	35,88	47,73	11,85	22,5	-13,38
Site 6	0	0	0	67,5	67,5
Site 7	69,12	84,4	15,28	22,5	-46,62
Site 8	5,37	0	-5,37	22,5	17,13
Site 9	35,45	45,57	10,12	30	-5,45
Site 10	83,82	77,48	-6,34	30	-53,82

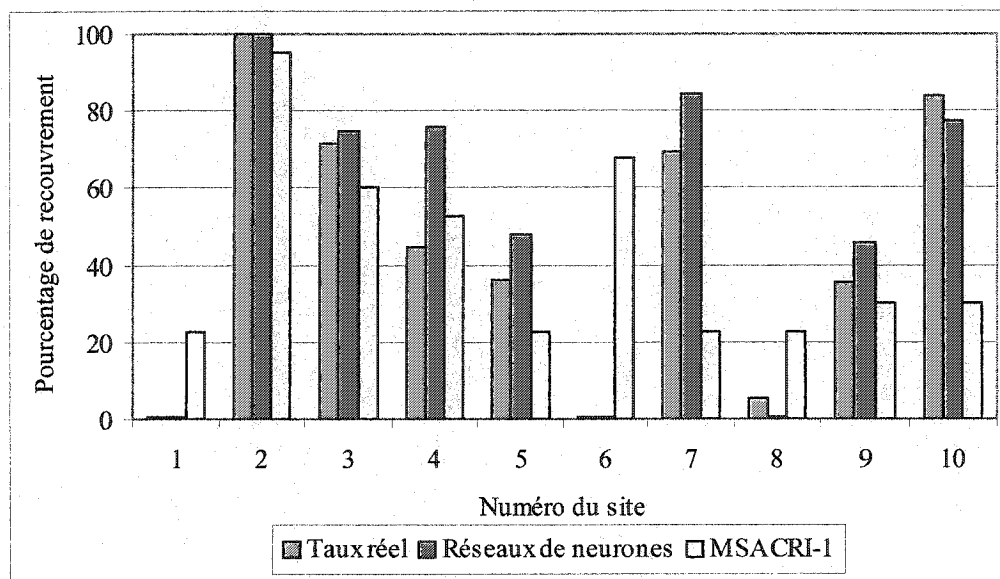


Figure 4.45: Taux réel des résidus de cultures et taux estimé par la méthode des réseaux de neurones et celle de l'indice semi-empirique MSACRI-1 des différents sites.

En observant les résultats présentés au tableau 4.11 ainsi qu'à la figure 4.45, la méthode des réseaux de neurones est relativement plus efficace que l'indice MSACRI-1 pour l'estimation du taux de recouvrement des résidus de cultures. La méthode des réseaux de neurones estime toujours à moins de 16 % d'erreur absolue le taux de recouvrement réel des résidus de cultures, à l'exception du site 3 où l'erreur absolue est de 31,18 % par rapport à la vérité terrain. Par contre, le MSACRI-1 estime toujours à plus de 10 % d'erreur absolue le taux de couverture des résidus, à l'exception des sites 2 et 9 où les erreurs absolues sont d'environ 5 % par rapport à la vérité terrain. Par ailleurs, il semblerait que la méthode des réseaux de neurones a tendance à surestimer légèrement le pourcentage réel des résidus de cultures. À titre d'exemple, l'estimation parfaite s'est effectuée à trois reprises (sites 1, 2 et 6) lorsque les taux de recouvrements des résidus sont de 0 % et de 100 %. Par contre, cette méthode a sous-estimé le taux de recouvrement des résidus de cultures à seulement

deux reprises (sites 8 et 10) et surestimé ce taux réel à cinq reprises (sites 3, 4, 5, 7 et 9) lorsque les taux de recouvrement sont entre 35,45 % à 71,32 %, car cette méthode ne considère pas le sub-pixel. À ce chapitre, il est plus difficile d'établir une tendance générale pour le MSACRI-1, car ce dernier sous-estime le taux de recouvrement à six occasions (sites 2, 3, 5, 7, 9 et 10) et surestime ce taux à cinq reprises (sites 1, 4, 6 et 8).

La méthode des réseaux de neurones a bien estimé le taux de recouvrement des résidus au site 1 (0 % de résidus), tandis que celle du MSACRI-1 a surestimé ce taux entre 15 et 30 % pour une estimation moyenne de 22,5 %. Les deux méthodes ont bien estimé la quantité de résidus au site 2, où le taux réel de couverture est de 100 %. En effet, les réseaux de neurones ont une fois de plus estimé ce taux à la perfection, alors que le MSACRI-1 a estimé ce taux entre 90 et 100 % pour une estimation moyenne de 95 %. Rappelons-nous que les résidus du site 2 étaient jeunes et brillants sans avoir commencé leur stade de dégradation. Il semble que ces deux méthodes performant bien lorsque les résidus sont dans un tel stade. La méthode des réseaux de neurones estime bien une fois de plus la quantité de résidus au site 3. Cette fois-ci, le taux réel des résidus est de 71,32 % alors qu'il est estimé à 74,64 % pour une erreur relative de 4,66 % par rapport à la vérité terrain. Quant au MSACRI-1, il estime ce taux entre 45 et 75 % pour une estimation moyenne de 60 %. Or, l'erreur relative est de 15,87 % par rapport à la vérité terrain. La situation est inversée lors de l'estimation des résidus de cultures au site 4, car le MSACRI-1 est plus performant que la méthode des réseaux de neurones. Par exemple, cette dernière surestime à 75,8 % alors que le taux réel est de 44,62 % pour une erreur relative de 69,88 % par rapport à la vérité terrain. Par contre, l'indice de résidus estime ce taux de couverture entre 45 et 60 % pour une estimation moyenne de 52,5 %, ce qui

représente une erreur relative de 17,66 %. Bien que la situation soit quelque peu différente pour l'estimation des résidus au site 5, il n'en demeure pas moins que le degré de précision des deux méthodes se ressemble. Autrement dit, les réseaux de neurones surestime à 47,73 % le taux de recouvrement du site 5 (taux réel de 35,88 %) pour une erreur relative de 33,03 % par rapport à la vérité terrain. Par contre, le MSACRI-1 sous-estime à 22,5 % ce taux pour une erreur relative de 37,29 %. L'estimation des résidus de cultures au site 6 démontre que la méthode des réseaux de neurones donne de meilleurs résultats comparativement au MSACRI-1. Effectivement, le taux réel de recouvrement du site 6 est de 0 % et la méthode des réseaux estime à la perfection ce taux. L'indice de résidus surestime ce taux de recouvrement entre 60 et 75 % pour une estimation moyenne de 67,5 %. L'erreur absolue de 67,5 % par rapport à la vérité terrain démontre les faiblesses de cet indice pour l'estimation de ce site. Passons au site 7 où le taux réel de recouvrement des résidus est de 69,12 %. Encore une fois, les résultats obtenus par les réseaux de neurones sont supérieurs à ceux obtenus par le MSACRI-1. L'indice sous-estime le taux de résidus entre 15 et 30 % pour une estimation moyenne de 22,5 %, ce qui donne une erreur relative de 67,45 % par rapport à la vérité terrain. Par ailleurs, la méthode des réseaux de neurones surestime ce taux à 84,4 % pour une erreur relative de 22,11 % par rapport à la vérité terrain. Le taux réel de recouvrement des résidus du site 8 est de 5,37 %. La méthode des réseaux de neurones estime ce taux à 0 %, pour une erreur relative de 100 %. Étant donné que la résolution spatiale de l'image est de 5 m X 5 m et que cette méthode ne considère pas le sub-pixel, il est normal d'avoir une perte d'information. L'indice de résidus surestime ce taux entre 15 et 30 % pour une estimation moyenne de 22,5 %, ce qui représente une erreur relative de 318,99 % par rapport à la vérité terrain. Lors de l'estimation des résidus de cultures du site 9, le MSACRI-1 est plus efficace que les réseaux de neurones. Ces derniers surestiment à

45,57 % le taux de recouvrement de résidus de cultures alors que le taux réel est de 35,45 % pour une erreur relative de 28,55 %. Quant à l'indice, il estime le taux de résidus de cultures entre 15 et 45 % pour une estimation moyenne de 30 %, ce qui constitue une erreur relative de 15,37 %. Finalement, le taux réel de couverture des résidus de cultures est de 83,82 % au site 10. Les réseaux de neurones estiment ce taux à 77,48 % pour une erreur relative de 7,56 % par rapport à la vérité terrain. Le MSACRI-1 est moins efficace, car il sous-estime le taux entre 15 et 45 % pour une estimation moyenne de 30 %, ce qui donne une erreur relative de 64,21 % par rapport à la vérité terrain.

En somme, les résultats ont démontré que la méthode des réseaux de neurones est plus efficace que l'indice MSACRI-1 pour estimer et cartographier le taux de recouvrement des résidus de cultures. En effet, il a été démontré que les réseaux de neurones sont plus efficaces que l'indice MSACRI-1 lors de l'estimation du taux de recouvrement des résidus de cultures aux sites 1, 3, 6, 7, 8 et 10. Par contre, la méthode de l'indice est relativement plus efficace à deux reprises seulement, soient aux sites 4 et 9. Étant donné la ressemblance de la précision lors de l'estimation du taux de recouvrement des résidus aux sites 2 et 5, il est impossible de déterminer laquelle des deux méthodes est plus efficace pour ces deux sites. De plus, pour l'ensemble des dix sites étudiés l'erreur relative moyenne entre le taux réel des résidus de cultures et celui estimé par rapport à la vérité terrain est de 26,58 % pour les réseaux de neurones comparativement à 63,18 % pour l'indice MSACRI-1.

4.6.2 Estimation et cartographie du taux de couverture de la végétation et des sols nus

Du fait que nous trouvons toujours sur les champs agricoles l'une ou les trois classes (résidus, végétation et sol nu), il serait grandement intéressant d'analyser le potentiel de la méthode des réseaux

de neurones pour l'estimation du taux de recouvrement de la végétation verte et des sols nus. La méthode des indices de résidus ne sera pas considérée dans cette section du travail, car elle permet uniquement de cartographier et d'estimer le taux de recouvrement des résidus de cultures pour la discrimination entre ces derniers et les sols nus. De plus, cette méthode ne permet pas de cartographier et d'estimer le taux de recouvrement de la végétation.

Le tableau 4.12 synthétise la comparaison entre les taux obtenus par la méthode des réseaux de neurones de la végétation et des sols nus par rapport à la vérité terrain. Six sources de données sont présentées dans ce tableau, soient les taux réels de la végétation et des sols nus; les taux estimés de la végétation et des sols nus par les réseaux de neurones; et les différences en pourcentage entre les taux réels de la végétation et des sols nus et ceux obtenus par les réseaux de neurones. La figure 4.46 résume les taux réels de la végétation et les taux estimés par la méthode des réseaux de neurones, tandis que la figure 4.47 synthétise les taux réels des sols nus et les taux estimés par cette même méthode.

Tableau 4.12: Comparaison des réseaux de neurones par rapport à la vérité terrain pour l'estimation de la végétation et des sols nus.

Sites	Végétation			Sols nus		
	Taux réel de la végétation	Taux estimé par les R.N.	Différence en pourcentage	Taux réel des sols nus	Taux estimé par les R.N.	Différence en pourcentage
Site 1	0	0	0	100	100	0
Site 2	0	0	0	0	0	0
Site 3	19,56	19,52	-0,04	9,12	2,86	-6,26
Site 4	30,12	11,9	-18,22	25,26	12,3	-12,96
Site 5	9,42	0	-9,42	54,7	52,27	-2,43
Site 6	100	100	0	0	0	0
Site 7	0	0	0	30,88	3,68	-27,2
Site 8	0	0	0	94,63	100	5,37
Site 9	7,42	0	-7,42	57,13	38	-19,13
Site 10	7,66	0	-7,66	8,52	0,71	-7,81

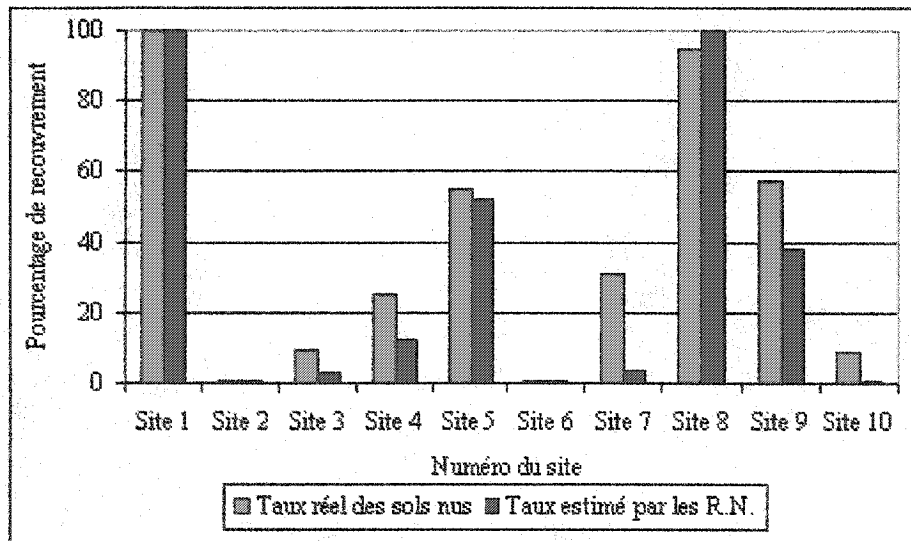


Figure 4.46: Taux réel de la végétation et taux estimé par la méthode des réseaux de neurones.

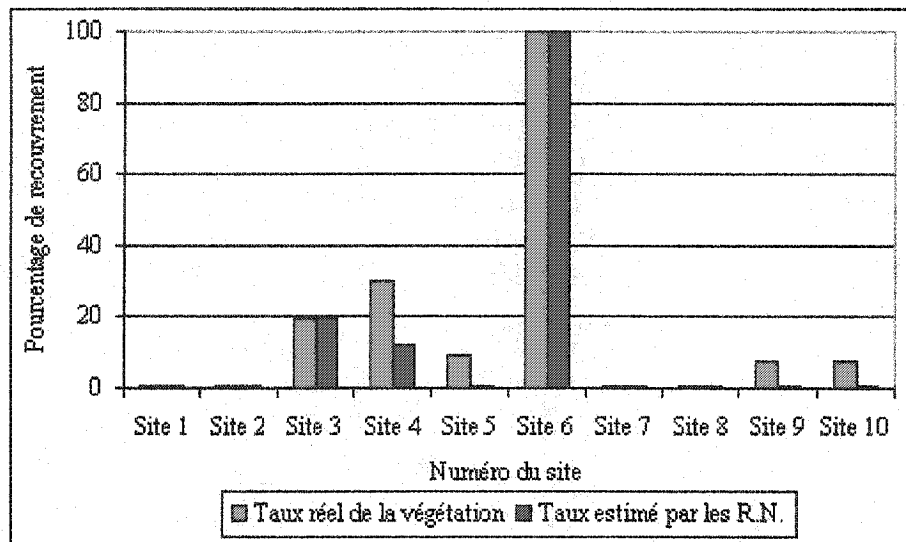


Figure 4.47: Taux réel des sols nus et taux estimé par la méthode des réseaux de neurones.

