

Département de géomatique appliquée  
Faculté des lettres et sciences humaines  
Université de Sherbrooke

**Étude comparative d'indices de végétation radar à plusieurs fréquences et de l'indice de végétation optique (NDVI) pour le suivi de la croissance des cultures**

Marcellin Wani Chambu

Essai présenté pour l'obtention du grade de Maître ès sciences géographiques (M.Sc.)  
Cheminement en géodéveloppement durable

Septembre 2019

## Résumé

De nos jours, la télédétection contribue énormément dans le domaine de l'agriculture. La possibilité d'acquisition des mesures en tout temps et la non sensibilité aux perturbations atmosphériques sont des avantages reconnus à la télédétection radar. Cette étude a pour objectif d'effectuer une analyse comparative des indices radar, à savoir l'indice de végétation radar (RVI) et l'indice de végétation radar à double polarisation (IVRD<sub>vv</sub>) dans trois fréquences (L, C et X) et de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) utilisé en télédétection multispectrale optique dans un contexte de suivi de la croissance des cultures de blé, de canola, de maïs et de soja. Pour y parvenir, ces indices de végétation radar (RVI et IVRD<sub>vv</sub>) calculés à plusieurs fréquences et l'indice optique (NDVI) sont utilisés pour effectuer un suivi temporel de la croissance de ces quatre cultures. D'une part, l'efficacité des indices de végétation radar à traduire la quantité de la biomasse végétale disponible est analysée en déterminant l'indice et la fréquence les mieux adaptés au suivi de la croissance de chaque type de culture. D'autre part, la corrélation des indices de végétation radar (RVI et IVRD<sub>vv</sub>) et le NDVI par rapport à la quantité de la biomasse végétale est utilisée pour apprécier l'usage de ces indices de végétation radar comme alternative à l'utilisation du NDVI dans un contexte de suivi de la croissance des cultures de blé, de canola, de maïs et de soja.

Les indices radar RVI (indice de végétation radar) et IVRD<sub>vv</sub> (indice de végétation radar à double polarisation) ont été calculés sur la base d'images acquises sur les sites des campagnes de terrain *SMAP Validation Experiment 2012* (SMAPVEX12) et *SMAP Validation Experiment 2016 in Manitoba* (SMAPVEX16-MB) situés au Sud du Manitoba. Les données de biomasse végétale ainsi que l'indice de surface foliaire (LAI) ont été recueillis directement sur le terrain durant ces deux campagnes. Les données radar en bande L proviennent de la campagne SMAPVEX12, elles sont acquises par un *Uninhabited Aerial Vehicle Synthetic Aperture Radar* UAVSAR; celles utilisées en bande C et X ont été acquises durant la campagne SMAPVEX16-MB par les satellites Radarsat-2 et TerraSAR-X, respectivement. Les données optiques proviennent des images de Sentinelle-2.

Le suivi de la croissance des cultures de blé, de canola, de maïs et de soja sur une base temporelle a permis de remarquer l'inefficacité de la bande L à évaluer la croissance des plantes. Le coefficient de rétrodiffusion dans cette bande est contrôlé par les paramètres de surface et particulièrement l'humidité du sol plutôt que la biomasse végétale. Les indices de végétation radar

en bandes C et X ont présenté de bons résultats qui traduisent l'évolution de la quantité de la biomasse végétale disponible; la bande X étant toutefois beaucoup mieux corrélée à la biomasse végétale. Pour le blé, la quantité de biomasse végétale est mieux corrélée à l'IVRD<sub>vv</sub> en bande X ( $R = 0,9$ ) que le NDVI ( $R = 0,7$ ). De même, pour la culture de canola, la quantité de la biomasse disponible est légèrement mieux corrélée à l'IVRD<sub>vv</sub> en bande X ( $R = 0,96$ ) qu'au NDVI ( $R = 0,9$ ). D'autre part, le RVI et l'IVRD<sub>vv</sub> en bande C pour les cultures de maïs et de soja a montré des fortes corrélations avec le NDVI ( $R = 0,9$ ). Ces résultats montrent que dans un contexte de suivi de la croissance des végétaux, les indices de végétation radar en bande C et X sont une alternative à l'indice de végétation par différence normalisée utilisé en télédétection optique.

*Mots clés: surveillance des cultures, indices de végétation, optique, radar bandes L, C et X.*

## **Remerciements**

Qu'il me soit permis au terme de ce travail de remercier ceux dont son succès se refuse de se départir tant qu'il en demeure le fruit :

Je voudrais tout d'abord adresser mes sincères remerciements à ma directrice, la professeure Ramata Magagi pour ses conseils, ses orientations pertinentes, sa rigueur de travail et son souci de transmettre son savoir qui ont été d'une importance capitale à la réalisation de ce travail.

Je tiens aussi à remercier Dr. Hongquan Wang, pour sa précieuse collaboration, son encadrement durant mon stage et l'accompagnement dans la réalisation de ce travail.

En fin, je remercie mes parents dont le soutien a conduit ce travail à bon port.

## Table des matières

Résumé .....	I
Remerciements .....	III
Table des matières .....	IV
Liste des figures .....	VI
Liste des tableaux .....	X
<b>1.Introduction .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Mise en contexte et Problématique .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Objectifs.....</b>	<b>3</b>
<b>2.Cadre théorique.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Télédétection optique et végétation.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1.1. Propriété spectrale de la végétation .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1.2. Influence du milieu .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1.3. Quelques indices de végétation usuels en télédétection optique .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2. Télédétection radar et surveillance de la végétation .....</b>	<b>10</b>
<b>2.2.1. Rétrodiffusion d'un couvert végétal.....</b>	<b>10</b>
<b>2.2.2. Influence des paramètres du capteur sur la rétrodiffusion .....</b>	<b>11</b>
<b>2.2.3. Influences des paramètres de surface sur la rétrodiffusion.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.4. Indices de végétation en télédétection radar .....</b>	<b>16</b>
<b>3. Cadre expérimental.....</b>	<b>17</b>
<b>3.1. Présentation des sites d'étude .....</b>	<b>17</b>
<b>3.2. Données.....</b>	<b>19</b>
<b>3.2.1. Données radar en Bande L .....</b>	<b>19</b>
<b>3.2.2. Données en Bande C .....</b>	<b>20</b>
<b>3.2.3. Données radar en Bande X.....</b>	<b>20</b>
<b>3.2.4. Données optiques .....</b>	<b>21</b>
<b>3.2.5. Données prélevées in situ .....</b>	<b>22</b>
<b>3.3. Démarche méthodologique.....</b>	<b>22</b>
<b>3.3.1. Prétraitement des images radar et optique .....</b>	<b>23</b>
<b>3.3.2. Extraction des coefficients de rétrodiffusion et calcul des indices de végétation radar ...</b>	<b>24</b>
<b>3.3.3. Calcul du NDVI .....</b>	<b>24</b>
<b>3.3.4. Détermination de la quantité de la biomasse sèche.....</b>	<b>24</b>
<b>3.3.5. Suivi de la croissance des cultures.....</b>	<b>25</b>
<b>4.Présentation et interprétation des résultats.....</b>	<b>25</b>

<b>4.1. Suivi de la croissance des cultures avec les données radar en bandes L, C et X.....</b>	<b>25</b>
<b>4.1.1. Résultat du RVI et d l'IVRD<sub>vv</sub> en bande L .....</b>	<b>25</b>
<b>4.1.2. Résultats du RVI et de l'IVRD<sub>vv</sub> en bande C.....</b>	<b>33</b>
<b>4.1.3. Résultats de l'IVRD<sub>vv</sub> en bande X.....</b>	<b>42</b>
<b>4.2. Comparaison des indices de végétation .....</b>	<b>43</b>
<b>4.2.1. Relation entre la quantité de biomasse sèche et les indices de végétation radar en bande C et X, et le NDVI .....</b>	<b>44</b>
<b>4.2.2. Relation entre le RVI, l'IVRD<sub>vv</sub> et le NDVI.....</b>	<b>47</b>
<b>5. Conclusion .....</b>	<b>50</b>
<b>6. Références .....</b>	<b>51</b>

## Liste des figures

Figure 1 : Spectre de réflectance et de transmittance d'une feuille fraîche de trèfle des prés (Jacquemoud et al., 2009). .....	4
Figure 2: Réflectance de la végétation dans les bandes spectrales entre 0.4 et 2.4 $\mu\text{m}$ . Source : GSP216 Introduction to remote sensing. ....	5
Figure 3: Réflectance des feuilles sèche, malade et verte (Girard et Girard,1999).....	6
Figure 4 : Évolution de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) en fonction de l'augmentation de la quantité de la biomasse végétale mesurée par l'indice foliaire (LAI) pour la culture de maïs. (Gitelson,2004). ....	9
Figure 5 : Principaux mécanismes de rétrodiffusion du signal radar en milieu agricole. 1. Diffusion de volume $\sigma^{\circ}\text{vol}$ (Végétation), 2. Diffusion du surface $\sigma^{\circ}\text{sol}$ (sol), 3. Diffusion de double réflexion $\sigma^{\circ}\text{inter}$ (végétation-sol, réflexion en coin). ....	10
Figure 6 : Suivi temporel dans trois fréquences (bandes L, C et X) et deux polarisations (HH et VV) de l'évolution de la croissance de la betterave sucrière. Angles d'incidence compris entre 25° et 50°. (Capodici et al.,2017). ....	12
Figure 7 : Comportement général du coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence (Ulaby et Dobson, 1989).....	13
Figure 8 : Mesures du coefficient de rétrodiffusion de la luzerne pour deux hauteurs de croissances (Ulaby et al., 1986).....	13
Figure 9 : Variation du coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'humidité d'un sol nu et d'un sol couvert de végétation. (Ulaby et al., 1986). ....	15
Figure 10 : variation du coefficient de rétrodiffusion pour des surfaces à rugosité différente en fonction de l'angle d'incidence. ( <a href="http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/tutorials/">http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/tutorials/</a> ).....	15
Figure 11 : Variation du coefficient de rétrodiffusion $\sigma^{\circ}$ en fonction de l'indice foliaire (LAI). Lin et al., 2009.....	16
Figure 12 : Localisation des deux sites expérimentaux des campagne SMAPVEX12 et SMAPVEX16-MB. ....	18
Figure 13 : Diagramme méthodologique des étapes principales.....	23

Figure 14.1b : Profils temporels de l'indice de végétation radar à double polarisation (IVRD <sub>vv</sub> ) en Bande L et de l'humidité moyenne du sol pour 4 champs agricoles de Canola. Angle d'incidence compris entre 35° et 45°.	26
Figure 14.2a : Profils temporels de l'indice de végétation radar (RVI) en Bande L et de l'humidité moyenne du sol pour 4 champs agricoles de Maïs. Angle d'incidence compris entre 35° et 45°.	27
Figure 14.2b : Profils temporels de l'indice de végétation radar à double polarisation (IVRD <sub>vv</sub> ) en Bande L et de l'humidité moyenne du sol pour 4 champs agricoles de Maïs. Angle d'incidence compris entre 35° et 45°.	27
Figure 14.3a : Profils temporels de l'indice de végétation radar (RVI) en Bande L et de l'humidité moyenne du sol pour 4 champs agricoles de Soja. Angle d'incidence compris entre 35° et 45°.	28
Figure 14.3b : Profils temporels de l'indice de végétation radar à double polarisation (IVRD <sub>vv</sub> ) en Bande L et de l'humidité moyenne du sol pour 4 champs agricoles de Soja. Angle d'incidence compris entre 35° et 45°.	28
Figure 14.4a : Profils temporels de l'indice de végétation radar (RVI) en Bande L et de l'humidité moyenne du sol pour 4 champs agricoles de Blé. Angle d'incidence compris entre 35° et 45°.	29
Figure 14.4b : Profils temporels de l'indice de végétation radar à double polarisation (IVRD <sub>vv</sub> ) en Bande L et de l'humidité moyenne du sol pour 4 champs agricoles de Blé. Angle d'incidence compris entre 35° et 45°.	29
Figure 15 : Histogrammes des précipitations journalières enregistrées par la station Agrotek Carman de Weather Farmer.	30
Figure 16 : Corrélation entre le RVI et IVRD <sub>vv</sub> en bande L (angle d'incidence compris entre 35° et 45°) et le LAI pour les cultures de canola (a, b), de blé (c, d), de maïs (e, f) et de soja (g,h).	32
Figure 17.1a : Profils temporels du RVI en bande C pour des champs de Canola observés aux angles d'incidence compris entre 20°-30°.	34
Figure 17.1b : Profils temporels de l'IVRD <sub>vv</sub> en bande C pour des champs de Canola observés aux angles d'incidence compris entre 20°-30°.	34
Figure 17.2a : Profils temporels du RVI en bande C pour des champs de Canola observés aux angles d'incidence compris entre 31°-40°.	35
Figure 17.2b : Profils temporels de l'IVRD <sub>vv</sub> en bande C pour des champs de Canola observés aux angles d'incidence compris entre 31°-40°.	35



Figure 18.1a : Profils temporels du RVI en bande C pour des champs de maïs observés aux angles d'incidence compris entre 20°-30°.....	36
Figure 18.1b : Profils temporels de l'IVRD <sub>vv</sub> en bande C pour des champs de maïs observés aux angles d'incidence compris entre 20°-30°.....	36
Figure 18.2a : Profils temporels du RVI en bande C pour des champs de maïs observés aux angles d'incidence compris entre 31°-40°.....	37
Figure 18.2b : Profils temporels de l'IVRD <sub>vv</sub> en bande C pour des champs de maïs observés aux angles d'incidence compris entre 31°-40°.....	37
Figure 19.1a : Profils temporels du RVI en bande C pour des champs de soja observés aux angles d'incidence compris entre 20°-30°.....	38
Figure 19.1b: Profils temporels de l'IVRD <sub>vv</sub> en bande C pour des champs de soja observés aux angles d'incidence compris entre 20°-30°.....	38
Figure 19.2a : Profils temporels du RVI en bande C pour des champs de soja observés aux angles d'incidence compris entre 31°-40°.....	39
Figure 19.2b : Profils temporels de l'IVRD <sub>vv</sub> en bande C pour des champs de soja observés aux angles d'incidence compris entre 31°-40°.....	39
Figure 20.1a : Profils temporels du RVI en bande C pour des champs de blé observés aux angles d'incidence compris entre 20°-30°.....	40
Figure 20.1b : Profils temporels de l'IVRD <sub>vv</sub> en bande C pour des champs de blé observés aux angles d'incidence compris entre 20°-30°.....	40
Figure 20.2a : Profils temporels du RVI en bande C pour des champs de blé observés aux angles d'incidence compris entre 31°-40°.....	41
Figure 20.2b : Profils temporels de l'IVRD <sub>vv</sub> en bande C pour des champs de blé observés aux angles d'incidence compris entre 31°-40°.....	41
Figure 21: Profils temporels de l'IVRD <sub>vv</sub> en bande X pour des champs de canola.....	42
Figure 22: Profils temporels de l'IVRD <sub>vv</sub> en bande X pour des champs de blé.....	43
Figure 23: Corrélations entre la quantité de biomasse végétale et le RVI en bande C (a), l'IVRD <sub>vv</sub> en bande C (b), l'IVRD <sub>vv</sub> en bande X (c) et le NDVI (d) pour la culture de canola. Angle d'incidence compris entre 20°-40° en bande C et entre 41,7°- 42,9° en bande X.....	45

Figure 24: Corrélations entre la quantité de biomasse végétale et le RVI en bande C (a), l'IVRD <sub>vv</sub> en bande C (b), l'IVRD <sub>vv</sub> en bande X (c) et le NDVI (d) pour la culture de blé. Angle d'incidence compris entre 20°-40° en bande C et entre 41,7°-42,9° en bande X. ....	46
Figure 25: Corrélations entre la quantité de biomasse végétale et le RVI en bande C (a), l'IVRD <sub>vv</sub> en bande C (b) et le NDVI (c) pour la culture de maïs. Angle d'incidence compris entre 20°-40°. ....	46
Figure 26: Corrélations entre la quantité de biomasse végétale et le RVI en bande C (a), l'IVRD <sub>vv</sub> en bande C (b) et le NDVI (c) pour la culture de soja. Angle d'incidence compris entre 20°-40°. ....	47
Figure 27 : Corrélations entre le RVI en bande C, l'IVRD <sub>vv</sub> en bandes C et X, et le NDVI pour les cultures de canola (a), (b) et (c) et de blé (d), (e) et (f). Angle d'incidence compris entre 20°-40° en bande C et entre 41,7°-42,9° en bande X. ....	48
Figure 28: Corrélations entre le RVI et l'IVRD <sub>vv</sub> en bande C et le NDVI pour les cultures de soja (a) et (b) et de maïs (c) et (d). Angle d'incidence compris entre 20°-40° .....	49

**Liste des tableaux**

Tableau 1: Nomenclature lettrée des fréquences et des longueurs d'onde correspondantes en micro-ondes. Traduit de Jones et Vaughan, 2010. ....	11
Tableau 2: Caractéristiques de l'UAVSAR. ....	19
Tableau 3: Caractéristiques de Radarsat-2.....	20
Tableau 4: Caractéristiques de TerraSAR-X .....	21
Tableau 5 : Caractéristiques de Sentinel-2 .....	21

## 1. Introduction

### 1.1. Mise en contexte et Problématique

La télédétection s'est avérée un outil précieux en agriculture (Kim *et al.*, 2014). Sa contribution est très diversifiée et importante dans la classification des types de culture, la surveillance de leur évolution, et récemment la détection des maladies des plantes (Liu *et al.*, 2019). Elle constitue aussi une source d'information géospatiale en agriculture de précision et pour d'autres besoins en lien avec la gestion de la végétation (Lillesand *et al.*, 2015). Les multiples applications de la télédétection en agriculture permettent entre autres d'observer et de suivre les différents stades phénologiques des cultures (Wang *et al.*, 2019; Bouvet *et al.*, 2009), d'évaluer leur état phytosanitaire et détecter des maladies (Yuan *et al.*, 2017; Bajwa *et al.*, 2017), d'évaluer la teneur en eau des plantes (Chen *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2012), d'estimer leur quantité de biomasse, prédire le rendement des cultures (Gaso *et al.* 2019; Yang, 2011) ainsi que le stress hydrique (Delogu *et al.*, 2018). En effet, ces applications sont facilitées par les diverses utilisations de la télédétection en agrométéorologie (Guyot et Seguin, 1988) ainsi que les possibilités d'évaluation de l'humidité du sol (Magagi *et al.*, 2013).

La télédétection utilise des capteurs qui peuvent être passifs ou actifs. Parmi les capteurs passifs nous pouvons citer ceux qui exploitent la portion visible de l'onde optique, c'est-à-dire entre 0,4 et 0,7 $\mu$ m. Ces capteurs optiques mesurent le rayonnement électromagnétique réfléchi par une surface observée. Ils ont cependant besoin d'une source d'énergie ou d'illumination pour leur fonctionnement. Les capteurs actifs se distinguent des capteurs passifs par le fait qu'ils éclairent artificiellement les cibles, puis enregistrent l'énergie que celles-ci renvoient (Bonn et Rochon, 1992). Il existe plusieurs types de capteurs actifs dont le radar qui utilise les micro-ondes, c'est-à-dire les longueurs d'onde comprises entre 1mm et 1 m, soit des fréquences variant de 0,3 à 300 GHz.

Dans un contexte de surveillance de la croissance des cultures, les avantages de la télédétection radar comparativement à la télédétection optique sont tels que la première, possédant une source d'illumination autonome permet une acquisition des mesures en tout temps de jour

comme de nuit (Huang *et al.*, 2016, Kim *et al.*, 2014). Contrairement à la télédétection optique, les études ont aussi montré qu'à basse fréquence (< 10GHz), la télédétection radar n'est pas sensible aux perturbations atmosphériques (Vaglio Laurin *et al.*, 2013), ce qui lui concède une forte pénétrabilité des couvertures nuageuses. Aussi, à basse fréquence, le signal radar peut plus ou moins pénétrer les canopées épaisses et fournir de l'information sur la quantité totale de la biomasse disponible (Jones et Vaughan, 2010). En plus, la télédétection radar a démontré une forte sensibilité aux propriétés diélectriques comme la teneur en eau des végétaux (Kim *et al.*, 2012) et du sol, ce qui lui permet d'évaluer les conditions de stress hydrique des cultures, par exemple. Les travaux de Kim *et al.*, (2014) utilisant les fréquence radar en bande L, C et X ont montré une très bonne corrélation ( $R= 0,98$ ) entre la teneur en eau des cultures de blé et l'indice de végétation radar (RVI) en bande L. Yuzugullu *et al.*, (2016) répondent à l'un des besoins de l'agriculture de précision qu'est la connaissance détaillée des paramètres physiques (morphologie) des cultures. Leur travail utilise l'onde radar en bande X pour développer un modèle probabiliste reliant le coefficient de rétrodiffusion de la couverture végétale des cultures de riz à sa structure physique. Dans le travail de Mandal *et al.*, (2019), le coefficient de rétrodiffusion de l'onde radar en bande C opérant en quatre polarisations est utilisé pour estimer le *Plant Area Index* (PAI) ainsi que la quantité de la biomasse humide des cultures de blé et de soja. La comparaison des observations de télédétection radar aux paramètres biophysiques prélevés directement sur le terrain montre des coefficients de corrélation ( $r$ ) significatifs compris entre 0,6 et 0,8.

Cependant, la télédétection optique multispectrale est largement utilisée dans plusieurs travaux relatifs au suivi de la végétation (Baig *et al.*, 2014; Zhou *et al.*, 2014). Et dans ces cas, le *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) est l'indice de végétation le plus souvent utilisé (Gao, 1996; Pettorelli, 2013) pour rendre compte de l'activité chlorophyllienne de la végétation.

Compte tenu des avantages que présente la télédétection radar, la perspective poursuivie dans ce travail consiste à évaluer l'utilisation des indices de végétation radar comme alternative à l'usage des indices de végétation optiques (NDVI, par exemple) dans un contexte de suivi de la croissance des cultures de blé, de canola, de maïs et de soja.

## 1.2. Objectifs

L'objectif principal de cet essai consiste à effectuer une analyse comparative d'indices de végétation radar à plusieurs fréquences et de l'indice de végétation optique (NDVI) dans un contexte de suivi de la croissance des cultures.

Pour y parvenir, trois objectifs spécifiques devront être atteints sur la base de quatre types de cultures, à savoir le blé, le canola, le maïs et le soja. Pour chaque type de culture, durant la même période de temps et le même site d'observation (champ agricole):

- Effectuer un suivi temporel à plusieurs fréquences radar des cultures de blé, de canola, de maïs et de soja;
- Évaluer d'une part la corrélation entre les indices de végétation radar (RVI et IVRD<sub>v</sub>) et l'indice de végétation optique NDVI, et d'autre part la corrélation entre les indices RVI, IVRD<sub>v</sub>, NDVI et la quantité de la biomasse sèche;
- Définir pour chaque type de culture l'indice de végétation radar et la fréquence les mieux appropriés pour le suivi de sa croissance.

## 2. Cadre théorique

### 2.1. Télédétection optique et végétation

#### 2.1.1. Propriété spectrale de la végétation

La réflectance spectrale des plantes est en grande partie due aux propriétés optiques de leurs feuilles (Jacquemoud et Bousquet, 2005). Dans la surveillance des plantes par télédétection optique, les propriétés physiques suivantes sont prises en compte (Figure 1): la réflectance  $\rho$ , est la fraction de rayonnement incident réfléchi; l'absorptance  $\alpha$  constitue la fraction de rayonnement incident absorbé et la transmittance  $\tau$  est la fraction de rayonnement incident transmis (Gerber, 2011). Le rayonnement électromagnétique intercepté par le capteur utilisé est une luminance dont découle la réflectance de la végétation observée (Mezonnnette et Lépine, 2003).

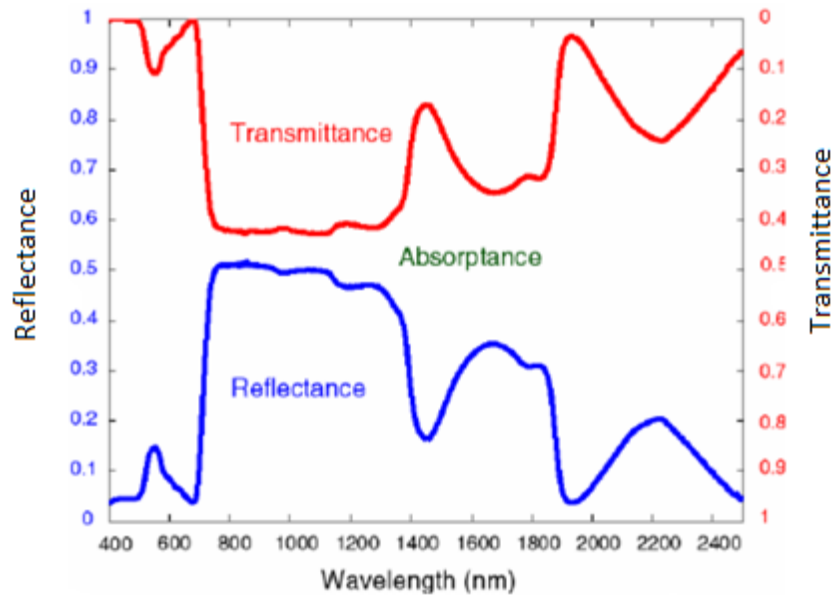


Figure 1 : Spectre de réflectance et de transmittance d'une feuille fraîche de trèfle des prés (Jacquemoud et al., 2009).

La figure 2 présente les différents comportements de la signature spectrale de la végétation dans le visible, le proche-infrarouge et l'infrarouge moyen. Il paraît clairement que les valeurs de réflectance sont généralement faibles dans la bande visible à cause du fait que l'absorption des ondes électromagnétiques par les organes végétaux chlorophylliens est importante, même si une augmentation de la réflectance est observable dans le Vert. Dans le proche infrarouge, en fonction de la structure de la végétation et de l'importance de la biomasse, la réflectance atteint ses valeurs les plus élevées. Dans l'infrarouge moyen, la réflectance de la végétation est dictée par la teneur en eau de celle-ci. Plus la teneur en eau est grande, plus la réflectance est faible.

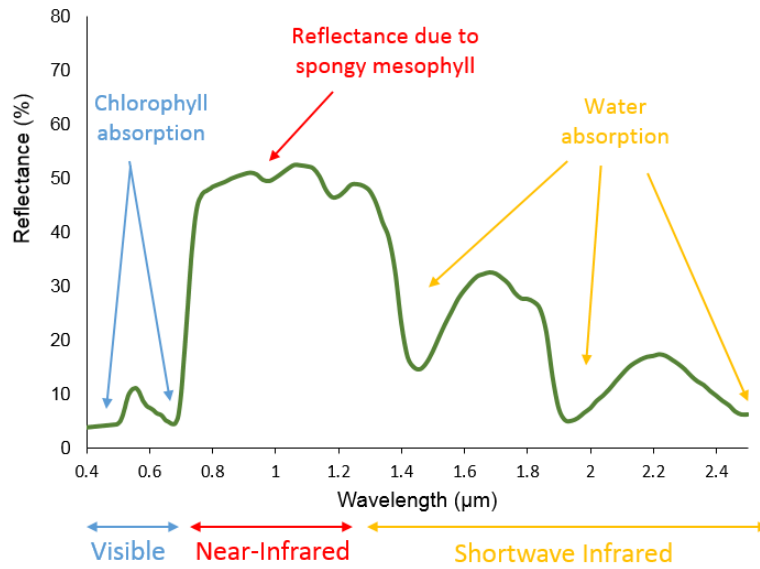


Figure 2: Réflectance de la végétation dans les bandes spectrales entre 0.4 et 2.4 µm. Source : GSP216 Introduction to remote sensing.

Les propriétés physico-chimiques des plantes sont variables dans le temps. Ces changements qui sont généralement caractérisés par la modification de la quantité de la biomasse, la variation de la teneur en eau et en chlorophylle de la plante peuvent être directement mesurables par analyse de la signature spectrale obtenue. Ces modifications sont détectées étant donné que les propriétés optiques des plantes sont associées à leur structure cellulaire, leur pigmentation, la teneur en eau ainsi que leur état physiologique (Devinau, 1990). Ainsi, les changements d'état physiologique (maturation, sénescence, etc.) de la végétation se traduisent par des changements spectraux (Figure 3). La diminution ou l'absence des pigments chlorophylliens conduit à des valeurs de réflectances plus fortes dans le visible. La diminution de la teneur en eau d'une plante, quant à elle, se traduit par une augmentation de la réflectance dans les bandes d'absorption de l'eau de l'infrarouge moyen soit à 1.47, 1.9 et 2.87 µm. De manière générale, une augmentation de la réflectance dans la bande rouge et une diminution de la réflectance dans la bande proche infrarouge permettent d'identifier un stress (Huete, 2012).



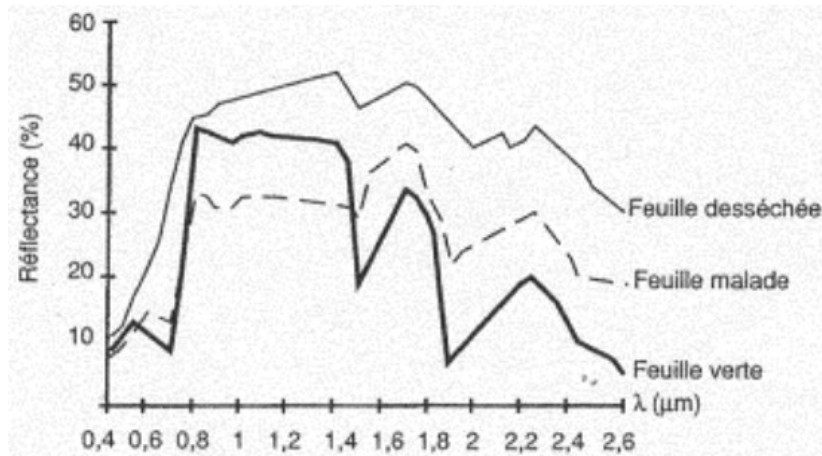


Figure 3: Réflectance des feuilles sèche, malade et verte (Girard et Girard,1999).

### 2.1.2. Influence du milieu

En plus de la contribution de la végétation, les mesures acquises par télédétection pour le suivi de la végétation introduisent des contributions issues de l'environnement et particulièrement celles du sol sous-jacent lorsque la densité de la végétation est faible. Pour un couvert végétal dense, le signal émergeant du sol est non significatif et la réflectance perçue par le capteur est essentiellement celle de la végétation (Huete *et al.*, 1985). Les contributions de l'environnement dans le signal arrivant au capteur, si elles ne sont pas corrigées afin de ne considérer que la contribution de la végétation sont susceptibles de modifier la signature spectrale recueillie et donc les informations recherchées.

### 2.1.3. Quelques indices de végétation usuels en télédétection optique

Dans le domaine optique, la télédétection de la végétation se base sur la forte absorption par les végétaux verts du rayonnement dans le Rouge, alors qu'ils réfléchissent fortement la lumière solaire dans les longueurs d'onde correspondant au Proche Infrarouge (Ecadafal et Huette, 1991). Ainsi, plusieurs indices de végétations sont basés sur le pic de réflectance de la végétation qui se produit à environ 0,7 μm, et qui est caractéristique de la végétation verte car ne se produisant pas pour plusieurs autres surfaces naturelles (Jones et Vaughan, 2010). Le

calcul mathématique de ces indices intègre le plus souvent les bandes Rouge et Proche Infrarouge.

Les recherches dans le domaine de la télédétection optique ont permis de développer plusieurs indices de végétation. Nous ne présentons que quelques indices parmi les plus couramment utilisés pour la surveillance de la croissance des végétaux.

### **Indice simple**

- *DVI (Difference Vegetation Index)*

$$DVI = PIR - R \quad (1)$$

Cet indice est basé uniquement sur la différence de réflectance dans le Proche Infrarouge (PIR) et le Rouge (R). Cet indice est très sensible aux conditions d'ensoleillement de la végétation influencées par la variation de la topographie (Tucker, 1979; Mather, 1987).