Les résultats présentés au tableau 4.12 ainsi qu'à la figure 4.46 démontrent que la méthode des réseaux de neurones estime toujours à moins de 10 % d'erreur absolue le taux de recouvrement réel de la végétation, à l'exception du site 4 où l'erreur absolue est de 18,22 % par rapport à la vérité terrain. Par ailleurs, la méthode des réseaux de neurones estime à moins de 20 % d'erreur absolue le taux de recouvrement réel des sols nus, sauf au site 7 où l'erreur absolue est de 27,2 % par rapport à la vérité terrain. Il appert que cette méthode a tendance à sous-estimer légèrement le pourcentage réel de la végétation (sites 3, 4, 5, 9 et 10). Par contre, l'exactitude entre le taux réel de recouvrement et celui estimé survient également à cinq reprises (sites 1, 2, 6, 7 et 8) lorsque les taux réels sont de 0 % et de 100 %. Cette méthode a également tendance à sous-estimer le pourcentage réel des sols nus (sites 3, 4, 5, 7, 9 et 10). Cependant, elle surestime la quantité réelle des sols nus à seulement une reprise (site 8). La perfection entre les taux réels et ceux estimés survient à trois reprises (sites 1, 2 et 6) lorsque les taux réels sont de l'ordre de 0 % et de 100 %.

Les sites 1, 2, 7 et 8 (tableau 4.12) ont un taux réel de recouvrement végétale de 0 %. La méthode des réseaux de neurones estime ces taux à la perfection, même si les taux des résidus et des sols nus varient d'un site à l'autre. Par ailleurs, lorsque le taux de recouvrement de la végétation verte est supérieur à 0 %, mais inférieur à 10 %, nous pouvons noter une limite dans l'estimation. Par exemple, les sites 5, 9 et 10 ont un taux réel de recouvrement de la végétation de 9,42 %, de 7,42 % et de 7,66 %, respectivement. Cependant, les réseaux de neurones n'ont pas été en mesure de détecter la moindre trace de la végétation. Étant donné que la résolution spatiale de l'image est de 5 m X 5m et que cette méthode ne considère pas le sub-pixel, il est normal d'avoir une légère perte d'information. L'estimation du site 3 se rapproche plus de la réalité terrain. En effet, seulement quatre centièmes séparent le taux réel de recouvrement (19,56 %) de la végétation et celui estimé (19,52 %). Au site 4, où le taux réel du couvert végétal est de 31,12 %, la méthode des réseaux de neurones sous-estime à 11,9 % ce taux pour une erreur relative de 61,76 % par rapport à la vérité terrain. Pour ce qui est du site 6, où la parcelle est entièrement recouverte de végétation, l'estimation est parfaite, car cette méthode estime ce taux à 100 % de taux de couverture.

Les sites 2 et 6 (tableau 4.12) ont un taux réel de recouvrement des sols nus de 0 %. Même si les pourcentages de la végétation et des résidus de ces deux sites ne sont pas les mêmes, la méthode des réseaux de neurones estime ces taux avec précision. Le taux réel de recouvrement des sols nus du site 10 est de 8,52 %, tandis que la méthode des réseaux de neurones sous-estime ce taux à 0,71 %, pour une erreur relative de 91,66 % par rapport à la vérité terrain. Tout comme lors de l'estimation de la végétation aux sites 5, 9 et 10, il peut y avoir une légère perte d'information, car la résolution spatiale de l'image est de 5 m X 5 m, et que cette méthode ne considère pas le sub-pixel. La situation

est semblable lors de l'estimation du site 3, car il y a également une perte d'information. Par exemple, le taux réel des sols nus est de 9,12 %, alors que les réseaux de neurones sous-estiment ce taux à 2,86 %, pour une erreur relative de 68,64 % par rapport à la vérité terrain. Cette méthode de classification sous-estime le taux réel des sols nus au site 4. Effectivement, le recouvrement réel des sols nus est de 25,26 %, tandis que cette méthode sous-estime ce taux à 12,3 %, pour une erreur relative de 51,31 % par rapport à la vérité terrain. La méthode des réseaux de neurones sous-estime également la quantité de sol nu au site 7 avec une erreur relative de 88,08 %. En effet, le taux réel de sol nu de ce site est de 30,88 %, alors qu'il est estimé à 3,68 %. Le taux de recouvrement des sols nus est bien estimé au site 5. Effectivement, le taux réel de recouvrement des sols nus est de 54,7 % alors qu'il est estimé à 52,27 %. Quant au site 4, la méthode des réseaux de neurones sous-estime à 38 % le taux des sols nus, alors que le taux réel est de 57,13 %, ce qui constitue une erreur relative de 33,49 % par rapport à la vérité terrain. Lorsque les taux réels des sols nus sont supérieurs à 90 %, les estimations sont très bonnes. À titre d'exemple, au site 8 et au site 1, les taux réels des sols nus sont de 94,63 % et 100 %, respectivement, tandis qu'ils sont estimés par la méthode des réseaux de neurones à 100 % dans les deux cas.

En conclusion, les résultats ont démontré que la méthode des réseaux de neurones est relativement plus efficace pour estimer et cartographier le taux de recouvrement de la végétation que les sols nus. En effet, pour l'ensemble des dix sites étudiés, l'erreur relative moyenne entre le taux réel de la végétation et celui estimé par rapport à la vérité terrain est de 36,07 %, comparativement à 34,33 % pour les sols nus. De plus, pour le couvert végétal ainsi que pour les sols nus, les résultats sont supérieurs lorsque les taux de recouvrement sont de 0 % où de 100 %.

Par ailleurs, attardons-nous sur les temps d'opération requis à faire fonctionner les deux méthodes. La méthode des indices de résidus de cultures est une méthode très simple. Il suffit d'entrer la formule de l'indice et laisser le soin au système d'opération de calculer l'indice pour une image donnée. Outre les différents paramètres des indices à introduire, l'utilisateur n'intervient aucunement. Or, une fois les paramètres déterminés, cette méthode peut s'effectuer en l'espace de quelques minutes. La méthode des réseaux de neurones est une méthode beaucoup plus complexe. Considéré comme étant une technique de classification supervisée, l'utilisateur doit non seulement tracer des sites d'entraînement, mais également se familiariser avec le fonctionnement de cette méthode en ajustant différents paramètres, tels la quantité d'entrées, le nombre de couches cachées, le nombre de neurones par couche cachée, la quantité de sortie, le seuil de rendement, le nombre d'itération et la vitesse d'apprentissage (annexe 4). En d'autres termes, l'utilisateur doit faire plusieurs tests avant de bien maîtriser le système. De plus, le temps élevé nécessaire à la phase d'apprentissage augmente en fonction de la grosseur de l'image et du nombre de sites d'entraînements. Or, pour un utilisateur non expérimenté, cette méthode peut prendre jusqu'à une heure pour la classification d'une image.

Bien que le temps d'opération nécessaire à faire fonctionner la méthode soit plus élevé, il n'en demeure pas moins que les réseaux de neurones sont plus précis et efficaces que la méthode des indices pour estimer et cartographier le taux de recouvrement des résidus de cultures sur une terre agricole. De plus, le temps d'opération est grandement réduit lorsque l'utilisateur devient plus expérimenté et se familiarise davantage avec les différents paramètres à introduire. L'utilisation des ordinateurs de plus en plus puissants et performants réduit également le temps d'opération.

Chapitre 5: Conclusions et recommandations

5.1 Conclusions

Les résidus de cultures laissés sur une terre agricole après la récolte sont une méthode simple, peu coûteuse et efficace pour contrôler l'érosion éolienne et hydrique, maintenir la structure et une bonne qualité du sol, augmenter la quantité de nutriments dans le sol et diminuer les émissions de CO₂ dans l'atmosphère. Afin de mieux gérer la quantité de résidus de cultures présente sur une terre, une bonne estimation et cartographie sont nécessaires. Deux types de méthodes existent pour estimer le taux de recouvrement des résidus, soient les méthodes conventionnelles et les méthodes alternatives. Les méthodes conventionnelles sont fastidieuses, lentes, plus ou moins précises et plutôt subjectives. Par contre, les méthodes alternatives exploitant la télédétection sont plus précises et peuvent être utilisées à grande échelle, ce qui est un net avantage.

Lors de cette thèse de maîtrise, nous avons comparé deux méthodes utilisées en télédétection pour estimer et cartographier le taux de recouvrement des résidus de cultures. Tout d'abord, nous avons appliqué différents indices de résidus de cultures sur des mesures de réflectances obtenues au sol à l'aide d'un spectroradiomètre, GER3700. Nous avons également appliqué ces indices sur une image hyperspectrale acquise par le capteur aéroporté Probe-1. Par la suite, nous avons appliqué la méthode des réseaux de neurones sur l'image hyperspectrale pour être en mesure de déterminer laquelle des deux méthodes est la plus efficace pour bien cartographier et estimer le taux de recouvrement des résidus de cultures.

Les indices de résidus de cultures ont donné des résultats variant énormément. En ce qui concerne la précision des indices, pour l'estimation du taux réel de recouvrement des différents types de résidus mesurés au sol à l'aide du GER3700, il s'est avéré que le BI a donné une faible erreur standard moyenne de 22,30 %. Cependant, en raison de sa formule qui additionne les réflectances de façon linéaire, il fonctionne relativement bien seulement lorsque les sols sont très foncés. De plus, cet indice a surestimé la première portion du taux de recouvrement des différents types de résidus (0 % à environ 50 %). Par contre, il a sous-estimé la deuxième portion du taux de couverture (environ 50% à 100 %). Le CAI a, quant à lui, donné les moins bons résultats. Par exemple, l'erreur standard moyenne pour l'ensemble des résidus fut de 76,92 % par rapport à la réalité terrain. Il a également été montré que cet indice fonctionne mieux lorsque les taux de recouvrement sont élevés. Les deux différents indices NDI, c'est-à-dire le NDI-1 et le NDI-2, ont été calculés. Pour l'ensemble des résidus, il a été démontré que le NDI-2 est plus efficace que le NDI-1. À titre d'exemple, l'erreur standard moyenne du NDI-1 fut de 60,4 % comparativement à 38,92 % pour le NDI-2. Ajoutons qu'en général, ces deux indices tendent à sous-estimer le taux réel des différents types de résidus. De plus, le NDI-2 fonctionne mieux lorsque les taux de recouvrement des divers types de résidus sont inférieurs à environ 30 %. En ce qui concerne les deux indices SACRI, mentionnons que ces derniers ont donné de mauvais résultats pour l'estimation des résidus de tournesol, d'herbe et de blé. Par contre, le SACRI-2 a donné de bons résultats pour les résidus de soja et de maïs. Bien que les deux indices ont tendance à sous-estimer le taux de recouvrement des résidus, il n'en demeure pas moins que le SACRI-2 est plus efficace que le SACRI-1. Pour l'ensemble des différents résidus, l'erreur standard moyenne du SACRI-2 est de 40,73 % comparativement à 56,98 % pour le SACRI-1. Par contre, le SACRI-2 s'est mieux comporté lorsque le taux de recouvrement des résidus était faible.

Les indices MSACRI ont, quant à eux, donné de meilleurs résultats. Il est difficile de déterminer lequel des deux indices est le meilleur, car pour les résidus de grandes tailles (soja et maïs) le MSACRI-1 a dominé, tandis que pour les résidus de plus petites tailles (blé et herbe) le MSACRI-2 fut le meilleur. De plus, les erreurs standards moyennes se ressemblent aussi. Pour le MSACRI-1 elle est de 33,58 % et de 36,71% pour le MSACRI-2. Il est intéressant de constater que le MSACRI-1 a généralement tendance à sous-estimer la quantité de résidus, tandis que le MSACRI-2 surestime cette quantité de résidus. L'indice CRIM a bien fonctionné pour les résidus clairs (maïs, blé et herbe). Cependant, il a plus de difficulté pour l'estimation des résidus foncés (soja et tournesol). Cet indice a également tendance à surestimer la quantité de résidus. L'erreur standard moyenne de ce dernier est de 29,71%. Cette étape de la recherche nous a également permis de vérifier quels indices sont les plus performants pour estimer les taux de recouvrement des différents types de résidus. Le CRIM et le MSACRI-1 se sont avérés les meilleurs indices pour l'estimation du taux de résidus de maïs; le MSACRI-2 et le CRIM sont les plus adéquats pour estimer le taux des résidus de blé; le MSACRI-2 est l'indice le plus performant pour estimer le taux de recouvrement des résidus d'herbe; le MSACRI-1 s'avère le meilleur indice pour le soja, tandis que le CRIM, le MSACRI-2 et le MSACRI-1 sont les meilleurs indices pour les résidus de tournesol.

Par ailleurs, nous avons vérifié la précision des indices pour l'estimation du taux réel de recouvrement des résidus de la ferme IHARF obtenus avec une image hyperspectrale du capteur Probe-1. Cette fois-ci, le BI n'a pas été adéquat, car a un taux réel de recouvrement des résidus d'environ 70 %, cet indice a sous-estimé ce taux à 45 % pour une erreur relative de 36,9 % par rapport à la vérité terrain. Le CAI a, quant à lui, surestimé le taux de couverture des résidus lorsque le taux

réel était d'environ 45 %. Effectivement, il a surestimé ce taux avec une erreur relative de 51,28 % par rapport à la vérité terrain. Les indices NDI-1 et NDI-2 n'ont pas donné de résultats concluants, car ils ont surestimé le taux de recouvrement des résidus entre 40 et 75 %. Par exemple, lorsque le taux de recouvrement est d'environ 45 %, le NDI-1 a surestimé ce taux avec une erreur relative de 112,91 % par rapport à la vérité terrain. De plus, lorsque le taux de recouvrement est d'environ 70%, le NDI-2 a surestimé ce taux avec une erreur relative de 33,20 % par rapport à la vérité terrain, tandis que NDI-1 a sous-estimé ce taux avec une erreur relative de 36,90 % par rapport à la vérité terrain. Les deux indices SACRI ont correctement estimé les taux de recouvrement lorsque ces derniers étaient de 0 % et de 100 %. Par contre, ils ont sous-estimé les taux de recouvrement lorsque ce dernier était d'environ 75 % avec des erreurs relatives de 36,9 % par rapport à la vérité terrain. L'indice SACRI-2 a tout de même donné de meilleurs résultats lorsque le taux de recouvrement était d'environ 45 %. Bien que les deux indices MSACRI-1 et MSACRI-2 ont donné de bons résultats, il faut admettre que l'indice MSACRI-1 a dominé les autres indices si nous considérons les différents types de résidus indépendamment de leur taux de couverture au sol.