### **Indices normalisés**

- *NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)*

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R} \quad (2)$$

Le NDVI fait appel aux mêmes informations spectrales que le DVI. Il minimise l'effet de la topographie et offre l'avantage de manipuler des valeurs comprises entre [-1,1]. Les nuages et la neige ont des valeurs de NDVI plutôt négatives (R>PIR).

Cet indice varie entre 0.1 et 0.8 pour les pixels couverts de végétation faible à élevé (Lillesand et Kiefer, 1994). Le NDVI est corrélé à la densité foliaire (Figure 4). C'est l'indice le plus souvent utilisé en télédétection optique pour l'observation et la surveillance des végétaux (Pettorelli, 2013).

- *PVI (Perpendicular Vegetation Index)*

$$PVI = \sqrt{(R_{sol} - R_{vég})^2 + (PIR_{sol} - PIR_{vég})^2} \quad (3)$$

Cet indice tient compte des réflectances du sol et de la végétation dans les bandes Rouge et Proche Infrarouge. Selon Richardson et Wiegand (1977), le PVI est l'indice de végétation le plus efficace pour éliminer l'effet du sol pour des surfaces de faible densité foliaire. Le PVI est nul pour des pixels correspondant aux sols, sa valeur est négative pour des pixels représentant l'eau et les nuages, et positif pour des pixels correspondant à la végétation.

- *SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index)*

$$SAVI = \frac{(1+L)(PIR-R)}{PIR+R+L} \quad (4)$$

Aux valeurs des réflectances dans les bandes Rouge et Proche Infrarouge, cet indice ajoute une constante L variant en fonction de la densité foliaire. La valeur 0.5 est généralement attribuée à L pour diminuer la contribution de la réflectance du sol tout en minimisant les effets des différents types des sols. Le SAVI varie entre [-1,1]; plus sa valeur est faible plus la couverture végétale est faible à la surface observée, et inversement.

- *SARVI (Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index)*

$$SARVI = \frac{(1+L')(PIR-RB)}{PIR+RB+L'} \quad (5)$$

En télédétection optique, l'indice de végétation SARVI est classé parmi les indices résistants aux influences atmosphériques. Tout comme L (Éq. 4), L' est un facteur d'ajustement qui tient compte de l'influence du sol (Mannschatz *et al.*, 2014). Le SARVI intègre une combinaison notée RB exprimée en fonction des réflectances dans les canaux Bleu (B) et Rouge (R).  $RB = R - \beta(R-B)$ . Où  $\beta$  est une constante normalement de valeur égale à 1 mais pouvant varier en fonction du type d'aérosol dans l'atmosphère; par exemple  $\beta = 0,5$  pour la poussière du Sahel.

- *EVI (Enhanced Vegetation Index)*

$$EVI = \frac{2.5(PIR-R)}{1+PIR+6R-7.5B} \quad (6)$$

Cet indice est basé sur l'indice SARVI. Le EVI est sensible à la variation de la structure de la canopée, son type, son architecture et aussi la densité foliaire. Les valeurs de EVI varient entre -1 et 1; pour la végétation saine, les valeurs varient généralement entre 0,2 et 0,8 correspondant à une végétation faible et élevée, respectivement.

Les indices de végétation développés en télédétection optique ne peuvent fournir que des informations relatives à la surface de la canopée. Ils connaissent des limites à fournir directement les informations sur la teneur en eau des cultures. Le NDVI et l'indice de surface foliaire (LAI) par exemple, sont corrélés à la quantité de la biomasse végétale jusqu'à une certaine limite. En effet, ces indices de végétation saturent à partir d'une certaine quantité de la biomasse. La figure 4 montre la saturation du NDVI pendant que le LAI continue de croître, indiquant l'augmentation de la quantité de la biomasse. Le NDVI sature généralement à partir des valeurs de LAI autour de 2 alors que les cultures présentent des valeurs de LAI généralement comprises entre 4 et 6 lorsqu'elles sont totalement développées.

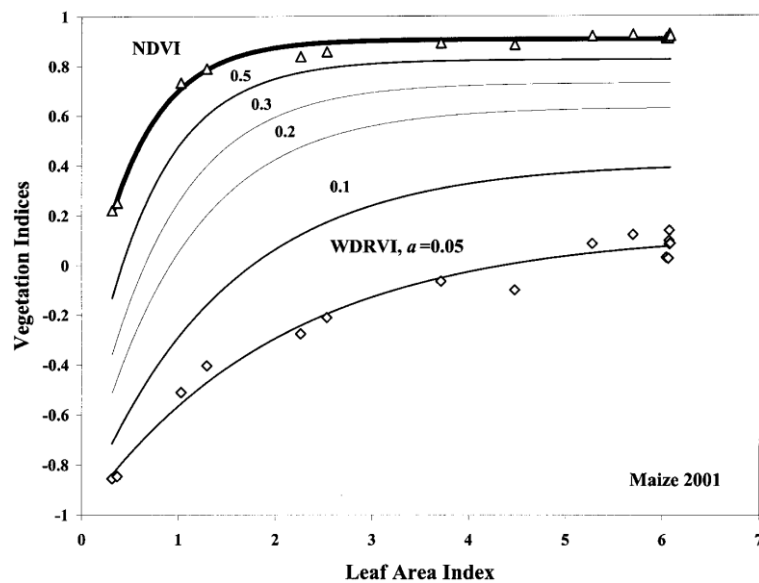


Figure 4 : Évolution de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) en fonction de l'augmentation de la quantité de la biomasse végétale mesurée par l'indice foliaire (LAI) pour la culture de maïs. (Gitelson, 2004).

La télédétection radar vient combler certaines de ces limites étant donné la possibilité de travailler avec plusieurs configurations de données (multitemporelles, multifréquence, multipolarisations, multiangulaires). Avec une fréquence, un angle d'incidence et, une

polarisation adéquats, le signal radar peut mieux interagir avec la canopée et fournir des informations volumétriques de la végétation. La faible influence de l'atmosphère et des nuages pour les basses fréquences, est un avantage pour un suivi multitemporel de la croissance des végétaux.

## 2.2. Télédétection radar et surveillance de la végétation

### 2.2.1. Rétrodiffusion d'un couvert végétal

Le signal radar qui arrive sur une cible (un champ agricole par exemple), interagit avec celle-ci puis retourne vers le capteur qui mesure un signal rétrodiffusé appelé coefficient de rétrodiffusion ( $\sigma^\circ$ ). Ce signal rétrodiffusé contient des informations sur les caractéristiques de la cible et de l'environnement dont il provient. Il est composé de trois contributions (figure 5) :

- le terme de volume : c'est la contribution correspondant à l'interaction de l'onde radar avec la biomasse végétale (branche, feuilles, tronc);
- le terme de surface : il s'agit de la rétrodiffusion provenant de l'interaction de l'onde radar et le sol;
- le terme d'interaction : il s'agit d'une double réflexion de l'onde résultant des interactions entre le sol et la structure verticale de la végétation (troncs)

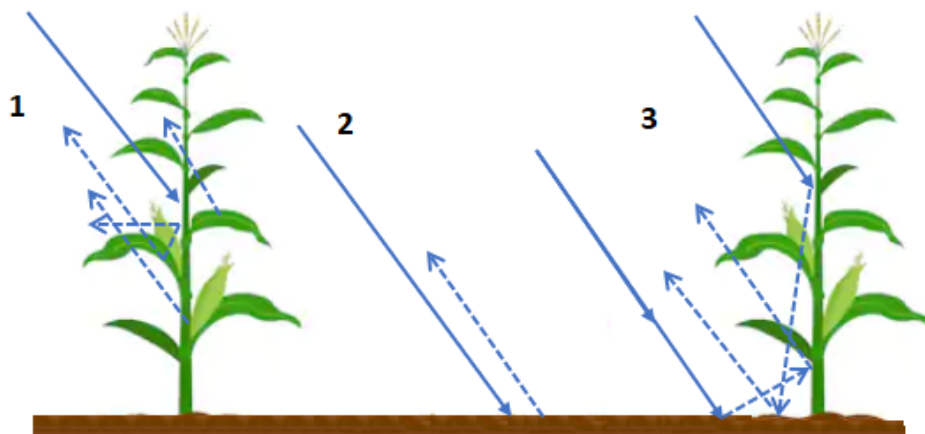


Figure 5 : Principaux mécanismes de rétrodiffusion du signal radar en milieu agricole. 1. Diffusion de volume  $\sigma^\circ_{vol}$  (Végétation), 2. Diffusion de surface  $\sigma^\circ_{sol}$  (sol), 3. Diffusion de double réflexion  $\sigma^\circ_{inter}$  (végétation-sol, réflexion en coin).

La contribution de chacun des termes dépend de la fréquence, la polarisation, l'angle d'incidence du capteur, des caractéristiques géométriques du sol (rugosité du sol) et de la végétation (tailles des éléments, architecture, densité) ainsi que leurs propriétés diélectriques, c'est-à-dire leur teneur en eau (Castel *et al.*, 1999). Lorsque l'observation se fait à des angles d'incidence élevés et à des fréquences élevées, la contribution du terme de volume est prépondérante dans le signal rétrodiffusé.

## 2.2.2. Influence des paramètres du capteur sur la rétrodiffusion

### Fréquence et longueur de l'onde radar

La télédétection radar opère à plusieurs fréquences et donc plusieurs longueurs d'ondes. La fréquence ( $f$ ) est inversement proportionnée à la longueur d'onde ( $\lambda$ ); tel que :  $f=c/\lambda$  avec  $c = 3.10^8$  m/s, la vitesse de la lumière dans le vide. En télédétection micro-ondes, les longueurs d'onde généralement utilisées varient entre 4 mm et 1 m (Jones et Vaughan, 2010). Le tableau 1 présente la nomenclature lettrée des fréquences et des longueurs d'onde correspondantes.

*Tableau 1: Nomenclature lettrée des fréquences et des longueurs d'onde correspondantes en micro-ondes. Traduit de Jones et Vaughan, 2010.*

Bande	Fréquence (GHz)	Longueur d'onde
Bande P	0.3-1	30-100 cm
Bande L	1-2	15-30 cm
Bande S	2-4	7.5-15 cm
Bande C	4-8	3.75-7.5 cm
Bande X	8-12.5	2.5-3.75 cm
Bande Ku	12.5-18	1.7-2.5 cm
Bande Q	35-70	4-8 mm
TéraHertz (THz)	100-300 (0.1-3 THz)	0.1-3 mm

Les longueurs d'onde plus élevées ont la facilité de traverser les canopées même épaisses et atteindre le sol sous-jacent tandis que les micro-ondes à fréquences élevées, c'est-à-dire à faibles longueurs d'onde interagissent avec la première couche de la canopée et saturent rapidement en présence d'une végétation abondante. Le travail de Capodici *et al.*, (2017) a montré la sensibilité d'une onde radar aux paramètres d'un milieu agricole observé à plusieurs fréquences (Figure 6). On remarque que pour un même instant d'observation, c'est-à-dire une

même quantité de la biomasse végétale, la valeur du coefficient de rétrodiffusion mesurée par le capteur est différente selon que l'onde radar est émise à une faible ou grande fréquence. De plus la dynamique temporelle des signaux est différente dans les 3 fréquences (L, C et X). En avril et mai, le signal en bande L est plus faible que ceux en bandes C et X. Au fur et à mesure que la végétation augmente, il croît plus rapidement que les signaux en bandes C et X jusqu'à réduire l'écart existant avec les bandes C et X.

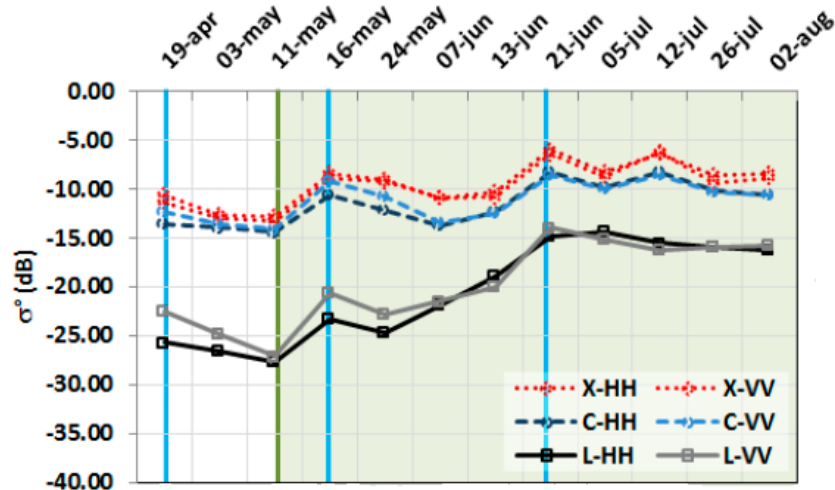


Figure 6 : Suivi temporel dans trois fréquences (bandes L, C et X) et deux polarisations (HH et VV) de l'évolution de la croissance de la betterave sucrière. Angles d'incidence compris entre 25° et 50°. (Capodici et al., 2017).

### Angle d'incidence

L'angle d'incidence d'une onde radar influence le coefficient de rétrodiffusion. C'est l'angle formé entre le faisceau du signal radar émis et la normale à la surface observée. En général, le coefficient de rétrodiffusion d'une surface quelconque diminue lorsque l'angle d'incidence augmente (Figure 7). La dynamique de cette baisse dépend de la surface observée qui peut être un sol nu (rugueux ou légèrement rugueux) ou sol couvert de végétation (végétation faible ou abondante). La baisse angulaire est plus rapide pour un sol nu légèrement rugueux que pour un sol nu rugueux ou un sol couvert de végétation (Figure 8).

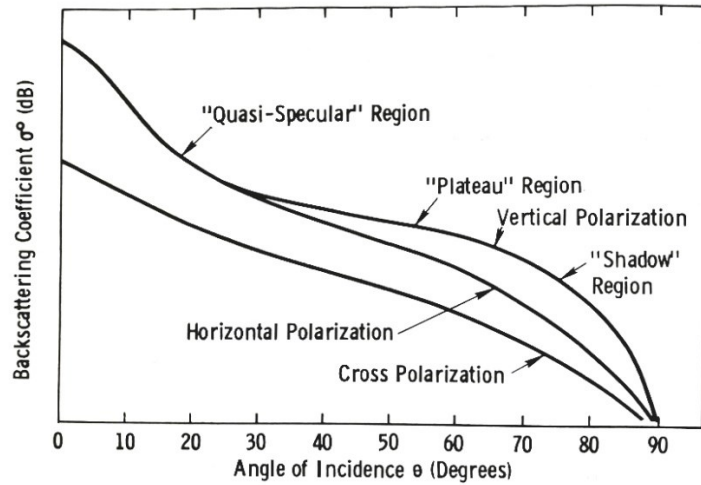


Figure 7 : Comportement général du coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence (Ulaby et Dobson, 1989).

Aussi les observations de Ulaby *et al.* (1986) ont démontré que pour des angles d'incidences faibles ( $<20^\circ$ ), le terme de surface (paramètres du sol) contrôle le signal rétrodiffusé alors que pour des angles d'incidence supérieurs à  $20^\circ$ , la contribution de la végétation est prédominante dans le signal rétrodiffusé. Et à  $20^\circ$  les contributions de ces deux termes sont égales (Figure 8).

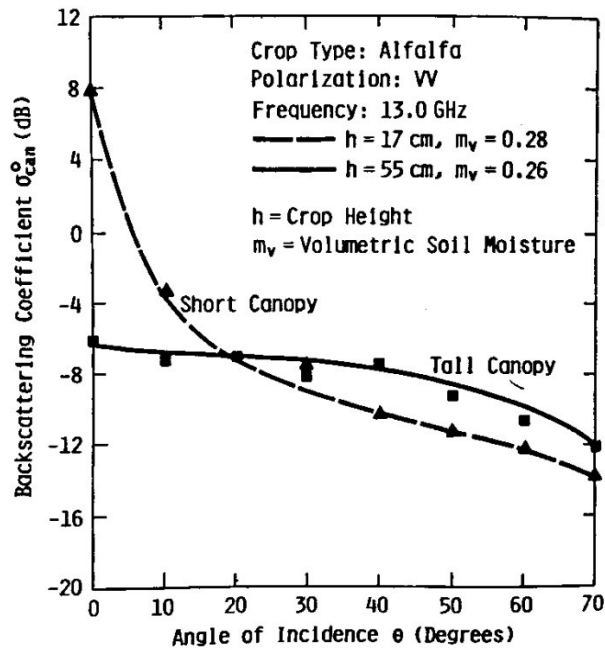


Figure 8 : Mesures du coefficient de rétrodiffusion de la luzerne pour deux hauteurs de croissances (Ulaby *et al.*, 1986).



## **Polarisation**

La polarisation est une notion liée à l'orientation du champ électromagnétique. Dans notre étude, nous nous sommes intéressés à la polarisation linéaire, c'est-à-dire la polarisation horizontale (H) ou verticale (V). Le capteur radar utilise la combinaison de ces orientations dans les deux modes de transmission et de réception du signal. De ce fait, pour un signal radar, il en résulte quatre combinaisons possibles de polarisations :

HH : transmission et réception horizontale

VV : transmission et réception verticale

HV : transmission horizontale et réception verticale

VH : transmission verticale et réception horizontale

La polarisation croisée HV est reconnue sensible à la contribution du terme de volume (Jones et Vaughan, 2010); et donc utile pour le suivi de la biomasse végétale, par exemple. La polarisation parallèle HH est plutôt sensible au terme de surface (Ulaby et Dobson, 1989). Selon Srivastava *et al.* (2015), le coefficient de rétrodiffusion en polarisation croisée HV est le mieux corrélé à la teneur en eau de la végétation que toutes les autres, tandis que le ratio HH/VV présente une très faible corrélation à la teneur en eau de la végétation.

### **2.2.3. Influences des paramètres de surface sur la rétrodiffusion**

Nous présenterons l'influence de l'humidité du sol, de la rugosité du sol, et de la végétation sur la rétrodiffusion.

#### **Humidité du sol**

Un des paramètres contrôlant le coefficient de rétrodiffusion d'un milieu est sa constante diélectrique. Il est démontré que la constante diélectrique du sol est fortement liée à son humidité (Jones et Vaughan, 2010). La figure 9 montre la variation du coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'humidité du sol à 4,5 GHz, en polarisation HH et à un angle d'incidence de 10°. Il ressort clairement que pour un sol nu observé dans cette configuration, le coefficient de rétrodiffusion est fortement corrélé à l'humidité de la couche superficielle (5 cm). Lorsque le sol est couvert de végétation, la relation entre le coefficient de rétrodiffusion

et l'humidité du sol est moins bonne, en raison de la contribution de la végétation dans l'onde rétrodiffusée.

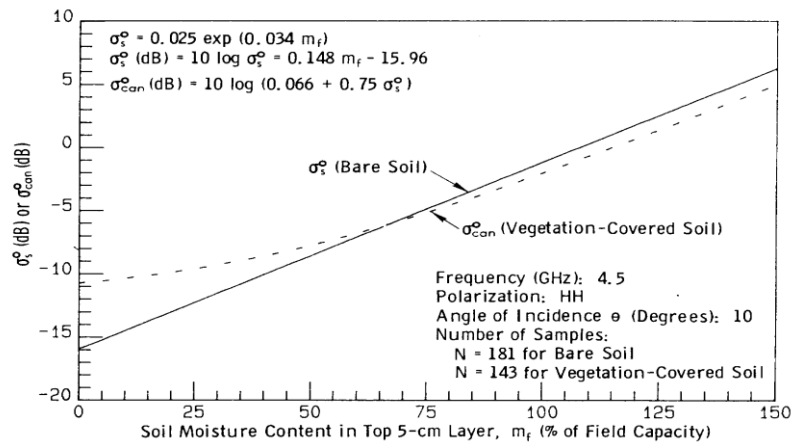


Figure 9 : Variation du coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'humidité d'un sol nu et d'un sol couvert de végétation. (Ulaby et al., 1986).

## Rugosité

Ici, nous nous intéressons à la micro-rugosité qui se définit par des aspérités par rapport à une surface de référence lisse. En milieu agricole par exemple, cette rugosité subit des modifications suite aux labours des champs ou après une forte pluie.

Pour des angles d'incidence élevés le signal rétrodiffusé d'une surface rugueuse est généralement plus grand comparativement à une surface relativement lisse (Figure 10). Et, c'est l'inverse pour des angles d'incidence faibles. Lorsqu'une surface totalement lisse, à l'exemple d'un plan d'eau calme, reçoit un signal radar à des angles d'incidence plus ou moins élevés, il se produit une réflexion spéculaire. Dans ce cas, le coefficient de rétrodiffusion est très faible, voire nulle. Ceci se traduit sur des images radar par des zones très sombres.

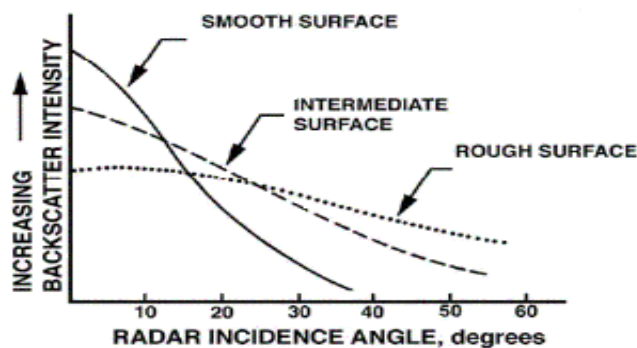


Figure 10 : variation du coefficient de rétrodiffusion pour des surfaces à rugosité différente en fonction de l'angle d'incidence. (<http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/tutorials/>)

## Couvert végétal

Tel que vu sur les figures 5, 6 et 9, le couvert végétal influence le coefficient de rétrodiffusion. Cette influence se manifeste de deux façons selon les caractéristiques du capteur et la densité de la végétation. En présence d'un couvert végétal faible, la végétation atténue la contribution issue du sol. En présence d'un couvert végétal important, la contribution du sol est faible et, la végétation affecte le signal à travers une diffusion de volume résultant de réflexions multiples au sein de la végétation. Cette rétrodiffusion de volume est susceptible d'augmenter la valeur du coefficient de rétrodiffusion. Il en découle que le type de végétation et la densité de sa biomasse qui affectent la teneur en eau de la végétation, contrôlent la rétrodiffusion. Les travaux de Lin *et al.* (2009) ont montré une corrélation positive existant entre le coefficient de rétrodiffusion et la densité foliaire de la végétation (Figure 11). L'interprétation de la corrélation présentée à la figure 11 montre que la relation est meilleure en polarisation HV qu'en polarisation HH.

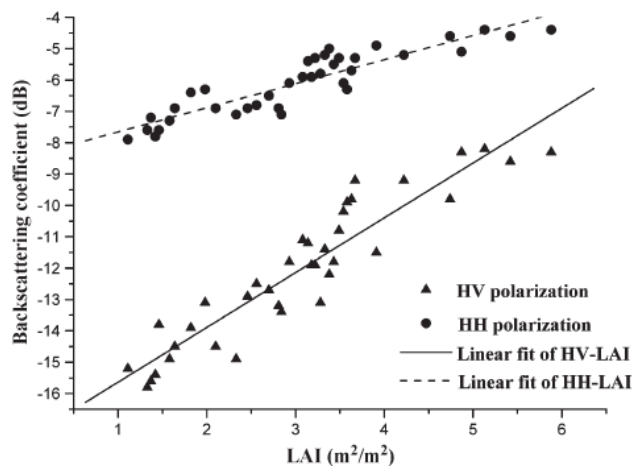


Figure 11 : Variation du coefficient de rétrodiffusion  $\sigma^{\circ}$  en fonction de l'indice foliaire (LAI).  
Lin *et al.* 2009.

### 2.2.4. Indices de végétation en télédétection radar

Plusieurs approches utilisées pour le suivi de la croissance des cultures par télédétection radar exploitent la notion de la polarisation (Srivastava *et al.*, 2015). Ainsi des indices de végétation sont calculés à partir des rapports des polarisations. Kim et Van Zyl (2004) ont proposé l'indice

*Radar Vegetation Index* (RVI), efficace pour évaluer la biomasse végétale. Il est exprimé suivant le rapport:

$$RVI = \frac{8\sigma^{\circ}HV}{\sigma^{\circ}HH + \sigma^{\circ}VV + 2\sigma^{\circ}HV} \quad (7)$$

La valeur de RVI est comprise entre 0 et 4/3 (Lee, 2009). L'utilisation de cet indice exige absolument d'avoir les données dans les trois polarisations linéaires HH, VV et HV.

Charbonneau *et al.* (2005) ont utilisé deux indices de végétation radar permettant d'évaluer le couvert végétal à partir de deux polarisations (HV et HH ou HV et VV), soit  $IVRD_{HH}$  (Indice de Végétation Radar en Double polarisation HH) et  $IVRD_{VV}$  (Indice de Végétation Radar en Double polarisation VV). Le rapport donne des valeurs d' $IVRD_{HH}$  et  $IVRD_{VV}$  généralement inférieures à 0.35. Ces indices sont calculés selon les rapports suivants :

$$IVRD_{HH} = \frac{\sigma^{\circ}HV}{\sigma^{\circ}HH + \sigma^{\circ}HV} \quad (8a)$$

$$IVRD_{VV} = \frac{\sigma^{\circ}VH}{\sigma^{\circ}VV + \sigma^{\circ}VH} \quad (8b)$$

### 3. Cadre expérimental

#### 3.1. Présentation des sites d'étude

Le présent travail s'effectue sur deux sites d'étude situés au Sud du Manitoba. Ils représentent les sites de deux campagnes de terrain *SMAP Validation Experiment 2012* (SMAPVEX12) et *SMAP Validation Experiment 2016 in Manitoba* (MAPVEX16-MB). Le site expérimental de la campagne SMAPVEX12 est centré sur la ville de Elm Creek de coordonnées 98° 0'23"W, 49° 40' 48"N (Figure12). Il couvre 12.8 km de largeur et 70 km de longueur. La zone d'étude de la campagne SMAPVEX16-MB est décalée au Sud-Est de celle de SMAPVEX12, elle s'étend approximativement sur 26 km de largeur et 48 km de longueur (Figure12). Les deux zones d'étude circonscrivent des champs agricoles dont les cultures majoritaires sont le blé, le canola, le maïs et le soja.

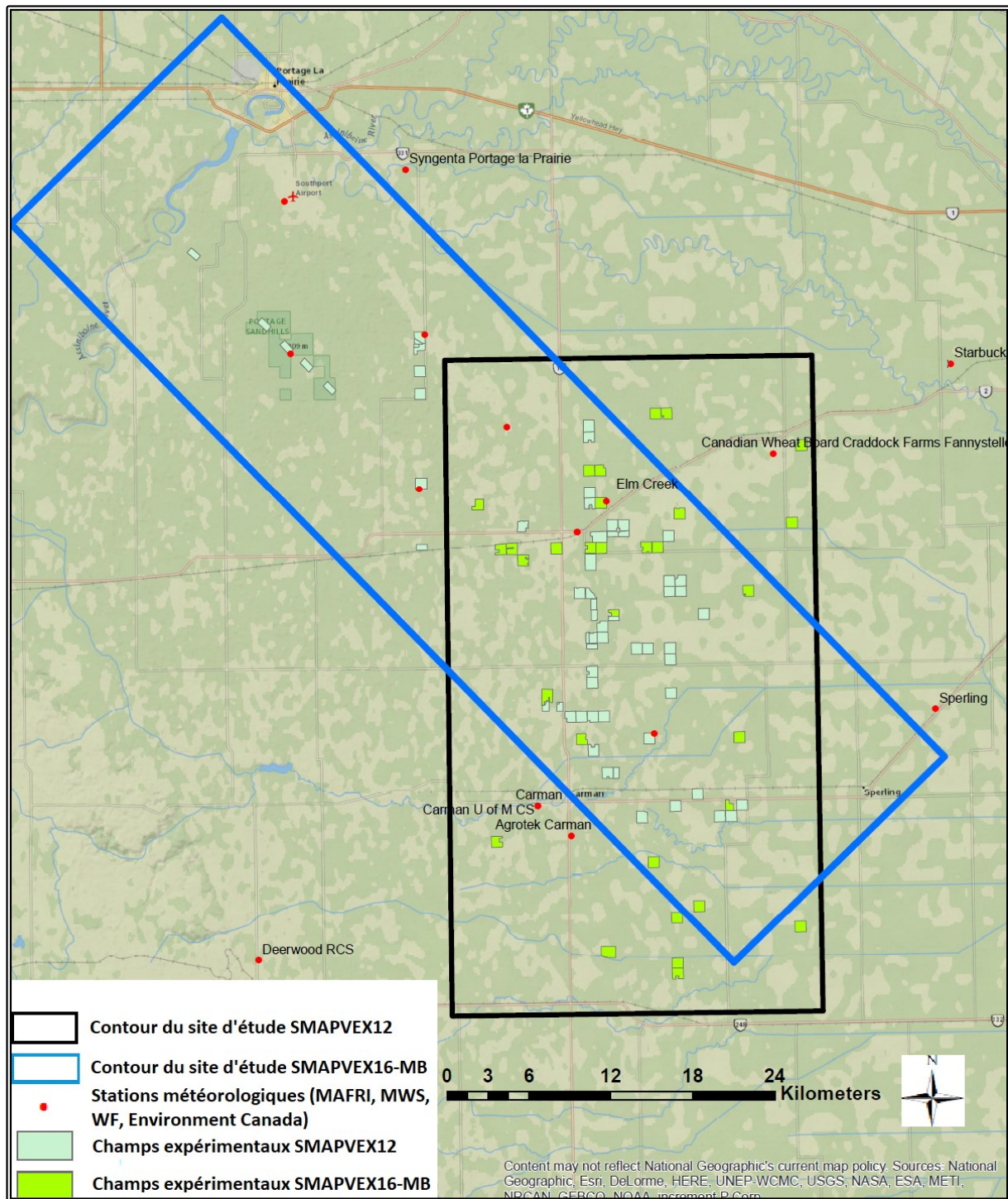


Figure 12 : Localisation des deux sites expérimentaux des campagnes SMAPVEX12 et SMAPVEX16-MB.

### 3.2. Données

Durant les deux campagnes SMAPVEX12 et SMAPVEX16-MB, des données terrain des caractéristiques du sol (humidité et rugosité) et de la végétation (biomasse, hauteur des cultures, LAI etc.) ainsi que des données radar multifréquences et des données optiques ont été acquises. Les données radar sont composées de données aéroportées en bande L et de données satellitaires en bandes C (Radarsat-2) et X (TerraSAR-X). Les données optiques sont acquises par le satellite Sentinel-2.

La collecte des données d'humidité du sol sur le terrain a eu lieu dans la mesure du possible, presque simultanément avec les vols aéroportés ou le passage de Radarsat-2 et TerraSAR-X sur les sites d'étude. Les images satellitaires disponibles ont été acquises avant, pendant et après les deux campagnes de terrain.

#### 3.2.1. Données radar en Bande L

Il s'agit de douze images aéroportées prises à l'aide d'un *Uninhabited Aerial Vehicle Synthetic Aperture Radar* (UAVSAR) durant la campagne SMAPVEX12 entre le 17 juin et le 17 juillet 2012. Les polarisations disponibles sont HH, VV, HV, VH. La résolution spatiale du capteur est de 3m (Tableau 2). Les données UAVSAR collectées durant SMAPVEX16-MB, ne sont pas exploitables en raison de problèmes de calibration.

Tableau 2: Caractéristiques de l'UAVSAR.