Les réseaux de neurones ainsi que l'indice de résidus de cultures sélectionné (MSACRI-1) ont, par la suite, été utilisés pour estimer et cartographier les taux de recouvrement de résidus de dix différents sites. Les résultats ont démontré que la méthode des réseaux de neurones est plus performante que l'indice MSACRI-1 pour estimer et cartographier le taux de recouvrement des résidus de cultures. Par exemple, pour l'ensemble des dix sites étudiés, l'erreur relative moyenne entre le taux réel des résidus de cultures et celui estimé par rapport à la vérité terrain est de 26,58 % pour les réseaux de neurones comparativement à 63,18 % pour l'indice MSACRI-1.

5.2 Recommandations

Il est difficile d'établir une tendance générale avec les indices des résidus de cultures. Il est vrai que certains indices ont donné de meilleurs résultats pour estimer et cartographier le taux de recouvrement des résidus au niveau local. Cependant, dans un autre environnement agricole, c'est-à-dire avec d'autres types de résidus de cultures à différentes étapes de dégradation et avec d'autres sols nus ayant de différentes propriétés optiques, ces indices auraient pu donner des résultats complètement différents.

Par ailleurs, bien qu'ils ont très bien estimé la quantité réelle de résidus de cultures, de végétation et de sols nus, les réseaux de neurones ont eu de la difficulté à détecter la présence d'une ou l'autre de ces classes lorsque le taux de recouvrement était d'environ 10 % ou inférieur. Les estimations réelles au sol se sont faites par un pixel de quelques centimètres sans perte de détails. Par contre, la résolution spatiale (5 m X 5 m) de l'image du capteur hyperspectral Probe-1 ne permet pas d'être aussi précis, donc il y a une perte d'information, car la méthode des réseaux de neurones ne considère pas le sub-pixel. Un pixel est composé d'un mélange de signatures pures de divers éléments spectraux individuels (endmembers). Sur une terre agricole, les éléments spectraux sont les résidus de cultures, le couvert végétal, le sol nu et l'eau. Il aurait donc été intéressant de comparer les résultats des indices de résidus et ceux de la méthode des réseaux de neurones avec d'autres techniques. Par exemple, la technique de déconvolution spectrale SMA (*Spectral Mixture Analysis*) a été utilisée dans une zone montagneuse pour prédire les valeurs du LAI (Leaf Area Index) (Peddle et Johnson, 2000) et cette dernière a donné de bons résultats. Par ailleurs, la technique SAM

(*Spectral Angle Mapper*) a été utilisée dans une région minière (Lévesque *et al.*, 1997) et a donné des résultats adéquats.

Références

- Aase, J.K. and Tanaka, D.L. (1986) Effects of tillage practices on soil and wheat spectral reflectance. *Agronomy Journal*, vol. 76, pp. 814-818.
- Aase, J.K. and Tanaka, D.L. (1991) Reflectance from four wheat residue cover densities as influenced by three soil backgrounds. *Agronomy Journal*, vol. 83, pp. 753-757.
- Arsenault, É. and Bonn, F. (2001) Evaluation of Soil Erosion Protective Cover by Crop Residues Using Vegetation Indices and Spectral Mixture Analysis of Multispectral and Hyperspectral Data. 23rd Canadian Symposium on Remote Sensing, pp. 299-308.
- Bannari, A., Morin, D., Huete, A. and Bonn, F. (1995) A Review of Vegetation Indices. *Remote Sensing Reviews*, vol. 13, pp. 95-120.
- Bannari, A., Haboudane, D. et Bonn, F. (1999) Potentiel des mesures multispectrales pour la distinction entre les résidus de cultures et les sols nus sous-jacents. Presented at the forth International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition/ 21st Canadian Symposium on Remote Sensing, Ottawa, Ontario, Canada, 21-24 June 1999, pp. 359-366.
- Bannari, A., Haboudane, D. et Bonn, F. (2000) Intérêt du moyen infrarouge pour la cartographie des résidus de cultures. *Journal canadien de télédétection*, vol. 26, no. 5, pp. 384-393.
- Bannari, A., Haboudane, D., McNairn, H. and Bonn, F. (2000b) Modified Soil Adjusted Crop Residue Index (MSACRI): A new index for mapping crop residue. *IGARSS'2000, Managing the Global Environment*, 24-28 July, Honolulu, Hawaii, vol. VII, p. 2936-2938.
- Baret, F. (1986) Contribution au suivi radiométrique de cultures de céréales. Thèse de doctorat, Université de Paris-sud, Orsay, France, 182 p.
- Baret, F., Guyot, G. and Major, D.J. (1989) TSAVI: A Vegetation Index Which Minimizes Soil Brightness Effects on LAI and APAR Estimation. *Proceedings of the 12th Canadian Symposium on Remote Sensing*, Vancouver, Canada, pp. 1355-1358.
- Bariou, R., LeCamus, P. et LeHenaff, F. (1985) Indices de végétation. *Dossiers de télédétection*. Université de Rennes II, Haute-Bretagne, France, 151p.
- Benediktsson, J.A., Swain, P.H. and Ersoy, O.K. (1990) Neural Networks Approaches Versus Statistical Methods in Classification of Multisource Remote Sensing Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, no. 4, pp. 540-552.
- Biard, F., Bannari, A. and Bonn, F. (1995) SACRI (Soil Adjusted Corn Residue Index): un indice utilisant le proche et le moyen infrarouge pour la détection de résidus de cultures de maïs. 17ème Symposium Canadien sur la Télédétection, Saskatoon (Saskatchewan), Canada, pp. 413-419, 13 au 15 juin 1995.
- Biard, F. and Baret, F. (1997) Crop Residue Estimation Using Multiband Reflectance. *Remote Sensing of Environment*, vol. 59, pp. 530-536.
- Bischof, H., Schneider, W. and Pinz, A.J. (1992) Multispectral Classification of Landsat-Images Using Neural Networks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, no. 3, pp. 482-490.

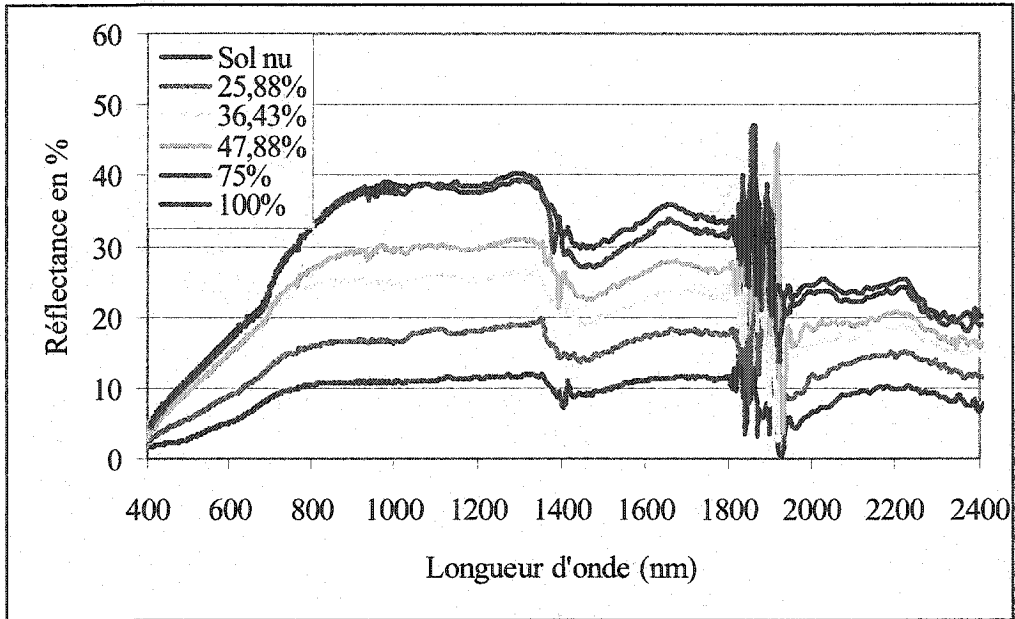
- Bonham, C.D. (1989) Measurements for terrestrial vegetation. John Wiley & Sons, New-York, 352p.
- Borst, H.D. and Woodburn, R. (1942) The effect of mulching and methods of cultivation on runoff and erosion from Muskingum silt loam. *Agricultural Engineering*, vol. 23, no. 1, pp. 19-22.
- Caloz, R. (1991) "Télédétection: Télédétection Appliquée" notes de cours, École polytechnique fédéral de Lausanne, Lausanne, 120 p.
- Caloz, R., et Collet, C. (2001) Précis de télédétection, vol. 3 Traitements numériques d'images de télédétection, Presses de l'Université du Québec, Sainte-Foy, Québec, 386 p.
- Cann, D.B. et Lajoie, P. (1973) Étude des sols des comtés de Stanstead, Richmond, Sherbrooke et Compton dans la province de Québec, Ministère de l'agriculture (Canada), Publication no. 742 (Cote CA1 DA39 Q43), 53 p.
- Corak, S.J., Kaspar, T.C. and Meek, D.W. (1993) Evaluating methods for measuring residue cover. *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 48, pp. 700-704.
- Corr, D.G., Tailor, A.M., Cross, A., Hogg, D.C., Lawrence, D.H., Mason, D.C. and Petrou, M. (1989) Progress in automatic analysis of multi-temporal remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 10, no. 7, pp. 1175-1195.
- Cyr, L., Bonn, F. and Pesant, A. (1995) Vegetation indices derived from remote sensing for estimation of soil protection against water erosion. *Ecological Modelling*, vol. 79, no. 3, p. 277-285.
- Daughtry, C.S.T., McMurtrey, J.E., Chapelle, E.W., Dulaney, W.P., Irons, J.R. and Satterwhite, M.B. (1995) Potential for Discriminating Crop Residues from Soil by Reflectance and Fluorescence. *Agronomy Journal*, vol. 87, pp. 165-171.
- Daughtry, C.S.T., McMurtrey, J.E., Chapelle, E.W., Hunter, W.J. and Steiner, J.L. (1996) Measuring Crop Residue Cover Using Remote Sensing Techniques. *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 54, pp. 17-26.
- Daughtry, C.S.T., Nagler, P.L., McMurtrey, J.E. and Lindwall, C.L. (1997) Measuring Crop Residue Cover by Shortwave Infrared Reflectance. *Agronomy, Abstracts*, P 27.
- Elvidge, C.D. (1990) Visible and near infrared reflectance characteristics of dry plant materials. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 10, pp. 1775-1795.
- Freebairn, D.M. and Wockner, G.H. (1986) A Study of Soil Erosion on Vertisols of the Eastern Darling Downs, Queensland 1: Effects of Surface Conditions on Soil Movement Within Sontour Bay Catchments. *Australian Journal of Soil Science*, vol. 24, pp. 135-158.
- Goetz, A. F. H., Vane, G., Solomon, J. E., and Rock, B. N. (1985) Imaging Spectrometry for Earth Remote Sensing. *Science*, vol. 228, p. 1147-1153.
- Goïta, K., Gonzalez-Rubio, R., Bénié, G.B., Royer, A. et Michaud, F. (1994) Une revue de littérature des réseaux neuromimétiques et des systèmes à base de connaissances dans l'analyse et l'interprétation d'images en télédétection. *Canadian Journal of Electronics and Engineers*, vol. 19, no. 2, pp. 53-61.
- Guyot, G. (1989) Signatures spectrales des surfaces naturelles. Volume 5, Les Éditions Paradigme, collection "Télédétection satellitaire", Caen, 178p.

- Haboudane, D., Bonn, F., Biard, A., Bannari, A. and Cliche, P. (1997) Shortwave Infrared Contribution to the Detection of Crop Residues and Dry Vegetation Over Different Soil Backgrounds. Le 19e Symposium canadien sur la Télédétection, Ottawa (Ontario), Canada, 24-30 mai. Actes sur CD-ROM, no. 195.
- Hartwig, R.O. and Laflen, J.M. (1978) A meterstick method for measuring crop residue cover. *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 33, no. 2, pp. 90-91.
- He, H. (2000) Multi-spectral satellite image classification using artificial neural networks, thèse de doctorat, Fribourg, Université de Fribourg, Faculté des sciences, Département des géosciences 146 p.
- Huete, A.R. (1988) A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, vol. 25, pp. 295-309.
- Ketcheson, J.W. and Stonehouse, D.P. (1983) Conservation tillage in Ontario. *Journal of Soils and Water Conservation*, vol. 38, pp. 253-254.
- Key, J., Maslanik, J.A. and Schweiger, A.J. (1989) Classification of Merged AVHRR and SMMR Arctic Data with Neural Networks. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 55, no. 9, pp. 1131-1338.
- Kozak, L.M., and Padbury, G.A. (1999) Soils of the IHARF Research Farm. Saskatchewan Land Resource Unit Semiarid Prairie Agricultural Research Center Agriculture and Agri-Food Canada Research Branch, 9p.
- Kramer, L.A. and Meyer, L.D. (1969) Small amounts of surface mulch reduce soil erosion and runoff velocity. *Transaction of the American Society of Agricultural Engineers*, vol. 12, pp. 638-641.
- Kruse, F. A., Kierein-Young, K. S., and Boardman, J. W. (1990) Mineral Mapping at Cuprite, Nevada with a 63-Channel Imaging Spectrometer. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 56, no. 1, pp. 83-92.
- Laflen, J.M., Amemiya, M., and Hintz, E.A. (1981) Measuring crop residue cover. *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 36, no. 6, pp. 341-343.
- Lévesque, J., Singhroy, V., Staenz, K. And Bolton, D. (1997) Site characterization of mine tailings at the INCO Copper Cliff tailings impoundment area using CASI imagery. Presented at the Internatioanal Symposium: Geomatics in the era of RADARSAT. Ottawa, May 25-30, 1997, 8p.
- Lippmann, R.P. (1987) An Introduction to Computing with Neural Nets. *IEEE ASSP Magazine*, avril 1987, pp. 4-22.
- Major, D.J., Larney, F.L. and Lindwall, C.W. (1990) Spectral reflectance characteristics of wheat residue. *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS' 90)*, vol. 1, pp. 603-607.
- Malthus, T.J., Andrieu, B., Danson, F.M., Jaggard, K.W. and Steven, M.D. (1993) Candidate High Spectral Resolution Infrared Indices for Crop Cover. *Remote Sensing of Environment*, vol. 46, pp. 204-212.
- Mannering, J.V. and Meyer, L.D. (1963) Effects of various raters of surface mulch on infiltration and erosion. *Soil Science Society America*, vol. 27, pp. 84-86.

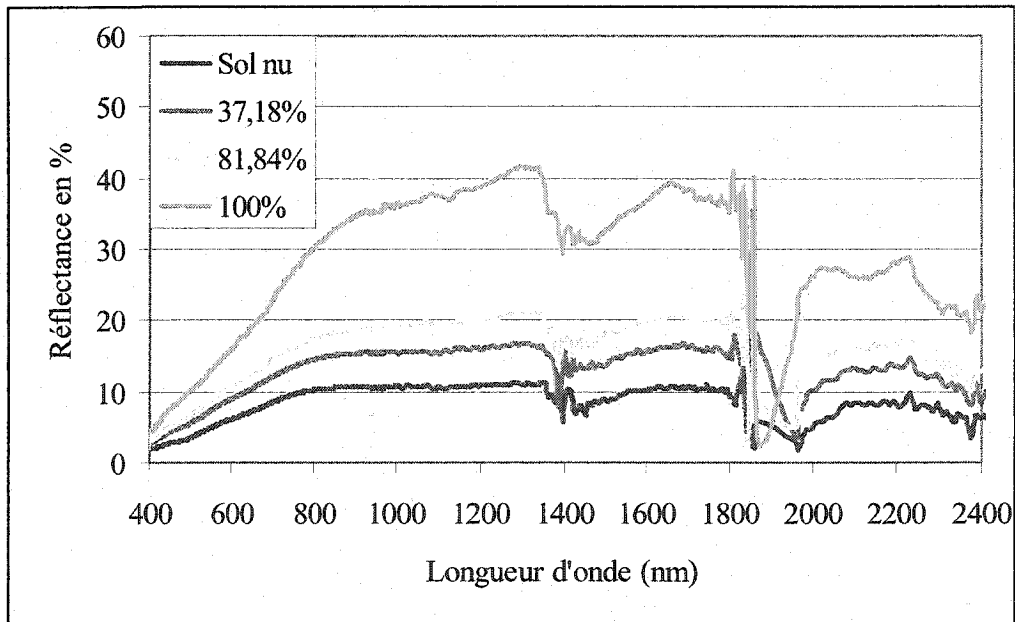
- McMurtrey, J.E., Chapelle, E.W., Daughtry, C.S.T. and Kim, M.S. (1993) Fluorescence and reflectance of crop residue and soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 48, no. 3, pp. 207-213.
- McNairn, H. and Protz, R. (1993) Mapping Corn Residue Cover on Agricultural Fields in Oxford County, Ontario, Using Thematic Mapper. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 19, no. 2, 152-159.
- Meyer, C.E., Stepanak, A., Shelton, D.P. and Dickey, E.C. (1988) Electronic image analysis of crop residue cover on soil. *Transaction of American Society of Agricultural Engineers*, vol. 31, pp. 698-973.
- Meyer, L.D., Wischmeier, W.H. and Foster, R. (1970) Mulch rates required for erosion control on steep slopes. *Soil Science Society of America*, vol. 34, pp. 928-931.
- Michels, K., Sivakumar, M.V.K. and Allison, B.E. (1995) Wind erosion control using residue. *Field Crops Research*, vol. 40. Pp. 111-118.
- Morrison, J.E. and Chichester, F.W. (1991) Still video image analysis of crop residue covers. *Soil Science Society of America*, vol. 34, pp. 2469-2474.
- Morrison, J.E., Huang, C., Lightle, D.T. and Daughtry, C.S.T. (1993) Residue Cover Measurement Techniques. *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 48, pp. 479-483.
- Morrison, J.E., Lemunyon, J. and Bogusch, H.C. (1995) Source of variation and performance of nine devices when measuring crop residue cover. *Transaction of American Society of Agricultural Engineers*, vol. 38, pp. 521-529.
- Mulders, M.A. and Girard, M.C. (1993) Remote Sensing of Soil in Warm Arid and Semi-Arid Lands. *Remote Sensing Reviews*, vol. 7, pp. 341-363.
- Peddle, D.R. and Johnson, R.L. (2000) Spectral Mixture Analysis of Airborne Remote Sensing Imagery for Improved Prediction of LAI in Mountainous Terrain, Kananaskis Alberta. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 26, no. 3, pp. 177-188.
- Rice, C.W., (2002) Storing Carbon in Soil : Why and How ? *Geotimes*, January 2002, pp. 1-5.
- Roberts, P. and Coleman, D. (1988) A Survey of Crop Residue in Southwestern Ontario, 64p.
- Robinson, V.B. and Frank, A.U. (1987) Expert Systems for Geographic Information Systems. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 53, no. 10, pp. 1435-1441.
- Rouse, J.W., Haas, R.W., Schell, J.A., Deering, D.W. and Harlan, J.C. (1974) Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Greenwave effect) of Natural Vegetation. *NASA/GSFC Type-iii Final Report, Greenbelt, Maryland, USA.*, 164 p.
- Secker, J., Staenz, K., Gauthier, R.P. and Budkewitsch, P. (2001) Vicarious Calibration of Hyperspectral Sensors in Operational Environments. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 76, pp. 81-92.

- Sischmeier, W.H. and D.D. Smith (1978) Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning, S.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook, No. 537, 58 pp.
- Sloneker, L.L. and Moldenhauer, W.C. (1977) Measuring the amounts of crop residue remaining after tillage. *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 32, no. 5, pp. 231-236.
- Staenz, K., and Williams, D.J. (1997) Retrieval of Surface Reflectance from Hyperspectral Data Using a Look-Up Table Approach. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 23, no. 4, pp. 354- 368.
- Su, H., Ransom, M.D. and Kanemasu, E.T. (1997) Simulating wheat crop residue reflectance with the SAIL model. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 18, no. 10, pp. 2261-2267.
- Wanjura, D.F. and Bilbro, J.D. (1986) Ground cover and weathering effects on reflectances of three crop residues. *Agronomy Journal*, vol. 78, p. 694-698.

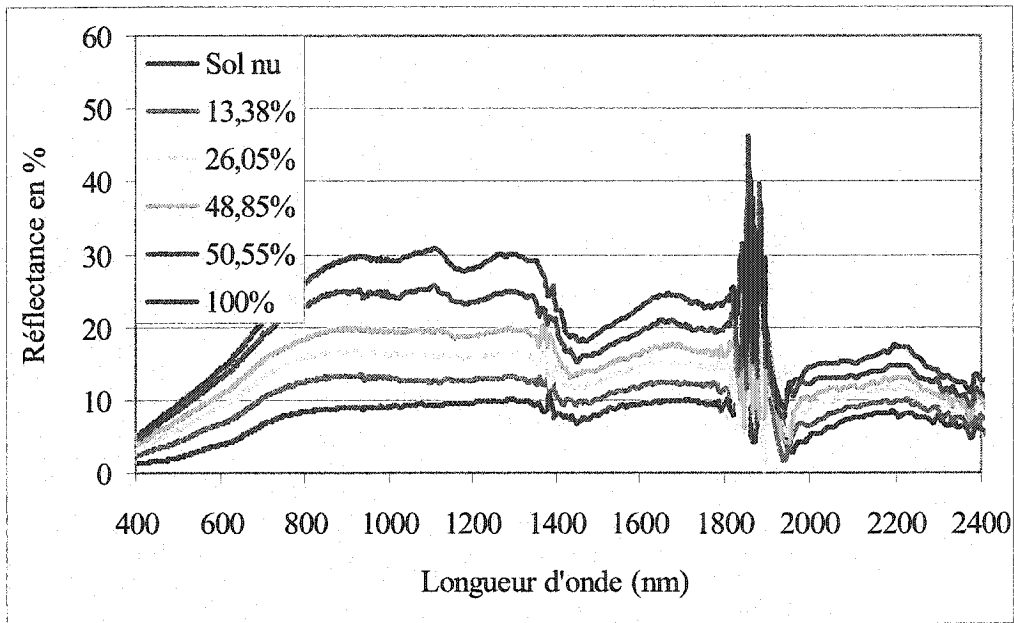
ANNEXE 1



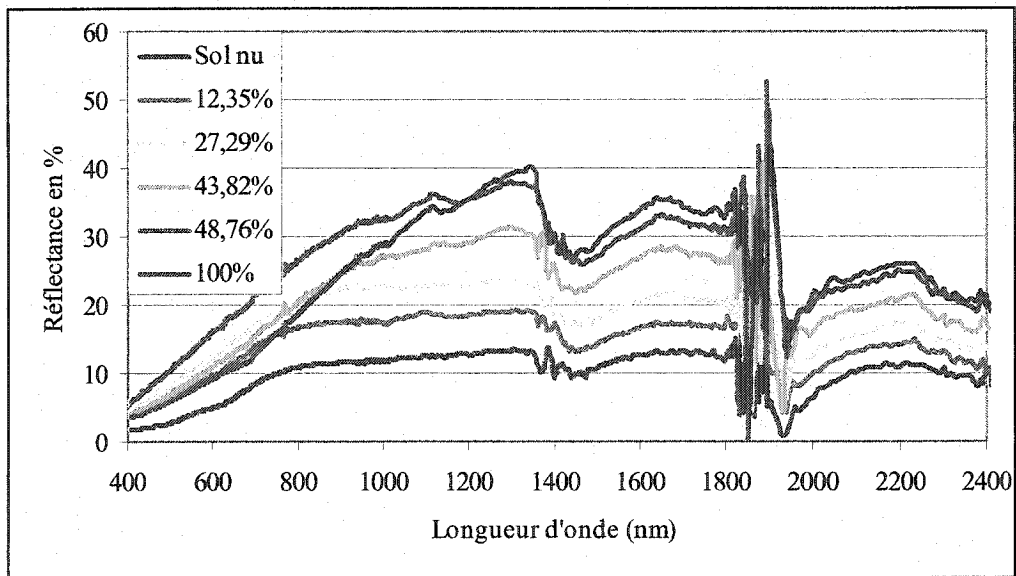
Spectres des résidus de maïs à différents taux de couverture et spectre du sol nu mesurés à l'aide du spectroradiomètre GER3700.



Spectres des résidus d'herbe à différents taux de couverture et spectre du sol nu mesurés à l'aide du spectroradiomètre GER3700.



Spectres de résidus de soja à différents taux de couverture et spectre su sol nu mesurés à l'aide du spectroradiomètre GER3700.



Spectres des résidus de tournesol à différents taux de couverture et spectre du sol nu mesurés à l'aide du spectroradiomètre GER3700.

ANNEXE 2

Tableau représentant la liste des canaux retenus pour l'analyse des indices de résidus de cultures et pour la classification par la méthode des réseaux de neurones.

Canaux utilisés	Porté en nm
21	727,8 nm à 743,8nm
25	788,8 nm à 805,0 nm
36	935,15 nm à 950,85 nm
42	1026,15 nm à 1045,85 nm
60	1292,65 nm à 1308,15 nm
70	1460,45 nm à 1476,35 nm
77	1557,05 nm à 1572,15 nm
84	1648,5 nm à 1663,1 nm
92	1748,5 nm à 1762,5 nm
98	1987,4 nm à 2008,6nm
101	2044,05nm à 2065,35 nm
104	2099,65 nm à 2119,75 nm
110	2206,95 nm à 2226,05 nm
115	2294,05 nm à 2311,95 nm

ANNEXE 3

Les formules des indices de résidus de cultures utilisées.

$$BI = \rho_{TM1} + \rho_{TM2} + \rho_{TM3} + \rho_{TM4}$$

où:

ρ_{TM1} : est la réflectance mesurée dans le bleu (TM1);

ρ_{TM2} : est la réflectance mesurée dans le vert (TM2);

ρ_{TM3} : est la réflectance mesurée dans le rouge (TM3);

ρ_{TM4} : est la réflectance mesurée dans le proche infrarouge (TM4).

$$CAI = [0,5 * (\rho_x + \rho_y) - \rho_z]$$

où:

ρ_x : est la réflectance mesurée entre 1975 et 2025 nm;

ρ_y : est la réflectance mesurée entre 2175 et 2225 nm;

ρ_z : est la réflectance mesurée entre 2075 et 2125 nm.

$$NDI = (\rho_{TM4} - \rho_{TM5}) / (\rho_{TM4} + \rho_{TM5})$$

où:

ρ_{TM5} est la réflectance mesurée dans le MIR (TM5).

$$SACRI = \alpha (\rho_{TM4} - \alpha \rho_{TM5} - \beta) / (\alpha \rho_{TM4} + \rho_{TM5} - \alpha \beta)$$

où:

α est la pente de la droite de sols nus dans l'espace spectral MIR-PIR;

β est l'ordonnée à l'origine de la droite de sols nus dans l'espace spectral MIR-PIR.

$$MSACRI = C^{ste} [a(\rho_{ETM5} - a \rho_{ETM7} - \beta) / (\alpha \rho_{ETM5} + \rho_{ETM7} - \alpha \beta)]$$

où:

C^{ste} : est une constante multiplicative ayant une valeur de 5;

a : est la pente de la droite de sols nus dans l'espace spectral ETM5/ETM7;

b : est l'ordonnée à l'origine de la droite de sols nus dans l'espace spectral ETM5/ETM7;

ρ_{ETM5} : est la réflectance mesurée dans le MIR (ETM5);

ρ_{ETM7} : est la réflectance mesurée dans le MIR (ETM7).

$$CRIM = SM/SR = \tan(\delta) / \tan(\zeta)$$

où:

L'angle ζ est mesuré en faisant la soustraction de la fonction réciproque de la tangente (tg^{-1}) de la pente de la droite des résidus par la fonction réciproque de la tangente (tg^{-1}) de la pente de la droite des sols nus.

L'angle δ est mesuré en faisant la soustraction de la fonction réciproque de la tangente (tg^{-1}) de la pente de la droite (M) par la fonction réciproque de la tangente (tg^{-1}) de la pente de la droite des sols nus.

ANNEXE 4

Paramètres utilisés par la méthode des réseaux de neurones.

Quantité d'entrées	14 canaux
Nombre de couche cachée	3
Nombre de neurones par couche cachée	28
Quantité de sortie	4 classes
Seuil de rendement	0,01
Vitesse d'apprentissage	0,9
Nombre d'itération	1000

ANNEXE 5

Chevrier, M., Bannari, A., Deguise, J.-C., McNairn, H. and Staenz, K. Hyperspectral Narrow-wavebands for Discriminating Crop Residues from Bare Soil. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'2002), Toronto, Ontario, 24-28 June 2002. Proceedings on CD-Rom, paper IIA35-1053

Hyperspectral Narrow-wavebands for Discriminating Crop Residue from Bare Soil

M. Chevrier¹, A. Bannari¹, J.-C. Deguise², H. McNairn², and K. Staenz²

¹ Remote Sensing and Geomatics of Environment Laboratory,
Department of Geography, University of Ottawa
Ottawa (Ontario) K1N 6N5
Tél. (613) 562-5800 (poste. 1042), Fax (613) 562-5145;
Email: abannari@uottawa.ca

² Canada Centre for Remote Sensing, Natural Resources Canada
588 Booth Street, Ottawa (Ontario) K1A 0Y7

Abstract-This study consisted of measuring different crop residue cover on the ground with the GER-3700 and extracting spectrums of different crop residue cover from a Probe-1 hyperspectral image to demonstrate which of the 128 bands was best suited to discriminate crop residues from bare soil. The results indicated that independently of the crop residue cover and the optical properties of the bare soil, the best combination of bands to distinguish crop residues from bare soils was band 36 (935.15 to 950.85 nm) versus band 115 (2294.05 to 2311.95 nm).