Type d'appareil	UAVSAR
Propriété	NASA/JPL/Dryden (USA)
Plateforme	Gulfstream III; altitude maximale de vol :13 km
Fréquence	Bande-L 1,26 GHz
Polarisations	HH, HV, VH, VV
Résolution spatiale	3 m, vision multiple (6)
Angle d'incidence	25°-65°

### 3.2.2. Données en Bande C

En raison du nombre réduit de données radar en bande C acquises en 2012, seules les données radar en bande C de 2016 sont utilisées dans cette étude. Il s'agit de 31 images radar en bande C prises entre le 28 avril et le 27 août 2016 par le satellite Radarsat-2 en modes ascendant et descendant. Quatre polarisations sont disponibles, HH, VV, VH et HV aux angles d'incidence compris entre environ 20° et 40°. La fréquence utilisée est de 5,4 GHz. Le satellite passe sur la zone d'étude aux environs de 19h10 en mode ascendant (ASC) et vers 07h50 le matin en mode descendant (DESC). Les paramètres d'acquisition de Radarsat-2 sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 3: Caractéristiques de Radarsat-2.

<b>Résolution spatiale</b>	3 – 100 m
<b>Altitude</b>	798 km
<b>Inclinaison</b>	98,6°
<b>Passage au nœud descendant</b>	6 h
<b>Passage au nœud ascendant</b>	18 h
<b>Fréquence centrale</b>	5,405 GHz Bande-C
<b>Polarisations</b>	HH, VV, HV, VH

### 3.2.3. Données radar en Bande X

En 2012, les dates d'acquisition de données radar en Bande X ne couvrent pas toute la période d'étude. Comme des trous significatifs sont observés entre les acquisitions, les données en bande X de 2012 ne sont pas considérées dans cette étude. Nous utilisons dans ce travail huit images en bande X prises par le satellite TerraSAR-X. en mode ascendant (passage sur le site aux alentours de 19h20 heures locales), entre mai et août 2016. Le mode descendant n'est pas utilisé par souci de conserver les dates proches des jours de prélèvement des données de terrain. Le tableau 4 présente les caractéristiques du capteur utilisé. Toutes les images utilisées sont

prises à un angle d’incidence variant entre 41,7°-42,9°. Ces images couvrent une très grande partie du site d’étude à l’exception des champs de maïs.

*Tableau 4: Caractéristiques de TerraSAR-X*

Satellite	TerraSAR-X
<b>Fréquence</b>	9,65 GHz
<b>Résolution spatiale</b>	1-16 m
<b>Résolution temporelle</b>	11 jours
<b>Polarisation</b>	Une polarisation : HH ou VV, HV ou VH Double polarisation : HH/VV ou VV/VH

### 3.2.4. Données optiques

Les données optiques correspondent à six images du satellite Sentinel-2 prises du 10 juin au 02 août 2016 (tableau 5). Les bandes Rouge et Proche Infrarouge ont été sélectionnées pour permettre le calcul des indices de végétation. Les images sont choisies sur la base d’une couverture nuageuse la plus faible possible (inférieure à 4%). Le tableau 5 présente les caractéristiques des images utilisées.

*Tableau 5 : Caractéristiques de Sentinel-2*

Satellite	Sentinel-2A et Sentinel-2B
<b>Altitude</b>	786 km
<b>Instruments</b>	MSI, imageur multispectral
<b>Résolution temporelle</b>	5 jours (Sentinel-2A et Sentinel-2B)
<b>Résolution spatiale</b>	10-60 m
<b>Nombre de bandes spectrales</b>	13 (visible au moyen Infrarouge)
<b>Fauchée</b>	290 km



### 3.2.5. Données prélevées in situ

Pour les deux campagnes, les données prélevées sur le terrain comportent des informations sur la biomasse végétale. Les données disponibles et d'intérêt pour ce présent travail sont :

- Données des cultures

Pour chaque type de culture les informations suivantes ont été recueillies : hauteur des plantes, leur densité, quantité de biomasse sèche pour chaque champ et indice de surface foliaire (LAI).

- Données du sol

Pour chaque champ, l'humidité du sol a été prélevée, la température du sol ainsi que sa rugosité. Les données d'humidité du sol ont été collectées approximativement aux heures coïncidant avec le passage du satellite ou des vols aéroportés (UAVSAR).

- Données météorologiques

Pour la campagne SMAPVEX12, les stations météorologiques de MAFRI (*Manitoba agriculture, food and rural initiatives*), de MWS (*Manitoba water stewardship*), de WF (*WeatherFarm*) et de *Environment Canada* fournissent des données de pluviométrie. Pour la campagne SMAPVEX16, les données de pluviométrie sont fournies par les stations météorologiques de Carman et de Elm Creek.

### 3.3. Démarche méthodologique

La démarche méthodologique illustrée par le diagramme de la figure 13 suit les objectifs assignés à ce travail. L'organigramme présente les étapes allant de l'acquisition des données jusqu'à la réalisation des objectifs.

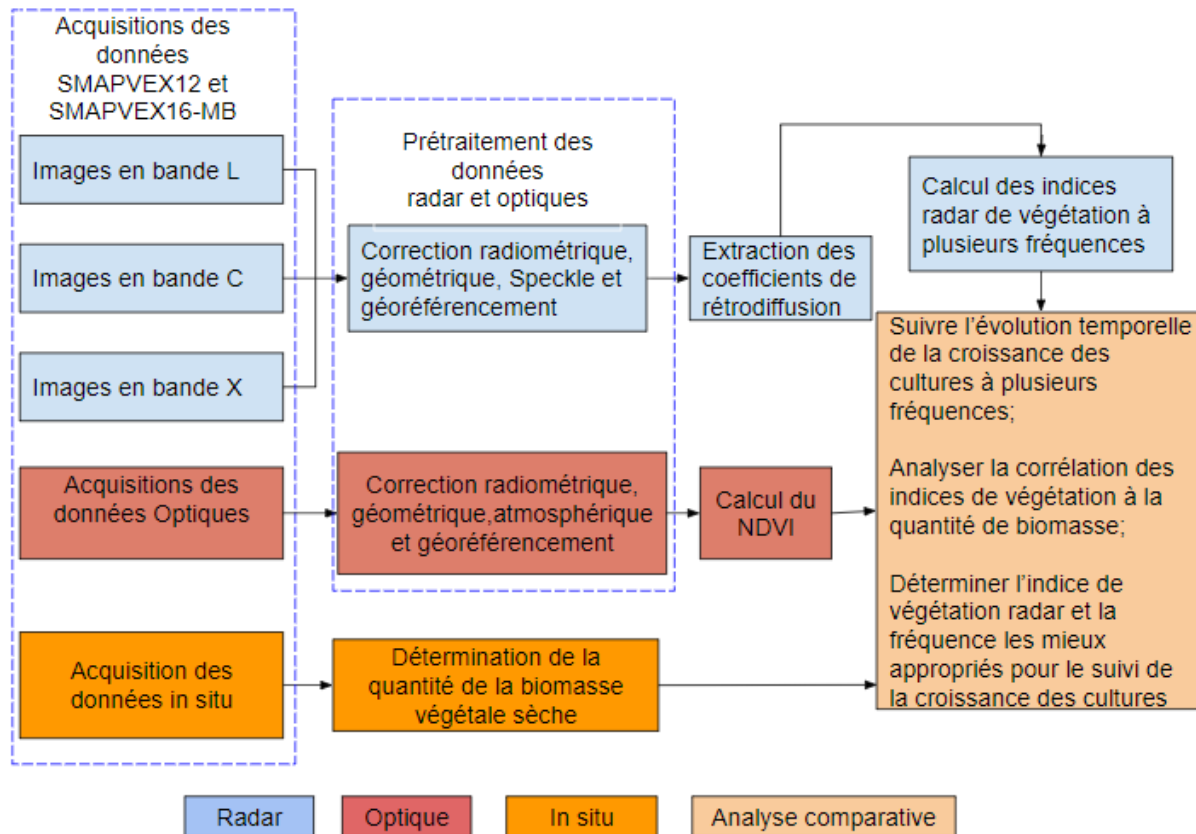


Figure 13 : Diagramme méthodologique des étapes principales.

### 3.3.1. Prétraitement des images radar et optique

Cette étape consiste à corriger et nettoyer au mieux les images radar et optiques. Le calibrage radiométrique, la diminution des distorsions géométriques ainsi que le filtrage de Speckle pour réduire le chatoiement sont appliqués aux images radar. La correction des effets atmosphériques et de la distorsion géométrique est appliquée aux images optiques. Les images radar et optiques sont aussi géoréférencées afin de permettre une géolocalisation juste et précise en tout point de l'image. Le géoréférencement a été effectué en superposant les images acquises au shapefile des champs agricoles échantillonnés durant les deux campagnes de terrain. Le système de projection utilisé est le NAD83 UTM zone14N.

### **3.3.2. Extraction des coefficients de rétrodiffusion et calcul des indices de végétation radar**

Les valeurs des coefficients de rétrodiffusion  $\sigma^{\circ}_{hv}$ ,  $\sigma^{\circ}_{hh}$ ,  $\sigma^{\circ}_{vv}$  sont extraites des images radar sous forme matricielle en unités normales ( $m^2/m^2$ ) dans les trois fréquences, à savoir bandes L, C et X. Elles sont ensuite converties en décibel (dB) pour le calcul des deux indices de végétation radar.

L'indice de végétation radar (RVI) est calculé selon l'équation (7). Il implique la combinaison des trois polarisations linéaires à travers un rapport et permet d'évaluer la biomasse. Le second indice de végétation radar, nommé indice de végétation à double polarisation (IVRD), est très semblable au précédent à la seule différence qu'il fait usage du rapport entre seulement deux polarisations linéaires (Équations 8a et 8b).

### **3.3.3. Calcul du NDVI**

Cet indice de végétation est calculé à partir de l'équation (2) appliquée aux images optiques acquises durant la période de la campagne SMAPVEX16-MB. Il est calculé à partir des valeurs de réflectance de la végétation dans les deux canaux Rouge (R) et Proche Infra Rouge (PIR).

### **3.3.4. Détermination de la quantité de la biomasse sèche**

La quantité de la biomasse est mesurée en  $kg/m^2$ . Elle est déterminée par une technique d'échantillonnage *in situ*. Un échantillon frais de culture est coupé et pesé pour déterminer son poids humide. Il est ensuite séché à l'étuve pour extraire l'eau qu'il contient et puis pesé de nouveau pour en déterminer le poids sec. Ce processus permet d'estimer la teneur en eau ainsi que la quantité de la biomasse sèche par unité de surface ( $kg/m^2$ ).

L'indice de surface foliaire (LAI) renseigne aussi sur la quantité de la biomasse végétale par unité de surface. Il exprime la valeur de la surface foliaire d'une culture par unité de surface du sol sous-jacent. Cet indice est évalué sur le terrain à partir des photographies hémisphériques numériques prises durant les campagnes de terrain. L'appareil photo étant positionné sur un bras télescopique au nadir par rapport à la culture observée (McNairn *et al.*, 2017).

### **3.3.5. Suivi de la croissance des cultures**

Le suivi de la croissance des cultures est fait sur une base temporelle. Pour chaque type de culture (blé, canola, maïs et soja), les indices de végétation radar dans les trois fréquences et l'indice optique sont analysés puis corrélés à la quantité de biomasse mesurée afin **a)** d'évaluer l'information contenue dans ces indices et **b)** de déterminer la fréquence radar la mieux corrélée à la biomasse mesurée, c'est-à-dire la fréquence la mieux convenable pour le suivi de la croissance des cultures. Les résultats seront commentés pour dégager l'efficacité de ces indices radar et optique à renseigner sur les stades d'évolution (croissance, maturité, sénescence) des cultures considérées ainsi que sur la quantité de biomasse végétale disponible.

## **4. Présentation et interprétation des résultats**

### **4.1. Suivi de la croissance des cultures avec les données radar en bandes L, C et X**

#### **4.1.1. Résultat du RVI et de l'IVRD<sub>vv</sub> en bande L**

Pour un même type de culture, plusieurs champs agricoles ont montré des profils temporels très semblables aussi bien pour l'indice de végétation radar RVI que pour l'IVRD<sub>vv</sub>. Cela étant, nous avons sélectionné pour chaque type de culture, quatre champs agricoles présentant les profils les plus différents possibles. Pour ces champs, les profils temporels du RVI et de l'IVRD<sub>vv</sub> en bande L et celui de l'humidité du sol montrent une similarité dans leurs allures pour les cultures de canola (Figures 14.1a et 14.1b), de maïs (Figures 14.2a et 14.2b) et de blé (Figures 14.4a et 14.4b), jusqu'à la 1<sup>ère</sup> semaine de juillet au moins. Pour le soja (Figures 14.3a et 14.3b), les allures sont différentes. Ceci nous laisse dire que pour les cultures dont la structure est verticale (canola, maïs et blé) le RVI et l'IVRD<sub>vv</sub> en bande L répondent à l'humidité du sol jusqu'à un certain stade de croissance, et que cette réponse se ressent beaucoup moins pour les cultures couvrantes telle que le soja.

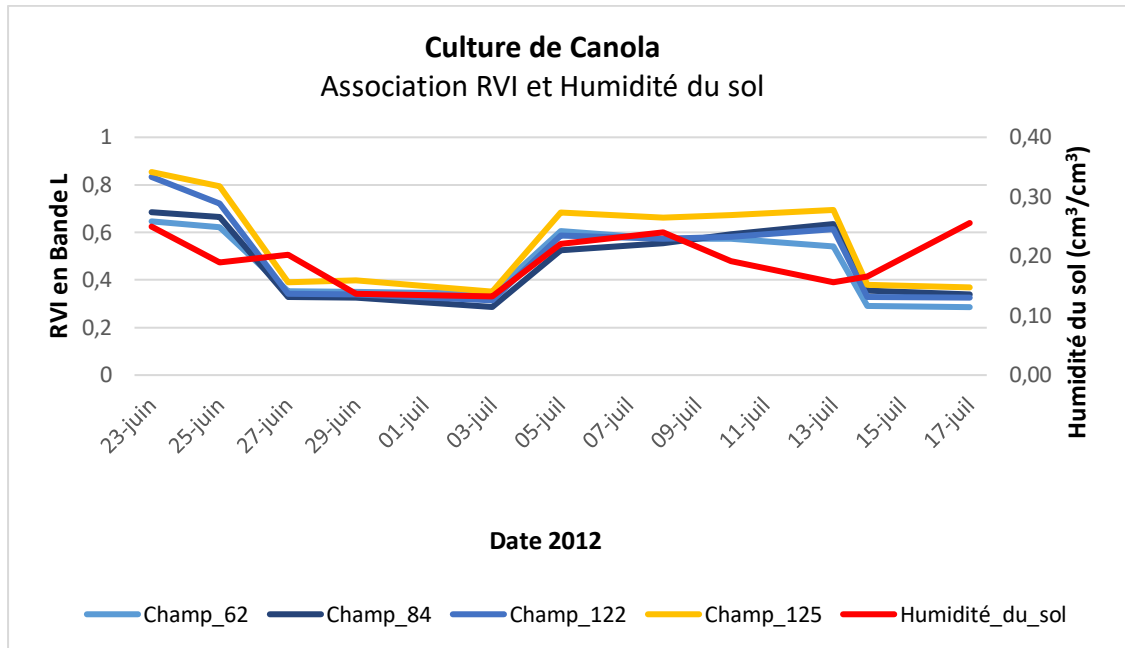


Figure 14.1a : Profils temporels de l'indice de végétation radar (RVI) en Bande L et de l'humidité moyenne du sol pour 4 champs agricoles de Canola. Angle d'incidence compris entre 35° et 45°.