1. INTRODUCTION

Conservation of dry vegetation and crop residues after harvesting is an effective anti-erosion measure [1]. Scientists found that 15% corn residue cover can reduce erosion by 75% in comparison to bare soil [2]. As for the environmental aspect, crop residues improves the structure of the soil, increases organic matter content in the soil, has positive influences on water infiltration, evaporation and on soil temperature [3], and fixes CO₂ to the soils. Furthermore, data on residue cover percentages are useful for input into soil erosion models, i.e. to calculate the "C" factor of the Universal Soil Loss Equation. Several techniques for identifying and mapping crop residues exist (visual estimate method, line-transect method, point intercept method, meter stick method, spiked wheel method and the photographic method)[4]. However, these methods are time consuming, not suited for large territory coverage and very costly to operate on large territory [5]. One challenge of remote sensing, as a potential alternative to detect crop residues and to monitor agricultural fields in Canada, is to differentiate residues from bare soil, especially when the residues has been weathered. Previous work done with Landsat ETM indicated that the best spectral range to discriminate

A series of spectroradiometric measurements were taken with the GER-3700, which allows to measure the reflectance of a target between 400 nm to 2500 nm.

residues from bare soils is in the short-wave infrared using ETM-5 band versus ETM-7 band [6]. This is due to the absorption of cellulose and lignin in this region of the spectrum. Hyperspectral sensors, such as the Probe-1, have many narrow continuous bands ranging from the visible to the short-wave infrared (40 to 2500 nm). The objective of this paper consists of demonstrating which spectral bands of the Probe-1 sensor (128 spectral bands), provide optimal separability between crop residues and bare soils. In order to achieve that objective we had to take reflectance measurements at the ground of different types of bare soils (colour, moisture, brightness) and different types of crop residues (wheat, corn, barley, soya, sunflower) at various rates of coverage with the GER-3700. We also had to extract reflectance measures of different percentages of crop residue cover from the Probe-1 data, acquired at a test site in Saskatchewan. We also looked at the first derivative to verify if the bands selected were indeed appropriate to discriminate crop residues from bare soils.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 STUDY SITE

The data were acquired at the IHARF farm (Indian Head Agricultural Research Foundation) which is situated three kilometres east of Indian Head, Saskatchewan (50°32'15" N, 103°40'10" W). Several reasons explain the choice of this study site. First of all, this site is very representative of Canadian prairies agricultural lands (Manitoba, Saskatchewan and Alberta). Given that the economy of the Canadian prairies is mainly based on agriculture, it is essential to give a lot of importance to protecting agricultural fields against wind and water erosion. Hence the importance of cartography of crop residues on agricultural fields.

2.2 GROUND MEASUREMENTS

During these visits, the reflectance of four various types of residues (corn, wheat, soya and barley residues) at various rates of coverages was measured. We noted the information

concerning the type of residues present, the height, the orientation, the estimation of colour and the humidity of the soils, the presence or the absence of green vegetation. In addition, a serie of spectroradiometric measurements were taken for thirty various types of soils. They include the rates of humidity, the levels of roughness, the colour and the brilliancy which differed from one to another. Furthermore, digital photos of crop residues were also taken to calculate percentage cover of the residues using the Iso Data classifier found in the PCI image analysis software. Convolving the GER-3700 data to the Probe-1, it was then possible to select the appropriate bands from the ground-based data for maximization of the separability between crop residues and bare soils.

2.3 HYPERSPECTRAL IMAGE

The Probe-1 hyperspectral sensor is an airborne sensor composed of 128 bands covering the regions of the visible, the NIR and the MIR (400 nm to 2500 nm). As for the IHARF image, the aircraft was flown at 2500 m resulting in a spatial resolution of 5 m. The angle FOV of this hyperspectral sensor is 60°, whereas the angle IFOV is between 2.0 and 2.5 mrad. All the Probe-1 image data pre-processing (radiometric calibration, atmospheric correction, and geometric correction) were done at the Canada Centre for Remote Sensing.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

While comparing the separability between bare soils and crop residues obtained with the GER-3700 data, three different situations arose. In certain cases, such as band 83 (1635.4 to 1650.4 nm) versus 88 (1699.15 to 1713.45 nm), no level of separability between the crop residues and the bare soils was observed due to the linear distribution of crop residues and bare soils along the bisector line. In other cases, such as band 71 (1474.4 to 1490.2 nm) versus 115 (2294.05 to 2311.95 nm), a good separability between crop residues and bare soils was noted only when the rate of coverage of crop residues was higher than 50 %. In other cases, such as band 36 (935.15 to 950.85 nm) versus 115 (2294.05 to 2311.95 nm), the separability between crop residues and bare soils was always visible independently of the rate of coverage of the crop residues. The distribution of the bare soils and the crop residues in a bi-dimensional plan of band 71 versus 115 and band 36 versus 115 are shown on figure 1 and 2. The distribution of the bare soils are in two specific regions on the bisector line. The ones situated at the lower left side of the bisector line are wet and the ones situated at the higher right side are dry. The crop residues situated at the lower part of the bisector line are dark (soya) and the ones situated at the higher right site

are bright (corn). Independently of the crop residue cover and the optical properties of the bare soils, the best combination of bands to distinguish crop residues from bare soil while using the GER-3700 data was band 36 versus band 115.

The analysis of the separability between bare soils and crop residues obtained with the Probe-1 hyperspectral image gave similar results. Throughout the experience, independently of the rate of crop residue coverage, some bands were able to discriminate the crop residues from the bare soils. Indeed band 36 versus band 115 was always able to clearly discriminate these two elements even with only a crop residue rate of coverage of 5 %. The separability between bare soils and crop residues with a rate of coverage of 50 % is shown on figure 3. The crop residues are well separated from the bare soils and are situated below the bisector line. In comparison, the bare soils are situated well above the bisector line. Note the presence of pixels grouping situated at the top of figure 3. These pixels correspond to the presence of green vegetation in that territory. Independently of the crop residue cover and the optical properties of the bare soils, both the measurements with the GER-3700 and the Probe-1 image gave the highest level of separability between bare soils and crop residues with band 36 versus 115.

We verified successfully the efficiency of the various bands that were the most effective with the analysis of the first derivative of the corn residues. This said derivative serves as an indicator to verify regions where there is a sudden change in the spectrum which shows peaks of absorptions of crop residues. The first derivative of the corn residues at a rate of 100 % coverage between 700 to 1100 nm shown on figure 4 confirms the efficiency of bands 25 (788.8 to 805.0 nm), 36 (935.15 to 950.85 nm) and 42 (1026.15 to 1045.85 nm). Furthermore, the one of the corn residues at a rate of 100 % coverage between 1450 to 2050 nm illustrated on figure 5 proves that band 70 (1460.45 to 1476.35 nm), 73 (1502.35 to 1517.65 nm), 77 (1557.05 to 1572.15 nm), 85 (1661.15 to 1675.65 nm) and 98 (1987.4 to 2008.6 nm) are well adapted to discriminate crop residues from bare soils. Moreover, the first derivative of corn residues at a rate of 100 % coverage between 2000 to 2400 nm shown on figure 6 validates once again the potential use of bands 101 (2044.05 to 2065.35 nm), 104 (2099.65 to 2119.75 nm), 110 (2206.95 to 2226.05 nm) and 115 (2294.05 to 2311.95 nm) for differentiating crop residues from bare soils. All the bands of the Probe-1 sensor mentioned above provided optimal separability between crop residues and bare soils.

4.CONCLUSIONS

In conclusions it as been proven that independently of the crop residue cover and the optical properties of the bare soils, the use of band 36 (935.15 to 950.85 nm) versus band 115 (2294.05 to 2311.95 nm) concerning the separability between crop residues and bare soils obtained with the spectroradiometer GER-3700 and with the hyperspectral Probe-1 gave better results.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank NSERC for fundings and the CCRS for the hyperspectral Probe-1 image and for financial support.

REFERENCES

- [1] Roberts, P. and Coleman, D. (1988) A Survey of Crop Residue in Southwestern Ontario, 64p.
- [2] Ketcheson, J.W. and Stonehouse, D.P. (1983) Conservation tillage in Ontario. Journal of Soils and Water Conservation, vol. 38, pp. 253-254.
- [3] Aase, J.K. and Tanaka, D.L. (1991) Reflectance from four wheat residue cover densities as influenced by three soil backgrounds. Agronomy Journal, vol. 83, pp. 753-757.
- [4] Chevrier, M. (2002) Potentiel de la télédétection hyperspectrale pour la cartographie des résidus de cultures. Thèse de maîtrise.
- [5] Daughtry, C.S.T., McMurtrey, J.E., Chapelle, E.W., Hunter, W.J. and Steiner, J.L. (1996) Measuring Crop Residue Cover Using Remote Sensing Techniques. Theoretical and Applied Climatology, vol. 54, pp. 17-26.
- [6] Bannari, A., Haboudane, D. et Bonn, F. (2000) L'intérêt du moyen infrarouge pour la cartographie des résidus de cultures. Journal canadien de télédétection, vol. 26, no. 5, pp. 384-393.

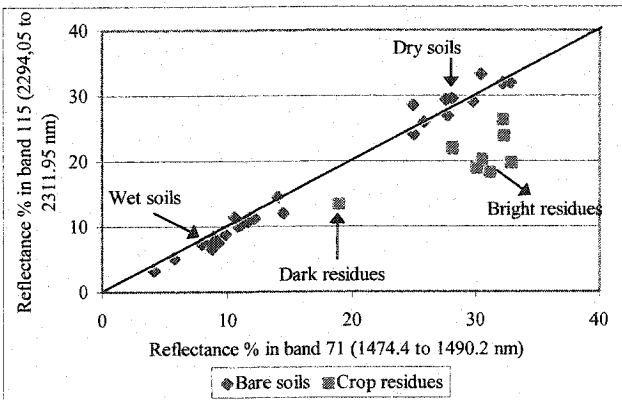


Figure 1: Bi-dimensional plan of band 71 versus 115 showing the distribution of 100 % crop residue cover rate and bare soils obtained with the GER-3700.

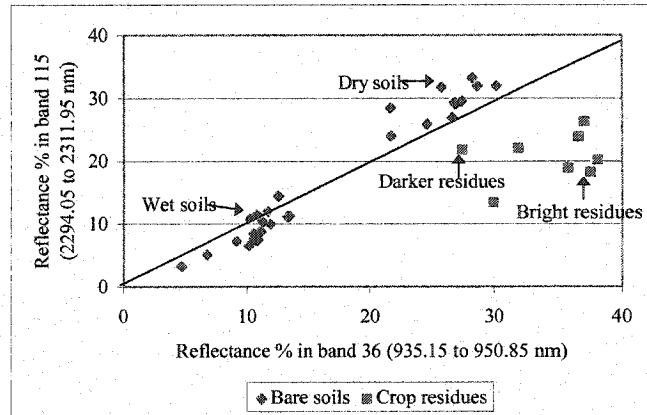


Figure 2: Bi-dimensional plan of band 36 versus 115 showing the distribution of 100 % crop residue cover rate and bare soils obtained with the GER-3700.

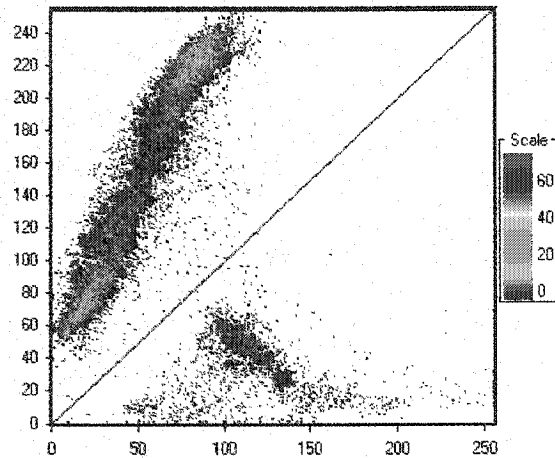


Figure 3: Separability between a crop residue rate of 50 % and bare soils by using band 36 versus 115 obtained with the Probe-1 sensor.

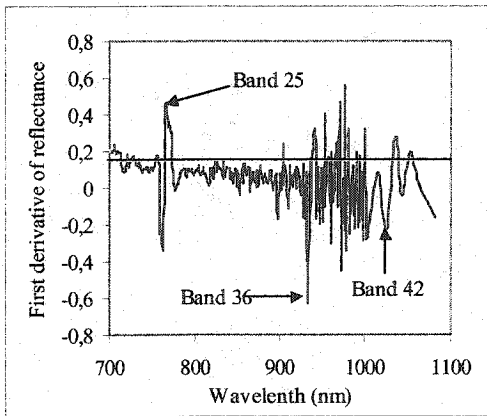


Figure 4: First derivative of corn residues with a cover rate of 100 % (700 to 1100 nm) obtained with the GER3700.

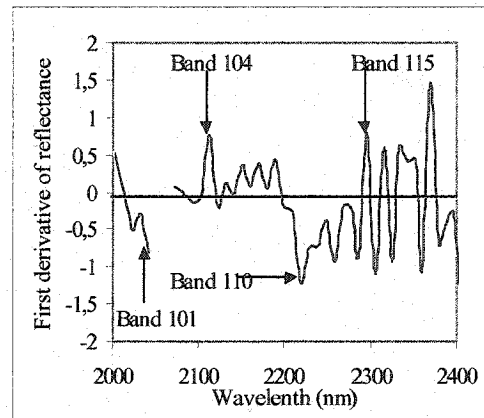


Figure 6: First derivative of corn residues with a cover rate of 100 % (2000 to 2400 nm) obtained with the GER3700.

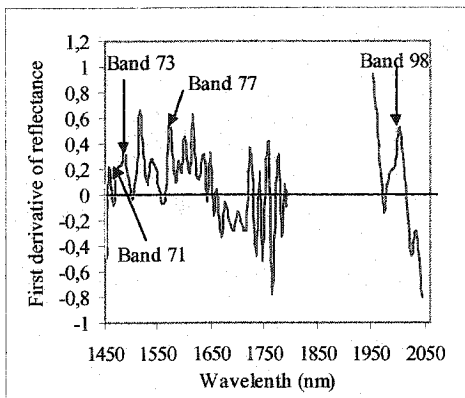


Figure 5: First derivative of corn residues with a cover rate of 100 % (1450 to 2050 nm) obtained with the GER3700.

ANNEXE 6

Chevrier, M., Bannari, A., Deguise, J.-C., McNairn, H. and Staenz, K. Potential of Hyperspectral Remote Sensing for Crop Residue Mapping. International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing, Valencia, Spain, 16-20 September 2002, p. 61-68.

Potential of Hyperspectral Remote Sensing for Crop Residue Mapping

M.Chevrier¹, A. Bannari¹, J.-C. Deguise², H. McNairn², and K. Staenz¹⁻²

¹ Remote Sensing and Geomatics of Environment Laboratory,
Department of Geography, University of Ottawa
Ottawa (Ontario) K1N 6N5
Tél. (613) 562-5800 (poste. 1042), Fax (613) 562-5145;
Email: m.chevrier@moncanoie.com

² Canada Centre for Remote Sensing, Natural Resources Canada
588 Booth Street, Ottawa (Ontario) K1A 0Y7

Abstract – This study focuses on the potential of indices for estimation of crop residue cover in an agricultural environment. Several indices were compared (BI, CAI, NDI, SACRI, MSACRI and CRIM) in order to identify the ones that are more suitable for estimation of fraction of corn residue cover. For this purpose, ground-based reflectance measurements, collected with a GER3700 spectroradiometer and resampled to the Probe-1 spectral band characteristics were used in this investigation together with hyperspectral Probe-1 data. The results indicate that for the ground-based reflectance the best residue indices for the estimation of crop residue cover are the CRIM and MSACRI-1 with a standard error of estimate of 20.2 % and 22.7 % respectively. For the Probe-1 data, the results demonstrated that the MSACRI-1 was much more representative of the ground reference information and outperformed the other indices.

1. INTRODUCTION

Conservation of crop residue after harvesting is an effective anti-erosion measure (Freebairn and Worcker, 1986). With as little as 15 % corn residue cover, erosion can be reduced by 75 % (Ketcheson and Stonehouse, 1983). As for the environmental aspect, crop residue improves soil structure, increases organic matter content in the soil, has positive influences on water infiltration, evaporation and on soil temperature (Aase and Tanaka, 1991) it can also play an important role on fixing CO₂ to the soil (Rice, 2002). Furthermore, data on residue cover percentages are useful for input into soil erosion models such as the Universal Soil Loss Equation (Wischmeier and Smith, 1978). Several techniques for identifying and mapping crop residue exist, such as the visual estimate method, line-transect method, point intercept method, meter stick method, spiked wheel method and photographic method (Chevrier *et al.*, 2002). However, these

methods are time consuming, not suitable for large area coverage and very costly to operate on large areas (Daughtry *et al.*, 1996). One challenge of remote sensing, as a potential alternative to detect crop residue and to monitor agricultural fields in Canada, is to differentiate residue from bare soil, especially when residue has been weathered. Over the years, scientists have developed several vegetation indices for quantitative evaluation of vegetation cover (Bannari *et al.*, 1995). Due to the absence of chlorophyll in senescent vegetation and in crop residue, these indices are not suited for estimation of crop residue cover (Cyr *et al.*, 1995). Scientists had to find new spectral ranges that are more adequate for crop residue. They developed new indices that are suited for quantitative evaluation of crop residue cover. Furthermore, the development of residue indices is difficult because they must be independent of optical properties of bare soil, colour and brightness (Bannari *et al.*, 1999). Six major crop residue indices are found in

the literature. These are the Brightness Index (BI) (Major *et al.*, 1990), Cellulose Absorption Index (CAI) (Daughtry *et al.*, 1997), Normalized Difference Index (NDI) (McNairn and Protz, 1993), Soil Adjusted Corn Residue Index (SACRI) (Biard *et al.*, 1995), Modified Soil Adjusted Corn Residue Index (MSACRI) (Bannari *et al.*, 2000), and Crop Residue Index Multiband (CRIM) (Biard and Baret, 1997). Due to the large number of crop residue indices, it is imperative to know which indices provide the optimal estimation of crop residue cover. For that purpose, two different objectives were pursued:

- Selection of appropriate spectral range and, subsequently, the best crop residue index for optimal estimation of crop residue cover using GER3700 ground-based spectroradiometer measurements resampled to the Probe-1 hyperspectral bands; and
- Estimation of crop residue cover from airborne hyperspectral Probe-1 data using the different crop residue indices.

Note that the results in this study were limited to corn residue. For detail results on other types of residues (wheat, weed, soybean and sunflower) refer to Chevrier (2002).

2. DATA USED

2.1 Study Site

The data were acquired at the IHARF (Indian Head Agricultural Research Foundation) farm, which is located about three kilometres east of Indian Head, Saskatchewan (Canada) (50°32'15"N, 103°40'10" W). Complementary sets of spectroradiometer measurements were also acquired at the Agriculture Canada Experimental farm in Lennoxville, Québec (Canada) (45°22'15"N, 71°51'35" W).

2.2 Ground Measurements

A series of reflectance measurements were collected between 400 nm to 2500 nm with the GER3700 spectroradiometer. The reflectance of corn residue was measured with varying percentages of residue cover. Additional information was collected, including height, orientation and colour of the residue, surface soil moisture, and presence or absence of green vegetation. A series of spectroradiometric measurements were acquired for thirty soil samples, representing different soil moisture levels, soil roughness, and soil colours. The field-of-view of the GER3700 was 10° and the distance between the target and the instrument was

1.85 m, which gives a diameter of 32.37 cm on the target. Digital photos of crop residue were also taken to calculate the percentage cover of residue. The percent cover was calculated using an unsupervised Isodata classification algorithm.

2.3 Hyperspectral Image Data

The Probe-1 hyperspectral sensor is an airborne sensor with 128 spectral bands covering the visible near-infrared (VNIR) and short-wave infra-red (SWIR) from 400 nm to 2500 nm. The spectral resolution varies between 11 nm and 22 nm. The aircraft was flown at a 2500 m altitude above sea level resulting in a spatial resolution of 5 m. The Probe-1 data were radiometrically calibrated to remove calibration errors (Secker *et al.*, 2001) and atmospherically corrected to achieve surface reflectance (Staenz and Williams, 1997). Note that to preserve radiometric integrity of each pixel in the image, no geometric correction of the Probe-1 data was carried out.

2.4 Description of the Crop Residue Indices

Major *et al.* (1990) developed the BI (equation 1), which uses the first four bands of Landsat TM. It has been proven that the BI is dependent of the optical properties of bare soil (Bannari *et al.*, 1999). Daughtry *et al.* (1997) based their study on the absorption of cellulose between 1975 nm and 2225 nm for the distinction of residue and bare soil and came up with the CAI (equation 2). Although studies have shown that the CAI is independent of the optical properties of bare soil, it has also been demonstrated that it is only suited for small amounts of crop residue cover (Bannari *et al.*, 1999). McNairn and Protz (1993) reported the sensitivity of the near infrared and created the NDI (equation 3), which is based on the same concept as the NDVI but where red and near infrared (NIR) bands are substituted with NIR and SWIR bands. The NDI is affected by the optical properties of bare soil. However, this index gives good results when using bands ETM-7 (2100nm – 2350 nm) and ETM-5 (1550 nm – 1750 nm) (Bannari *et al.*, 1999). In order to minimize the effect of the optical properties of bare soil of the NDI, Biard *et al.* (1995) proposed the SACRI (equation 4), which integrates the soil line concept. The principles of this index are inspired from the transformation of the SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) in TSAVI (Transformed Soil Adjusted Vegetation Index). The SACRI is less sensitive to the optical properties of bare soil than the NDI, but works best with small amounts of crop residue cover (Bannari *et al.*,

1999). Another crop residue index was developed by the modification of the SACRI into MSACRI (Bannari *et al.*, 2000). This index uses two specific SWIR spectral bands, ETM-5 and ETM-7 (equation 5). The interest in using these two spectral bands is because this region of the spectrum is recognised as being favourable to identify various types of rocks, soils, dry vegetation as well as green vegetation. This index gives good results and is independent of the optical properties of bare soil (Bannari *et al.*, 2000). Biard and Baret (1997) then developed the CRIM (equation 6), which uses a linear unmixing model to extract the fraction corresponding to crop residue from the soil-residue complex. Contrary to other indices, where specific regions of the spectrum are used, the CRIM may be applied to any set of spectral bands to discriminate residues from bare soils. The results obtained with the CRIM are a direct estimate of residue cover fraction in the range of 0 to 1. Research has demonstrated that the CRIM is not very sensitive to variations in soil optical properties due to changes in moisture and roughness levels (Biard and Baret, 1997). The equations of these indices are as follows:

$$BI = \rho_{TM1} + \rho_{TM2} + \rho_{TM3} + \rho_{TM4}, \quad (1)$$

$$CAI = [0.5 * (\rho_x + \rho_y) - \rho_z], \quad (2)$$

$$NDI = (\rho_{TM4} - \rho_{TM5}) / (\rho_{TM4} + \rho_{TM5}), \quad (3)$$

$$SACRI = \frac{\alpha (\rho_{TM4} - \alpha \rho_{TM5} - \beta)}{(\alpha \rho_{TM4} + \rho_{TM5} - \alpha \beta)} \quad (4)$$

$$MSCARI = \frac{C^{ste} [a (\rho_{ETM5} - a \rho_{ETM7} - b)]}{(a \rho_{ETM5} + \rho_{ETM7} - ab)} \quad (5)$$

$$CRIM = \frac{\tan(\delta)}{\tan(\zeta)} = \frac{\cos(\delta)}{\cos(\zeta)} * \sqrt{\frac{1 - \cos^2(\delta)}{1 - \cos^2(\zeta)}}, \quad (6)$$

where:

ρ_{TM1} is the reflectance measured in TM1;

ρ_{TM2} is the reflectance measured in TM2;

ρ_{TM3} is the reflectance measured in TM3;

ρ_{TM4} is the reflectance measured in TM4;

ρ_{TM5} is the reflectance measured in TM5;

ρ_{ETM5} is the reflectance measured in ETM5;

ρ_{ETM7} is the reflectance measured in ETM7;

ρ_x is the reflectance measured between 1975 and 2025 nm;

ρ_y is the reflectance measured between 2175 and 2225 nm;

ρ_z is the reflectance measured between 2075 and 2125 nm;

α is the slope of the soil line (TM4/TM5);

β is the ordinate at the origin of the soil line (TM4/TM5);

C^{ste} is a multiplicative constant of 5;

a is the slope of the soil line (ETM5/ETM7);

b is the intercept of the soil line (ETM5/ETM7);

δ is the angle between a point (M) and soil line;

and ζ is the angle between the soil line and residue line.

Instead of using TM1 through TM5, ETM5 and ETM7 for the calculation of the different indices, the reflectance measurements of the GER3700, resampled to the Probe-1 hyperspectral bands, were used. The resampled Probe-1 bands that were closest to the centre wavelength of each TM bands were selected. Therefore, instead of using TM1, TM2, TM3, TM4, TM5, ETM5 and ETM7, bands 5, 10, 17, 27, 104, 84 and 110 of the Probe-1 hyperspectral sensor were used. Furthermore, the most successful bands to discriminate crop residues from bare soil of the Probe-1 hyperspectral sensor were also identified and used to derive the NDI, SACRI and MSACRI indices. These bands are centred at 943 nm (Probe-1 band 36) and 2303 nm (115). The selection of these two bands is based on the analysis of the first derivative of corn and bare soil, and the separability of the ground-based spectroradiometric data as well as with the Probe-1 sensor (Chevrier *et al.*, 2002).

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1 Ground Data

Regarding the sensitivity of the BI to corn residue, the values range from 25.05 % to 80.95 %. This index tends to overestimate the rate of coverage when the residue cover is less than 60 %. However, this index underestimates the rate of coverage when the residue cover exceeds 70 %. The standard error of estimate was used as an accuracy measure for the performance of different indices. This measure is 19.92 % for the BI. Figure 1 provides the results of the BI for corn residue, and shows that the points are mostly well distributed. Indeed, as residue coverage increases the BI also tends to increase. When the rate of coverage exceeds 75 %, it is shown that there is a saturation problem.

The CAI appears less accurate than the BI, because it gives negative values. For example, many CAI values are negative and range from -104.0 % to 84.5%. From Figure 2, presenting this index for corn residue, several conclusions can be drawn. The CAI generally underestimates the rate of residue coverage. One exception is the data point with 73.71 % actual coverage versus an estimated value

of 76.5 %. The standard error of estimate of the CAI is 67.97%. The index values increase as residue increases. Contrary to Bannari *et al.* (1999), the study shows that it performs better when the residue coverage is greater than 50 %. In conclusion, this index performs poorly to lower coverage rates of corn residue, but does provide better results when the coverage rates are over 50%.

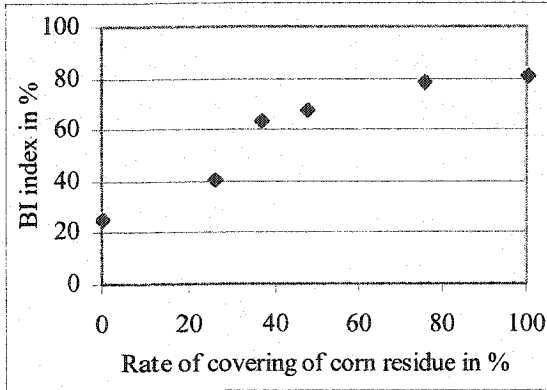


Figure 1: BI of a soil covered by corn residue obtained with the GER3700 resampled to the Probe-1 hyperspectral bands.

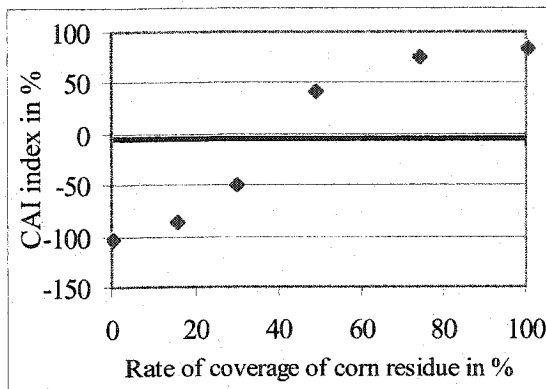


Figure 2: CAI of a soil covered by corn residue obtained with the GER3700 resampled to the Probe-1 hyperspectral bands.