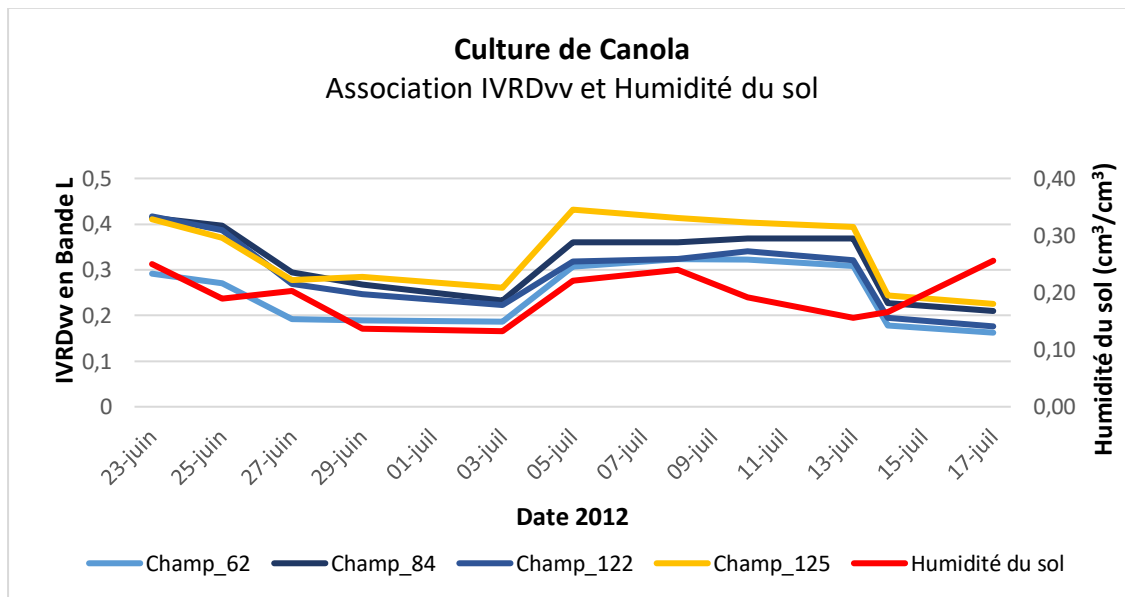


Figure 14.1b : Profils temporels de l'indice de végétation radar à double polarisation (IVRDv) en Bande L et de l'humidité moyenne du sol pour 4 champs agricoles de Canola. Angle d'incidence compris entre 35° et 45°.

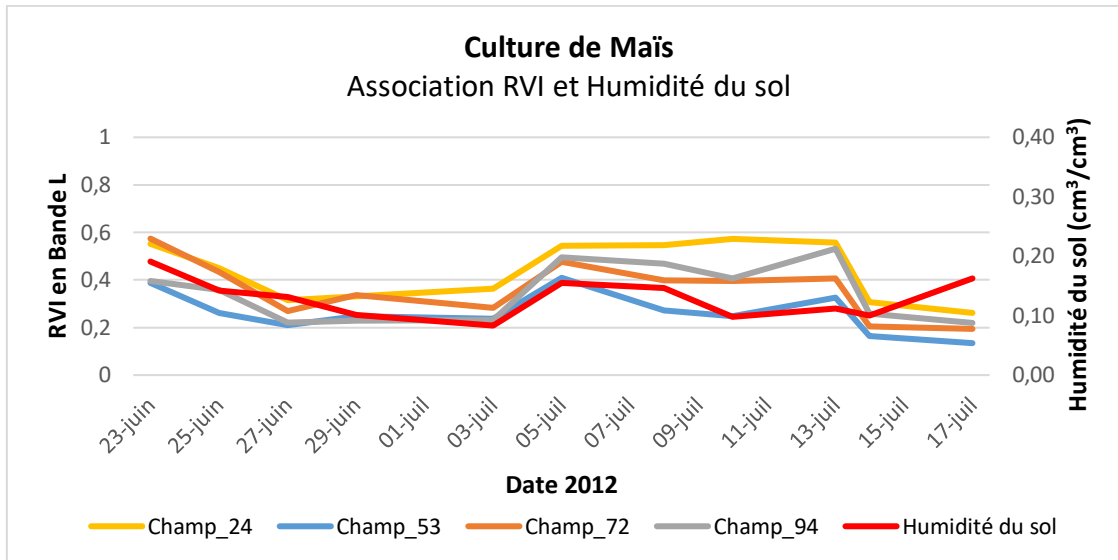


Figure 14.2a : Profils temporels de l'indice de végétation radar (RVI) en Bande L et de l'humidité moyenne du sol pour 4 champs agricoles de Maïs. Angle d'incidence compris entre 35° et 45°.

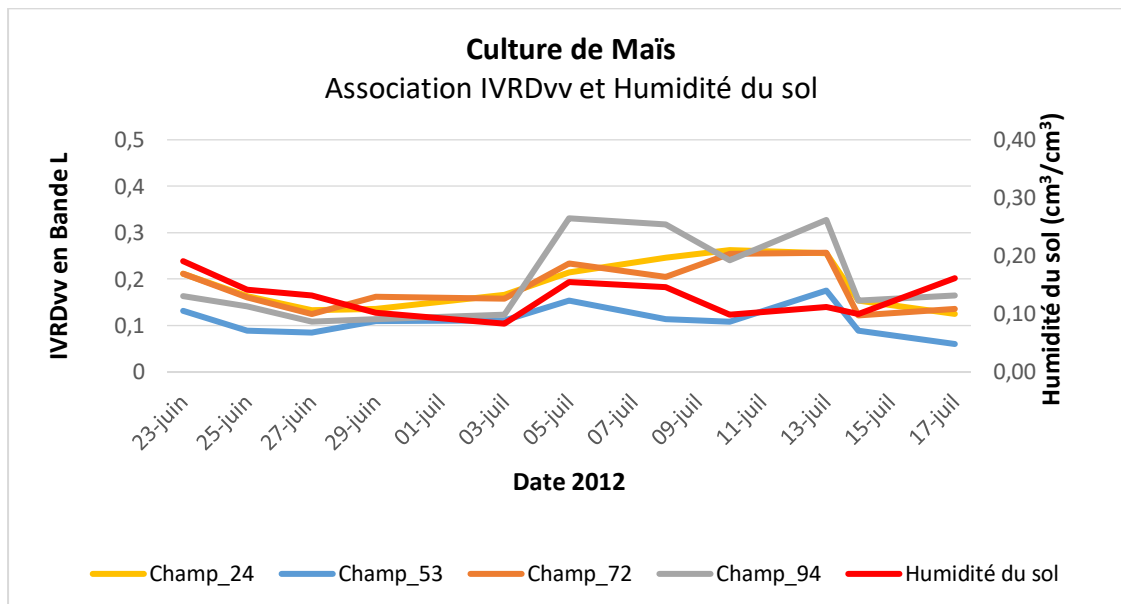


Figure 14.2b : Profils temporels de l'indice de végétation radar à double polarisation (IVRDv) en Bande L et de l'humidité moyenne du sol pour 4 champs agricoles de Maïs. Angle d'incidence compris entre 35° et 45°.



Figure 14.3a : Profils temporels de l'indice de végétation radar (RVI) en Bande L et de l'humidité moyenne du sol pour 4 champs agricoles de Soja. Angle d'incidence compris entre 35° et 45°.

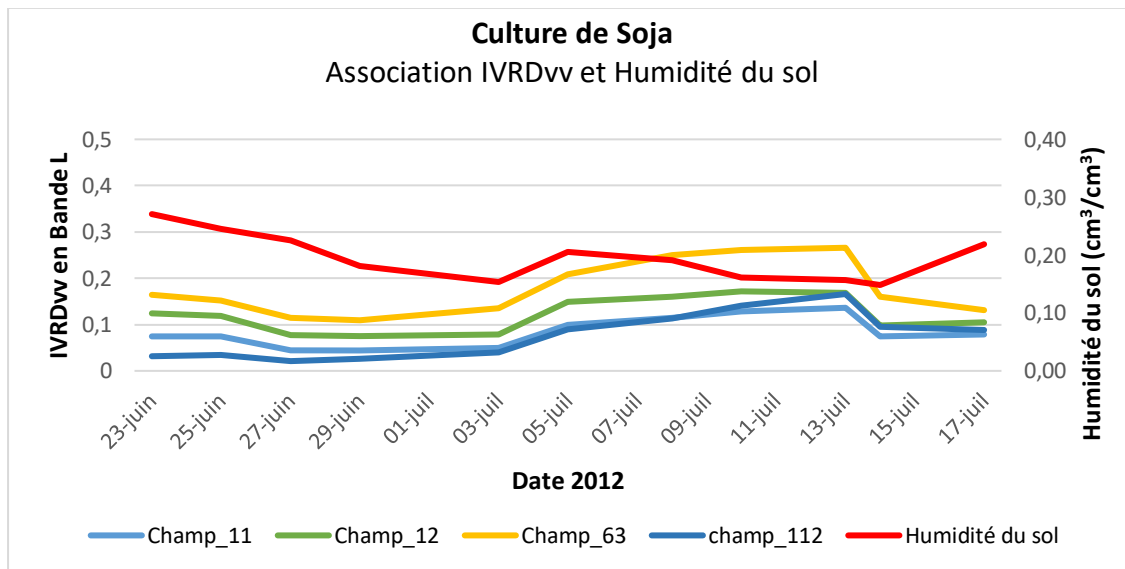


Figure 14.3b : Profils temporels de l'indice de végétation radar à double polarisation (IVRDv) en Bande L et de l'humidité moyenne du sol pour 4 champs agricoles de Soja. Angle d'incidence compris entre 35° et 45°.

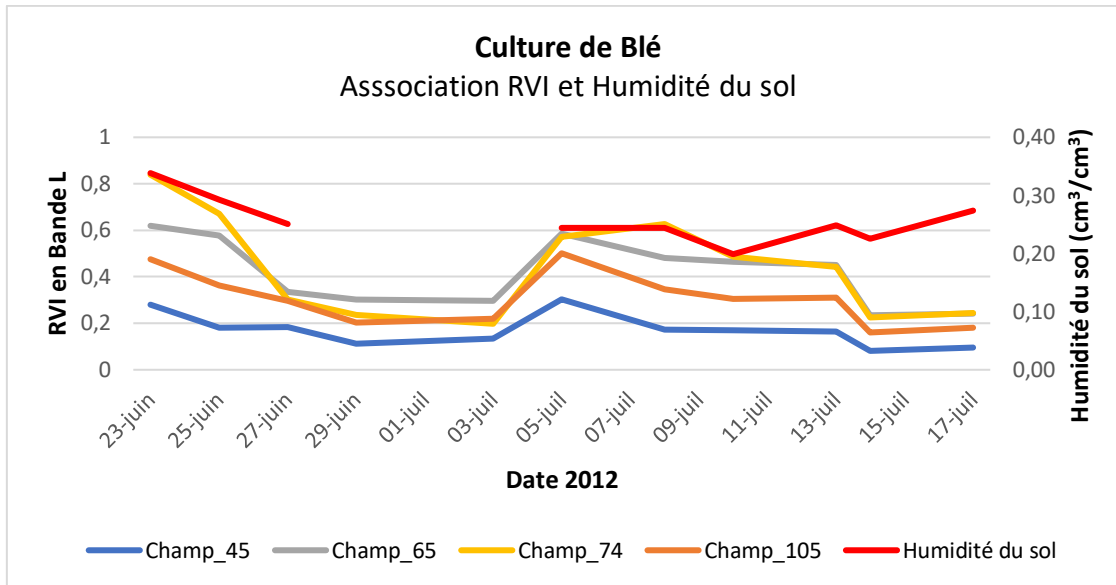


Figure 14.4a : Profils temporels de l'indice de végétation radar (RVI) en Bande L et de l'humidité moyenne du sol pour 4 champs agricoles de Blé. Angle d'incidence compris entre 35° et 45°.

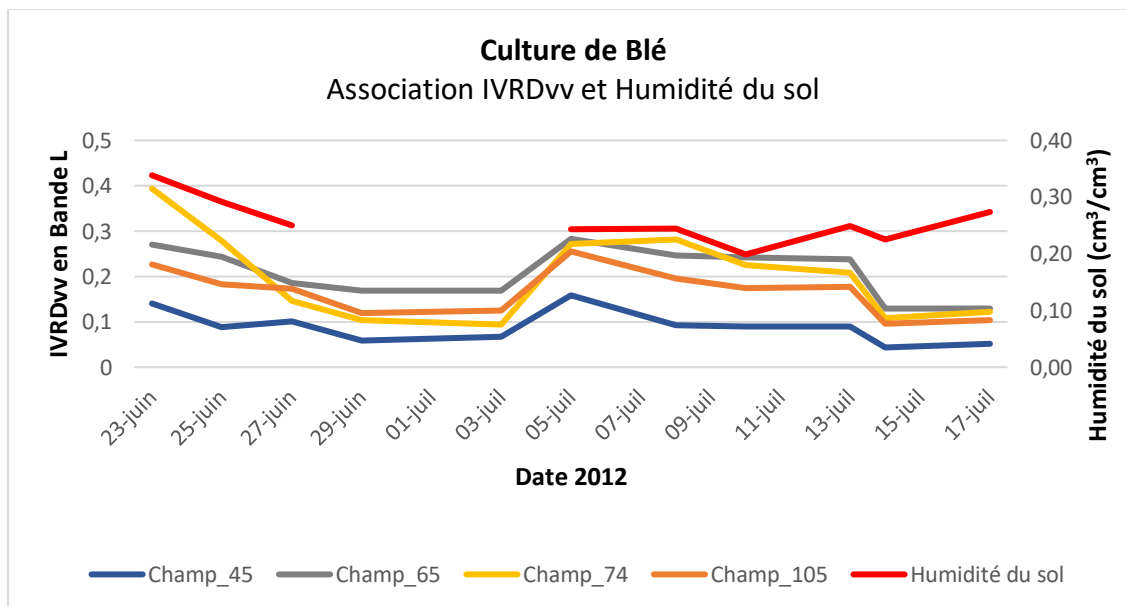


Figure 14.4b : Profils temporels de l'indice de végétation radar à double polarisation (IVRDvv) en Bande L et de l'humidité moyenne du sol pour 4 champs agricoles de Blé. Angle d'incidence compris entre 35° et 45°.



On remarque que le RVI et l'IVRD<sub>vv</sub> montrent des résultats très similaires en ce qui concerne le suivi de la croissance des cultures (Figures 14). Une augmentation brusque du RVI et de l'IVRD<sub>vv</sub> est visible en l'espace de deux jours, soit entre le 03 et le 05 juillet 2012 pour tous les champs agricoles et toutes les cultures (Figures 14). Elle résulterait de l'augmentation de l'humidité du sol due aux précipitations enregistrées le 04 juillet 2012 par la station météorologique *Agrotek Carman* de *Weather Farmer* (Figure 15). Aussi, la baisse du RVI et de l'IVRD<sub>vv</sub> observée entre le 23 juin et le 03 juillet (Figures 14) résulterait d'une période d'assèchement due à une rareté de précipitations (Figure 15).