Two sources of data will be presented for the NDI. NDI-1 is the traditional index, where the reflectance measurements of the GER3700 were convolved to bands 27 (827.6 nm) and 104 (2109.7 nm) of the Probe-1 sensor. NDI-2 is the modified index, which uses the most successful bands of the Probe-1 hyperspectral sensor to discriminate crop residues from bare soil, which are bands 36 (943 nm) and 115 (2303 nm). From Figure 3 several observations can be made. First of all, it is evident that the traditional index (NDI-1) is less effective than the modified index (NDI-2). For example, many of NDI-1 values are negative and only range from -9.35 % to 2.72 %. On the other hand, the NDI-2

values are closer to the measured residue coverages and range from 8.83 % to 32.11 %. However, both indices tend to underestimate the percentage of corn residue. The standard error of the estimate is 57.89% for NDI-1 and 35.23 % for NDI-2. Furthermore, when the rate of coverage exceeds 75% there is a saturation problem with NDI-2. In fact, the NDI-2 value slightly decreases when the rate of coverage is in the range from 75 % to 100 %. The traditional index NDI-1 was not able to properly estimate the amount of residue (Bannari *et al.*, 1999). It is also obvious that the NDI-1 values are all close to 0 %. In conclusion, it appears that the NDI-2 is a better estimate, especially when the residue coverage rate is below 35 %.

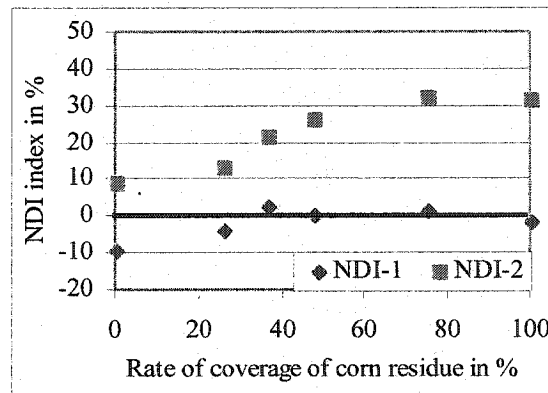


Figure 3: NDI of a soil covered by corn residue obtained with the GER3700 resampled to the Probe-1 hyperspectral bands.

Two different SACRI indices were calculated. SACRI-1 is again the traditional index where reflectance measurements of the GER3700 were convolved to bands 27 (827.6 nm) and 104 (2109.7 nm) of the Probe-1 sensor. SACRI-2 is a modified index, which uses bands 36 (943 nm) and 115 (2303 nm) of Probe-1. The soil line must be considered for the calculation of the SACRI. Figure 4 shows the SACRI values for corn. It illustrates that the traditional index, SACRI-1, is less effective than the modified index, SACRI-2. Negative values are generated with the SACRI-1 and the range of values is small, between -1.31 % and 6.23 %. In comparison, the estimates retrieved with SACRI-2 are higher (8.01 % to 41.92%) and more representative of the actual residue coverage. The standard error of the estimate is 54.57 % for SACRI-1 and 28.59 % for SACRI-2. Both indices underestimate the percentage of corn residue. Furthermore, the estimates of corn residue from the SACRI-2 index are more accurate at coverages lower than 45 %. This index provides poor

estimates for residue coverages above 60 % and a saturation problem arises when the rate exceeds 75%.

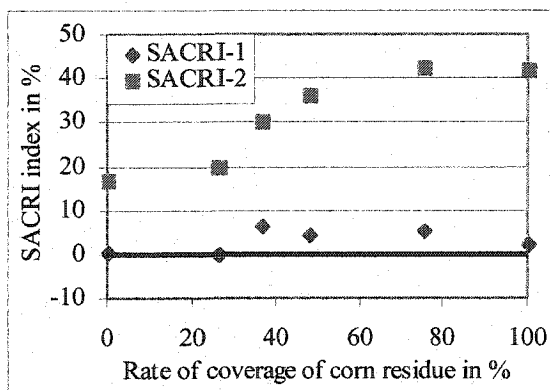


Figure 4: SACRI of a soil covered by corn residue obtained with the GER3700 resampled to the Probe-1 hyperspectral bands.

Two variations of MSACRI were tested. The traditional index (MSACRI-1) where reflectance measurements of the GER3700 were convolved to bands 84 (1655.8 nm) and 110 (2216.5 nm) of the Probe-1 sensor, whereas the modified index (MSACRI-2) uses the Probe-1 bands 36 (943 nm) and 115 (2303 nm). As with SACRI, the soil line must be considered. Figure 5 shows the MSACRI values for corn and demonstrates that the traditional index (MSACRI-1) is more effective than the modified index (MSACRI-2) for the estimation of corn residue. The estimated values from MSACRI-1 range between 3.9 % to 73.24 % with a standard error of estimate of 22.69 %. In comparison, the values from MSACRI-2 range from 1.21 % to 133.34 % with an error of 39.82%. It is interesting to observe that MSACRI-1 always underestimates the residue coverage, whereas MSACRI-2 overestimates the coverage. As illustrated in Figure 5, with MSACRI-2 there is a saturation problem when the rate of coverage exceeds 75 %.

The values of the CRIM index range between 18.98% to 94.82 %. This index always overestimates the coverage for corn except when residue coverage is 100 %. In this case, the estimated value is 94.82 %. The standard error of the estimate is 20.20 %. As illustrated in Figure 6, the residue estimates increase when the measured residue coverage increases. CRIM appears to work better when the rate of coverage is lower than 25 %. The average errors are larger when the rate exceeds 25 %. It appears that there is a saturation problem when the rate exceeds 75 %.

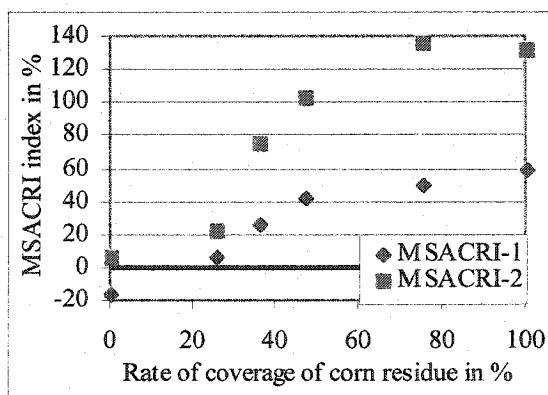


Figure 5: MSACRI of a soil covered by corn residue obtained with the GER3700 resampled into Probe-1 hyperspectral bands.

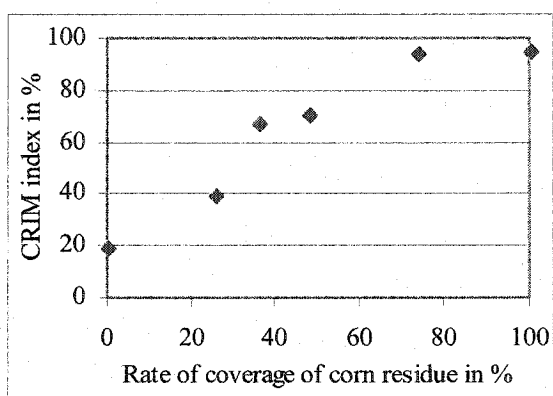


Figure 6: CRIM of soil covered by corn residue obtained with the GER3700 resampled to the Probe-1 hyperspectral bands.

The performance of indices are listed according to their standard error of estimate. The index with the smallest standard error is BI (19.99 %), followed by CRIM (20.20 %), MSACRI-1 (22.69 %), SACRI-2 (28.59 %), NDI-2 (35.23 %), MSACRI-2 (39.82 %), SACRI-1 (54.57 %), NDI-1 (57.89 %) and CAI (67.97 %). Surprisingly, the BI had a smaller standard error of estimate than the CRIM, SACRI and MSACRI, which take into account the soil line in their calculation. The soil at the IHARF farm were dark (low reflectance) which obviously benefited the BI. The results would not have been the same if the soils were brighter. In fact, due to the BI equation, the estimation of corn residue would have been much higher and the standard error of estimate would have increased. Therefore, the CRIM and MSACRI-1 were the better indices to estimate the rate of corn residue cover using GER3700 ground-based spectroradiometer measurements convolved to the Probe-1 hyperspectral bands.

3.2 Image Data

The results based on the image data were focused on four specific sites of the IHARF farm (Figure 7). Sites 1 and 2 were patches of pure bare soil and pure residue, respectively. Site 3 had a residue cover of 71.32 %, a bare soil cover of 9.12 % and a vegetation cover of 19.56%. Whereas site 4 had a residue cover of 44.62 %, a bare soil cover of 25.26%, and a vegetation cover of 30.12 %. Figures 8 and 9 represent the residue maps derived from the empirical indices BI, CAI, NDI-1 and NDI-2, and semi empirical indices SACRI-1, SACRI-2, MSACRI-1 and MSACRI-2. The different values of the indices were grouped into seven classes (Class 1 = 0-0.15; Class 2 = 0.15-0.30; Class 3 = 0.30-0.45; Class 4 = 0.45-0.60; Class 5 = 0.60-0.75; Class 6 = 0.75-0.90; Class 7 = 0.90-1.00). With regard to the BI, shown in Figure 8 (A), several conclusions can be drawn. Site 2 (100% residue cover) was estimated perfectly with a value between 90 and 100 %. As for site 1 (0% residue cover), the BI estimated the amount of residue to be between 15 and 30 %. For site 3 (71.32 % residue cover; 9.12 % bare soil cover; and 19.56 % vegetation cover), the BI underestimated the amount of residue by 30 to 60 %. In addition, absolutely no pixels representing soil were shown. For site 4 (44.62 % residue cover; 25.26% bare soil cover; and 30.12 % vegetation cover), the BI provided a good estimate for the amount of residue (30 to 60 %), but once again the results showed no bare soil. Therefore, the results obtained with the BI were not very accurate in estimating the amount of residue on the IHARF farm. When the rate of coverage is between 40 and 75 %, the BI underestimated the rate of coverage.

The results retrieved with CAI is shown in Figure 8 (B). As with the BI, the CAI correctly estimated the amount of residue from site 2 with values between 90 and 100%. Site 1 (0 % residue cover) again had a good estimate with 15 to 30 % residue cover. The amount of residue from site 3 was overestimated. Almost all pixels from site 3 indicate estimates between 60 and 75 %. Again no pixels representing bare soil were shown. For site 4, the CAI greatly overestimated the amount of residue. Again most of the pixels were estimated to be between 60 and 75% while the actual rate of coverage was 44.62 % and no bare soil was shown even if the portion of bare soil was 25.26 %. The results show that the CAI does not estimate accurately the amount of residue on the IHARF farm. When the rate of coverage is higher than 40 % and lower than 75 %, the CAI tends to overestimate the rate of coverage.

The NDI-1 and NDI-2 values of the IHARF farm are shown in Figures 8 (C) and 8 (D). For both indices, site 2 (100 % residue cover) was again perfectly estimated with values between 90 and 100%. With regard to site 1 (0 % residue cover), the NDI-1 and NDI-2 estimated the amount of residue to be between 15 and 30 %. When observing the results of these two indices on site 3, several conclusions can be drawn. They both estimated the residue amount to be between 30 and 60 % as well as being between 90 to 100 %, but no bare soil was shown. The large majority of pixels of NDI-2 overestimated the rate of coverage of residue. In fact, they have been classified as being between 90 and 100 %. For NDI-1, one third of the pixels correspond to 30 to 45 % residue cover; one third to 45 to 60 % residue cover and one third to 90 to 100% residue cover. As for site 4, NDI-1 greatly overestimated the amount of residue cover. Most of the pixels were classified as having a residue cover of 90 to 100 %. About one tenth of the pixels were classified as residue cover of 15 to 30 %, which obviously represents bare soil. The NDI-2 index was a little better than NDI-1 in estimating the amount of residue. The majority of pixels were classified as residue cover of 45 to 60 %. However, one third of the pixels were classified as 90 to 100% residue cover and one tenth between 15 and 30 %, which again represents the bare soil. The results obtained with both the NDI-1 and NDI-2 are not very encouraging as they do not accurately estimate the amount of residues. When the rate of coverage is between 40 and 75 %, both indices overestimate the rate of coverage.

The SACRI-1 and SACRI-2 of the are shown in Figures 9 (A) and 9 (B). With regard to site 2 (100% residue cover) both indices perfectly estimated the residue cover between 90 and 100 %. For site 1 (0 % residue cover), the SACRI-1 and SACRI-2 estimated the amount of residue to be between 15 and 30 %, while for site 3, both indices underestimated the rate of coverage. The large majority of the pixels were classified as residue cover of 30 to 60 % No bare soil was shown for either indices. With regard to site 4, SACRI-1 did estimate the amount of residue to be between 30 and 60 %, but only a few pixels were classified as bare soil. On the other hand, SACRI-2 accurately estimated the amount of residue from site 4. In fact, half of the pixels were classified as 30 to 45% residue cover, with the remaining pixels having a 15 to 30 % residue cover (bare soil). In conclusion, both indices underestimated the amount of residue on site 3, but SACRI-2 was very accurate in classifying site 4.

With regard to the MSACRI-1 and MSACRI-2, shown in Figures 9 (C) and 9 (D), respectively, several conclusions can be made. Both indices correctly estimated the amount of residue on site 2 (100 % residue cover). In fact, these two indices estimated the amount of residue to be between 90 and 100 %. For site 1 (0 % residue cover), the MSACRI-1 and MSACRI-2 estimated the amount of residue to be between 15 and 30 % while the real rate of coverage of bare soil was 100 %. With respect to site 3, MSACRI-1 accurately estimated the amount of residue. In fact, the large majority of the pixels were classified as residue cover of 45 to 75 % while some pixels were assigned to 15 to 30% residue cover, which represents bare soil (9.12 %). MSACRI-2 was not as accurate as MSACRI-1. The vast majority of the pixels were classified as residue cover of 45 to 60 %. For site 4 (44.62 % residue cover; 25.26 % bare soil cover; and 30.12 % vegetation cover), six tenth of MSACRI-1 pixels were classified as having a residue cover of 15 to 30% and four tenth were classified to be between 45 and 60 %. The results of MSACRI-2 were similar. Half of the pixels were estimated to have a residue cover between 15 and 30 % while the other half were between 45 and 60 %. Accordingly, the results obtained with the MSACRI-1 over the IHARF farm were accurate for the estimation of the amount of residue. The estimation of crop residue cover of the different sites is shown on Table 1a, 1b, 1c and 1d.

Table 1a: Estimation of crop residue cover of site 1

Site 1 (0 % residue cover)	Estimation
BI	15 – 30 %
CAI	15 – 30 %
NDI-1	15 – 30 %
NDI-2	15 – 30 %
SACRI-1	15 – 30 %
SACRI-2	15 – 30 %
MSACRI-1	15 – 30 %
MSACRI-2	15 – 30 %

Table 1b: Estimation of crop residue cover of site 2

Site 2 (100 % residue cover)	Estimation
BI	90 – 100 %
CAI	90 – 100 %
NDI-1	90 – 100 %
NDI-2	90 – 100 %
SACRI-1	90 – 100 %
SACRI-2	90 – 100 %
MSACRI-1	90 – 100 %
MSACRI-2	90 – 100 %

Table 1c: Estimation of crop residue cover of site 3

Site 1 (71.32 % residue cover)	Estimation
BI	30 – 60 %
CAI	60 – 75 %
NDI-1	30 – 60 % and 90 – 100 %
NDI-2	90 – 100 % and 30 – 60 %
SACRI-1	30 – 60 %
SACRI-2	30 – 60 %
MSACRI-1	45 – 75 %
MSACRI-2	45 – 60 %

Table 1d: Estimation of crop residue cover of site 4

Site 1 (44.62 % residue cover)	Estimation
BI	30 – 60 %
CAI	60 – 75 %
NDI-1	90 – 100 %
NDI-2	45 – 60 %
SACRI-1	30 – 60 %
SACRI-2	30 – 45 %
MSACRI-1	45 – 60 %
MSACRI-2	45 – 60 %

4. CONCLUSIONS

This study tested the performance of nine different crop residue indices on agricultural fields in Saskatchewan, Canada. These indices are the BI, CAI, NDI-1, NDI-2, SACRI-1, SACRI-2, MSACRI-1, MSACRI-2, and CRIM. Firstly, the accuracy of these indices was examined using ground reflectance measurements obtained with the GER3700 convolved to the Probe-1 hyperspectral bands for corn residues at various rates of coverage. The results indicated that the CRIM and the MSACRI-1 are better indices to estimate the residue cover, because they both take into account the soil line. Next, all the indices were applied to Probe-1 hyperspectral image data acquired over several agricultural fields. The MSACRI-1 estimates of residue cover were much more representative and outperformed the other indices.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank NSERC for financial support and CCRS for making the hyperspectral Probe-1 image data available as well as for its financial support. They would also like to thank Khalid Omari, Nancy Lemay and Karl Van Kessel of the University of Ottawa for technical support.

REFERENCES

- Aase, J.K., and Tanaka, D.L., 1991, Reflectance from four wheat residue cover densities as influenced by three soil backgrounds. *Agronomy Journal*, Vol. 83, pp. 753-757.
- Bannari, A., Morin, D. and Bonn, F., 1995, A Review of Vegetation Indices. *Remote Sensing Reviews*, Vol. 13, pp. 95-120.
- Bannari, A., Haboudane, D. and Bonn, F., 1999, Potentiel des mesures multispectrales pour la distinction entre les résidus de cultures et les sols nus sous-jacents. Forth International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition/ 21st Canadian Symposium on Remote Sensing, Ottawa, Ontario, Canada, 21-24 June 1999.
- Bannari, A., Haboudane, D., and Bonn, F., 2000, Intérêt du moyen infrarouge pour la cartographie des résidus de cultures. *Journal canadien de télédétection*, Vol. 26, No. 5, pp. 384-393.
- Biard, F., Bannari, A., and Bonn, F., 1995, SACRI (Soil Adjusted Corn Residue Index): un indice utilisant le proche et le moyen infrarouge pour la détection de résidus de cultures de maïs. 17ème Symposium Canadien sur la Télédétection, Saskatoon (Saskatchewan), Canada, pp. 413-419.
- Biard, F., and Baret, F., 1997, Crop Residue Estimation Using Multiband Reflectance. *Remote Sensing Environment*, Vol. 59, pp. 530-536.
- Chevrier, M., Bannari, A., Deguises, J.-C., McNairn, H., and Staenz, 2002, Hyperspectral Narrow-Wavebands for Discriminating Crop Residue from Bare Soil. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'02) /24th Canadian Symposium on Remote Sensing, Toronto, Ontario, Canada, 24-28 June 2002.
- Chevrier, M., 2002, Potentiel de la télédétection hyperspectrale pour la cartographie des résidus de cultures. Thèse de maîtrise, Université d'Ottawa, Ottawa, Ontario, Canada, en rédaction.
- Cyr, L., Bonn, F., and Pesant, A., 1995, Vegetation indices derived from remote sensing for estimation of soil protection against water erosion. *Ecological Modelling*, Vol. 79, No. 3, pp., 277-285.
- Daughtry, C.S.T., McMurtrey, J.E., Chapelle, E.W., Hunter, W.J., and Steiner, J.L., 1996, Measuring Crop Residue Cover Using Remote Sensing Techniques. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 54, pp. 17-26.
- Daughtry, C.S.T., Nagler, P.L., McMurtrey, J.E., and Lindwall, C.L., 1997, Measuring Crop Residue Cover by Shortwave Infrared Reflectance. *Agronomy, Abstracts*, p. 27.
- Freebairn, D.M. et Wockner, G.H. (1986) A Study of Soil Erosion on Vertisols of the Eastern Darling Downs, Queensland 1: Effects of Surface Conditions on Soil Movement Within Sontour Bay Catchments. *Australian Journal of Soil Science*, vol. 24, pp. 135-158.
- Ketcheson, J.W., and Stonehouse, D.P., 1983, Conservation tillage in Ontario. *Journal of Soils and Water Conservation*, Vol. 38, pp. 253-254.
- Major, D.J., Larney, F.L., and Lindwall, C.W., 1990, Spectral reflectance characteristics of wheat residue. *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Vol. 1, pp. 603-607.
- McNairn, H., and Protz, R., 1993, Mapping Corn Residue Cover on Agricultural Fields in Oxford County, Ontario, Using Thematic Mapper. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, No. 2, pp. 152-159.
- Rice, C.W., 2002, Storing Carbon in Soil : Why and How ? *Geotimes*, January 2002, pp. 1-5.
- Secker, J., Staenz, K., Gauthier, R.P., and Budkewitsch, P., 2001, Vicarious Calibration of Hyperspectral Sensors in Operational Environments. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 76, pp 81-92.
- Staenz, K., and Williams, D.J., 1997. Retrieval of Surface Reflectance from Hyperspectral Data Using a Look-Up Table Approach. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 23, No. 4, pp. 354-368.
- Wischmeier, W.H. and Smith, D.D., 1978, Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning, S.S. Department of Agriculture, *Agriculture Handbook*, No. 537, 58 pp.

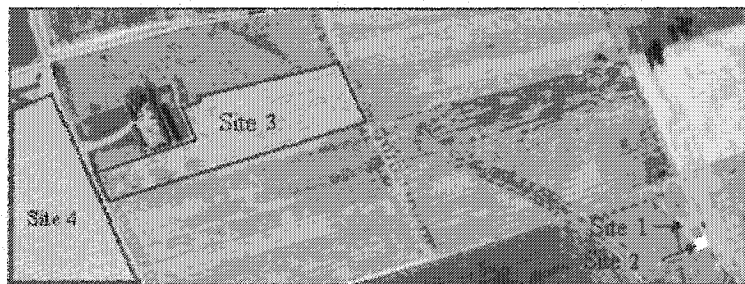


Figure 7: Probe-1 image of the IHARF farm in Saskatchewan, Canada.

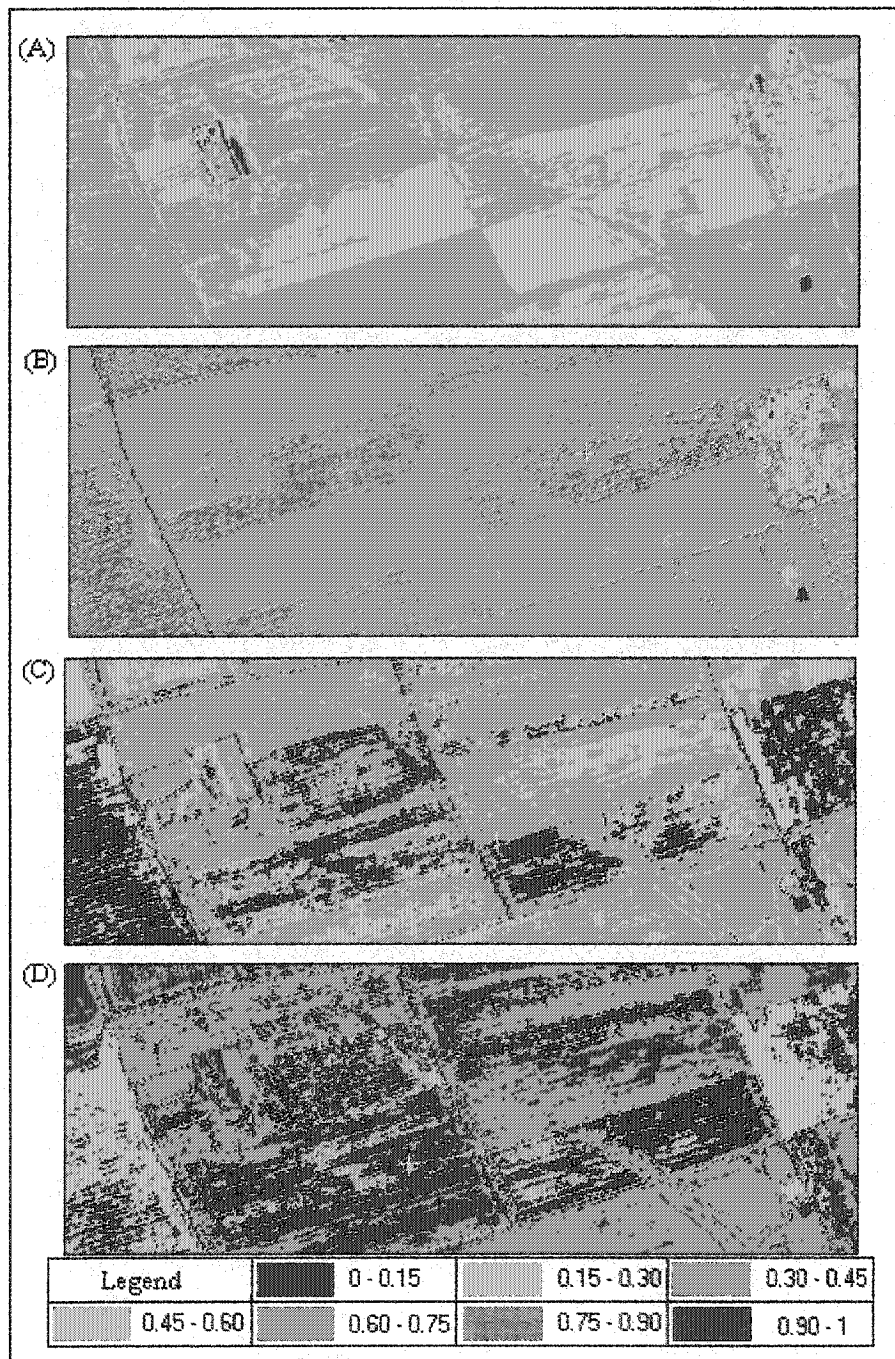


Figure 8: BI (A), CAI (B), NDI-1 (C), and NDI-2 indices extracted from fields of the IHARF farm.

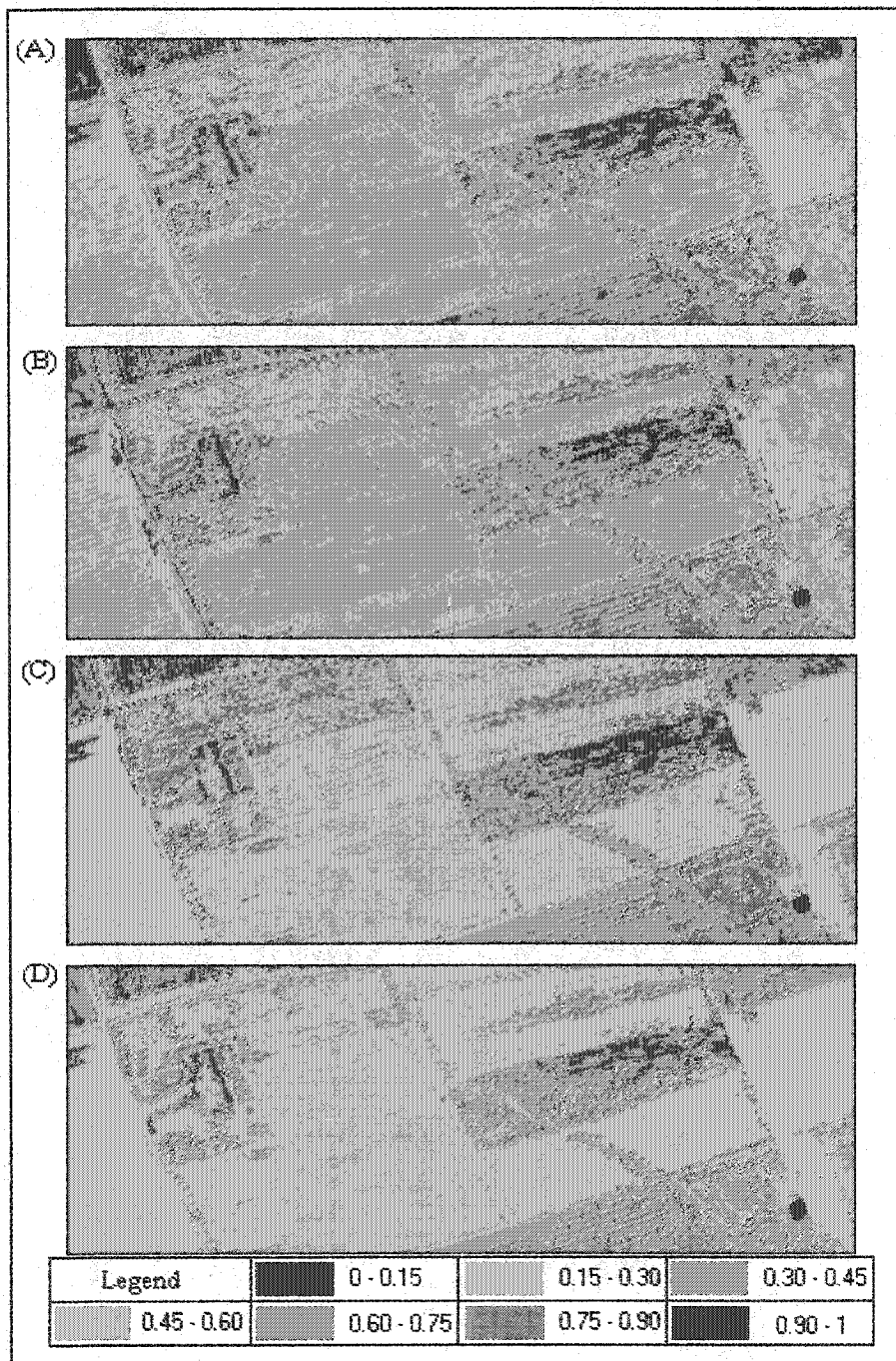


Figure 9 : SACRI-1 (A), SACRI-2 (B), MSACRI-1 (C), and MSACRI-2 (D) indices extracted from filed of the IHARF farm.