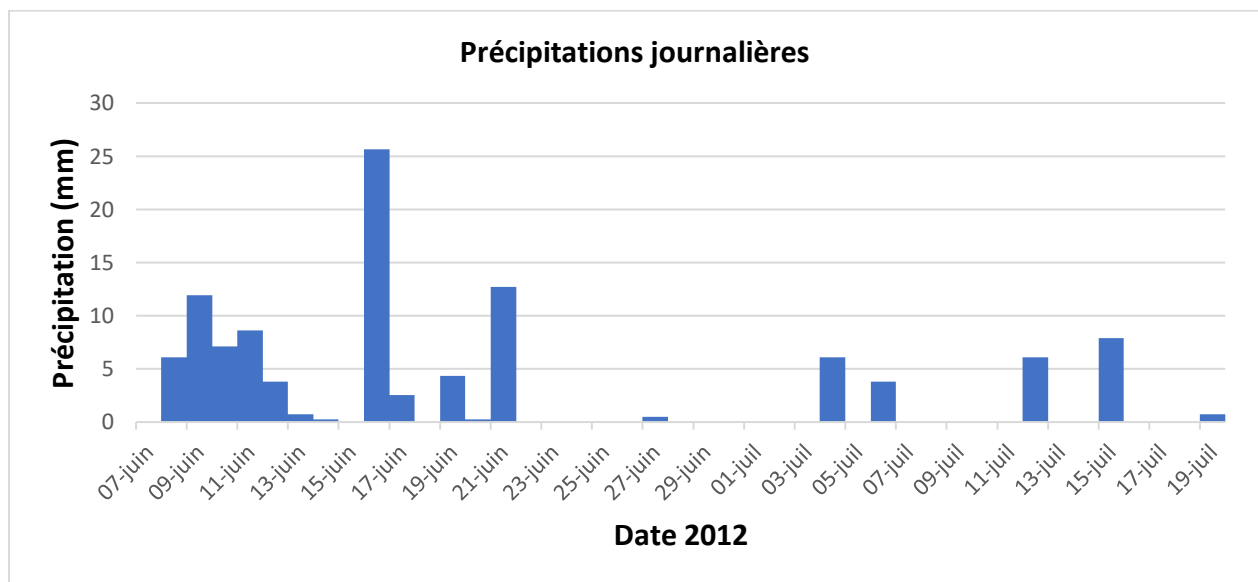
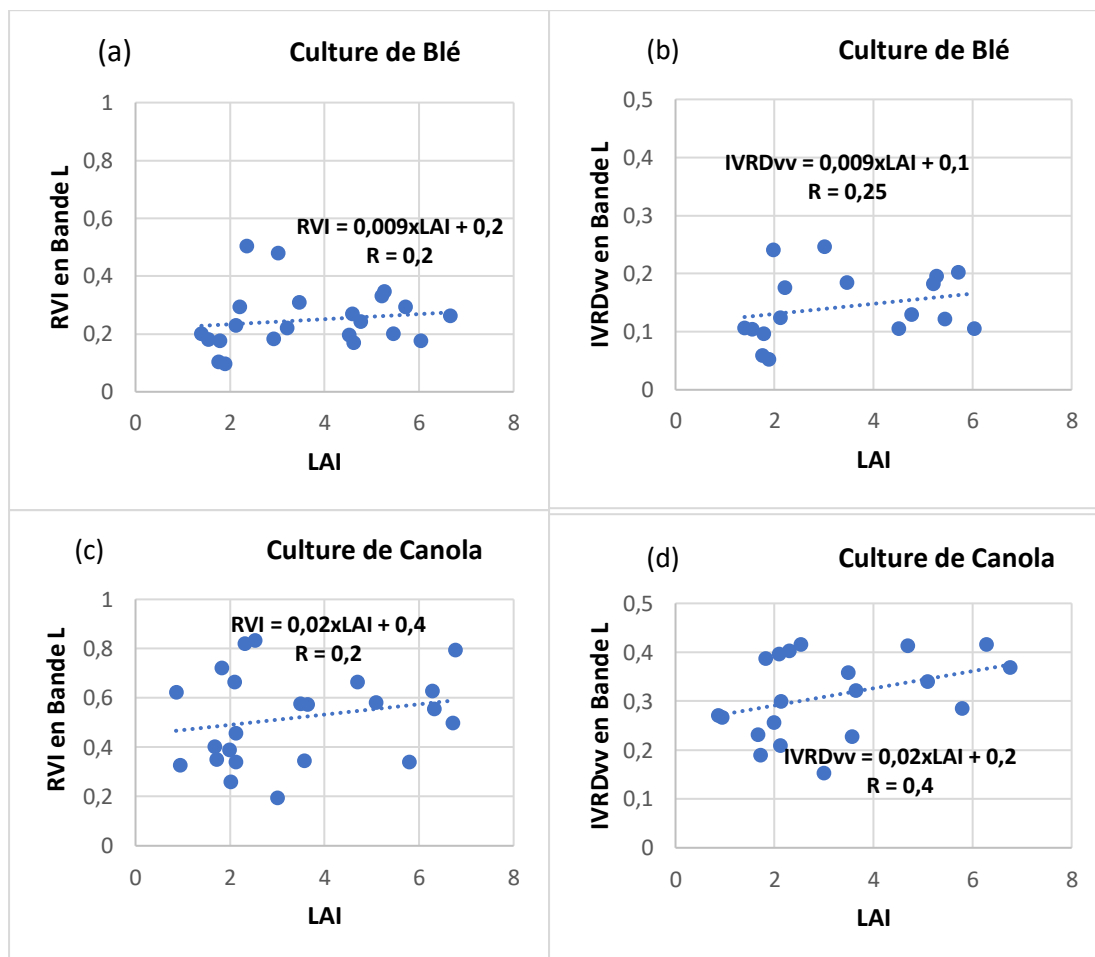


Figure 15 : Histogrammes des précipitations journalières enregistrées par la station *Agrotek Carman* de *Weather Farmer*.

Comme la bande L a l'aptitude de traverser la couverture végétale pour interagir avec le sol, la contribution du sol pourrait constituer la majeure partie du signal. D'où sa réponse à l'humidité du sol, observée sur les champs de canola, maïs et blé. Ce qui implique que, pour ces cultures, le RVI et l'IVRD<sub>vv</sub> en bande L ne représentent que très peu la biomasse végétale disponible. Ceci est illustré à la Figure 16 qui montre des faibles corrélations entre le RVI, l'IVRD<sub>vv</sub> et la biomasse représentée par l'indice foliaire de la végétation.

Pour chaque culture, les données de tous les champs ont été prises en compte dans la figure 16. La culture de blé est représentée par treize champs, dont les champs 31, 32, 44, 45, 55, 65, 73, 74, 81, 85, 91, 104 et 105. La culture de canola, est représentée par sept champs, soit les champs 61, 62, 84, 115, 122, 124 et 125. Huit champs représentent la culture de maïs, dont les champs 24, 53, 54, 71, 72, 83, 93 et 94. La culture de soja est représentée par dix-huit champs, dont les champs 11, 12, 14, 33, 34, 51, 52, 63, 64, 82, 101, 102, 103, 111, 112, 113, 114 et 123.



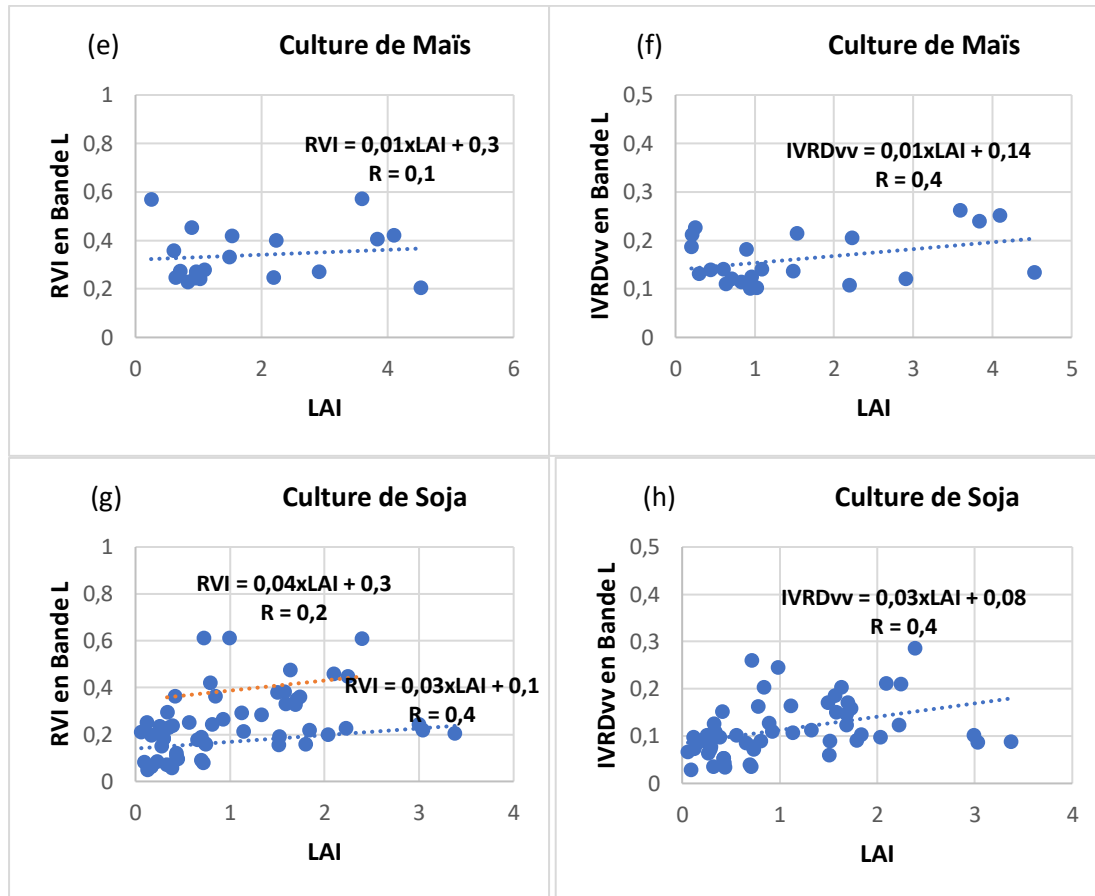


Figure 16 : Corrélation entre le RVI et IVRDv en bande L (angle d'incidence compris entre 35° et 45°) et le LAI pour les cultures de canola (a, b), de blé (c, d), de maïs (e, f) et de soja (g, h).

Pour toutes les cultures, L'IVRDv en bande L montre des corrélations au LAI relativement élevées par rapport au RVI en bande L (Figure 16).

Pour la culture de soja, la corrélation entre le RVI et le LAI présente deux tendances; les valeurs de RVI inférieures ou égales à 0,25 se montrent relativement mieux corrélées ( $R = 0,4$ ) au LAI que les RVI supérieurs à 0,25.

Pour le maïs, la faible corrélation ( $R = 0,1$ ) obtenue entre le RVI et le LAI, pourrait s'expliquer par la structure générale des champs de maïs caractérisée par des écartements des rangées et de plants plus ou moins grands, favorisant davantage l'interaction entre l'onde radar et le sol. Pour toutes les cultures, L'IVRDv en bande L montre des corrélations au LAI relativement élevées par rapport au RVI en bande L.

Au regard des résultats présentés dans les figures 14 et 16, la contribution de volume en bande L est faible dans l'onde rétrodiffusée par les cultures observées de blé, canola, maïs et soja. Cette fréquence se montre alors inefficace pour évaluer l'évolution temporelle de ces cultures (Joerg *et al.* 2018).

#### 4.1.2. Résultats du RVI et de l'IVRD<sub>vv</sub> en bande C

Les images de Radarsat-2 sont acquises à des angles d'incidence variant entre 20° et 40°. Pour limiter l'influence de la variation de l'angle d'incidence sur les résultats du calcul du RVI et de l'IVRD<sub>vv</sub>, ceux-ci sont groupés selon deux intervalles angulaires d'acquisition du coefficient de rétrodiffusion  $\sigma^\circ$ , à savoir 20°-30° et 31°-40°. Ainsi, l'analyse subséquente du RVI et de l'IVRD<sub>vv</sub> se fait séparément selon ces deux intervalles angulaires.

Pour un même type de culture et un même intervalle d'angle d'incidence, le RVI et l'IVRD<sub>vv</sub> montrent des profils temporels très similaires; ceci est présenté aux Figures 17.1a et 17.1b, 17.2a et 17.2b pour le canola, 18.1a et 18.1b, 18.2a et 18.2b pour le maïs, 19.1a et 19.1b, 19.2a et 19.2b, 20.1a pour le soja et 20.1b, 20.2a et 20.2b pour le blé. Avant la mi-juillet, pour la même culture, les profils temporels de ces indices montrent une dynamique temporelle légèrement plus rapide dans l'intervalle angulaire 20°-30° que dans 31°-40°.

Pour toutes les cultures, le début des observations, soit de fin avril au mois de juin, est marqué par des valeurs de RVI et de IVRD<sub>vv</sub> faibles, influencées par les paramètres de surface étant donné la faible quantité de végétation présente dans les champs (McNairn *et al.*, 2017). L'augmentation du RVI à partir du début juin jusqu'à l'obtention d'un plateau de la mi-juillet au début août ou de la mi-juillet à la mi-août selon les cultures rend compte de la croissance des cultures exprimée par l'augmentation de la biomasse végétale. Les cultures de canola (Figure 17) et de blé (Figure 20) présentent des valeurs de RVI et de IVRD<sub>vv</sub> très élevées comparativement aux cultures de maïs (Figure 20) et de soja (Figure 19). Pour le canola et le blé, ces valeurs de RVI et de IVRD<sub>vv</sub> sont liées à la forte densité de ces cultures par unité de surface et à l'abondance de la biomasse végétale observée vers la fin de la croissance.

Plus spécifiquement, le canola est en pleine croissance à partir de la 1<sup>re</sup> semaine de juin et atteint la maturité vers la fin de juillet. Les Figures 17.1a, 17.1b, 17.2a et 17.2b montrent clairement une augmentation rapide du RVI et du IVRD<sub>vv</sub> à partir du 09-12 juin.

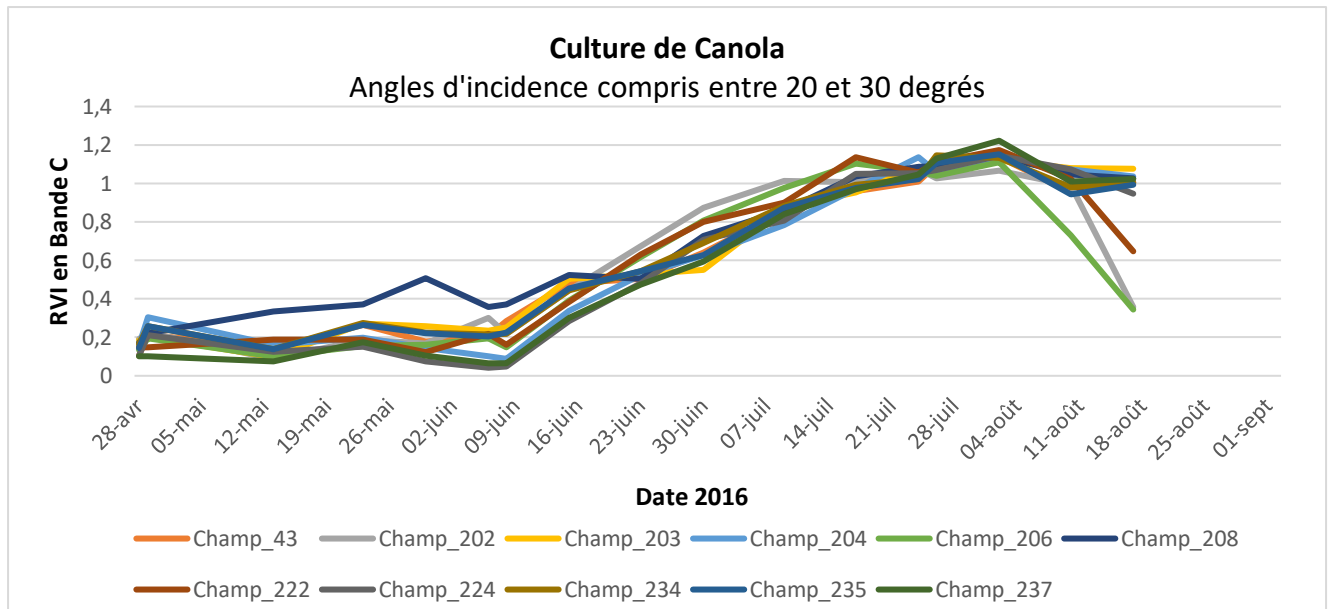


Figure 17.1a : Profils temporels du RVI en bande C pour des champs de Canola observés aux angles d'incidence compris entre 20°-30°.

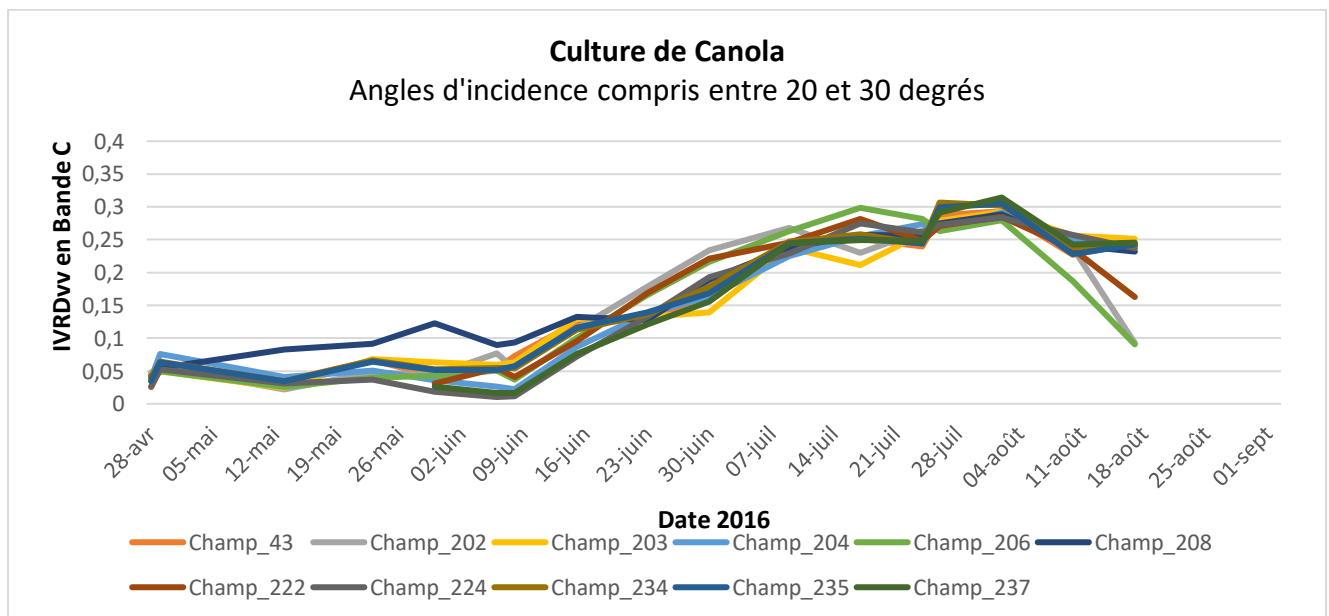


Figure 17.1b : Profils temporels de l'IVRDv en bande C pour des champs de Canola observés aux angles d'incidence compris entre 20°-30°.

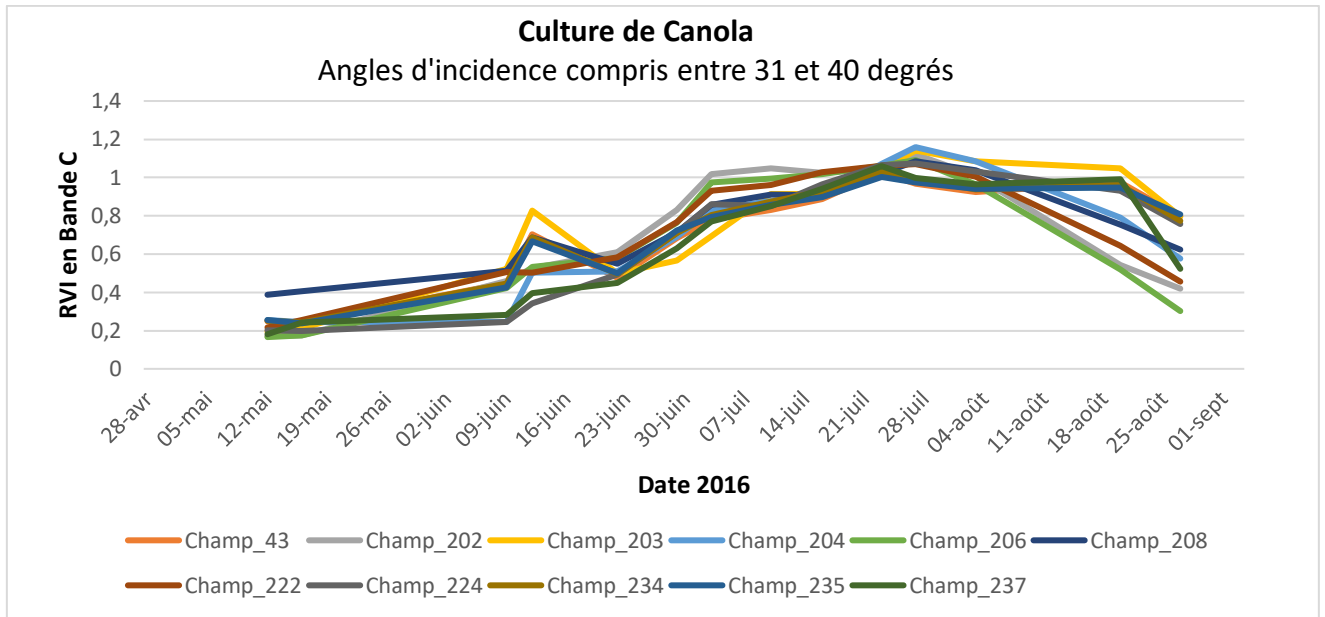


Figure 17.2a : Profils temporels du RVI en bande C pour des champs de Canola observés aux angles d'incidence compris entre 31°-40°.

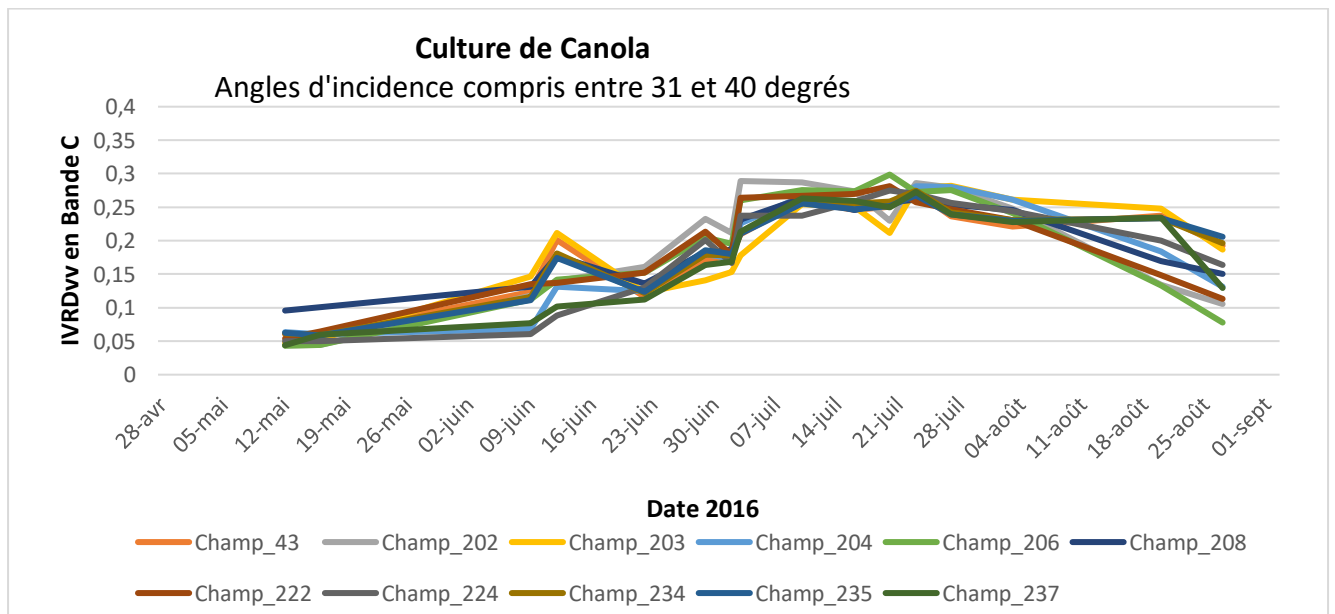


Figure 17.2b : Profils temporels de l'IVRDv en bande C pour des champs de Canola observés aux angles d'incidence compris entre 31°-40°.

Au début des observations, lorsque la végétation est faible, le RVI du maïs (Figures 18.1a, 18.1b, 18.2a, 18.2b) est particulièrement sensible à la variation de l'angle d'incidence. Ceci est

attribuable aux écartements des rangées et de plants plus ou moins grands dans les champs de maïs, favorisant davantage la contribution du sol. Cependant, cette influence du sol est réduite lorsque la biomasse végétale devient abondante. Les angles d'incidences élevés s'avèrent plus favorables au suivi de l'évolution de la croissance du maïs.

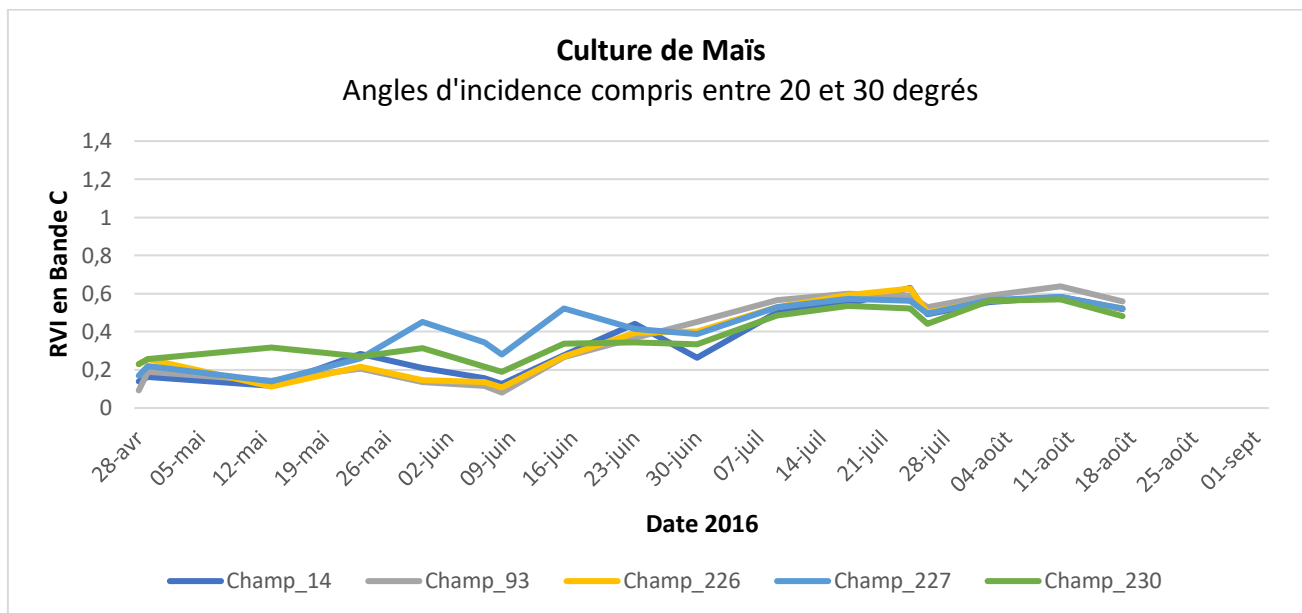


Figure 18.1a : Profils temporels du RVI en bande C pour des champs de maïs observés aux angles d'incidence compris entre 20°-30°.

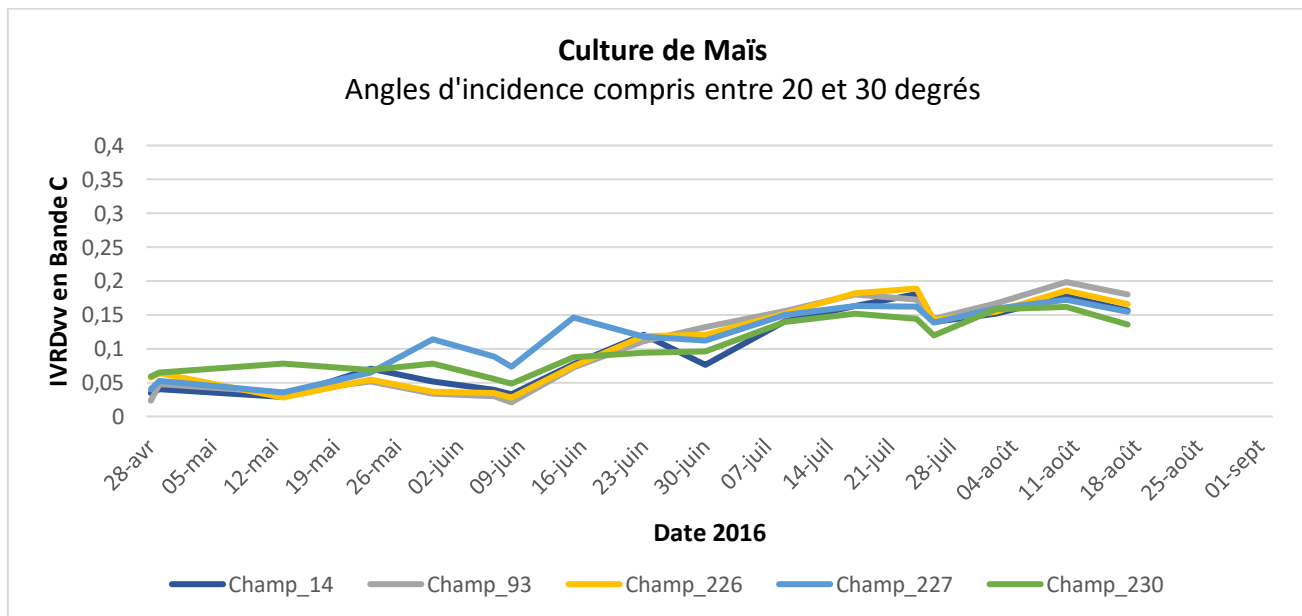


Figure 18.1b : Profils temporels de l'IVRDwv en bande C pour des champs de maïs observés aux angles d'incidence compris entre 20°-30°.

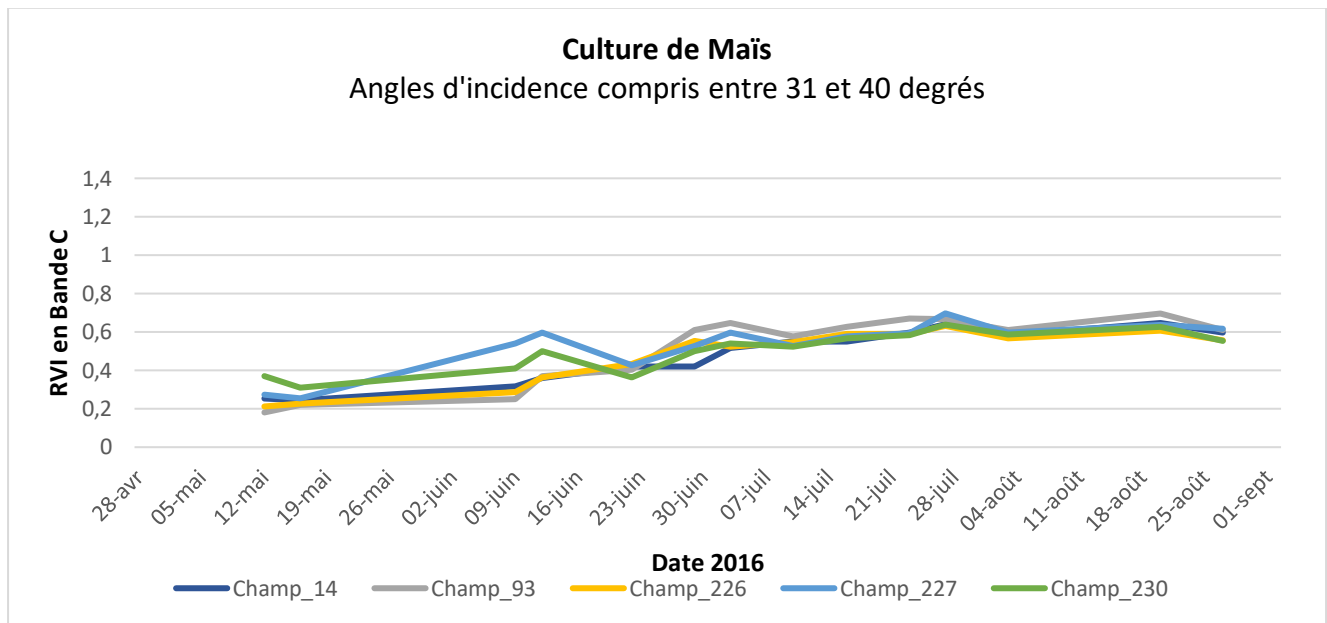


Figure 18.2a : Profils temporels du RVI en bande C pour des champs de maïs observés aux angles d'incidence compris entre 31°-40°.

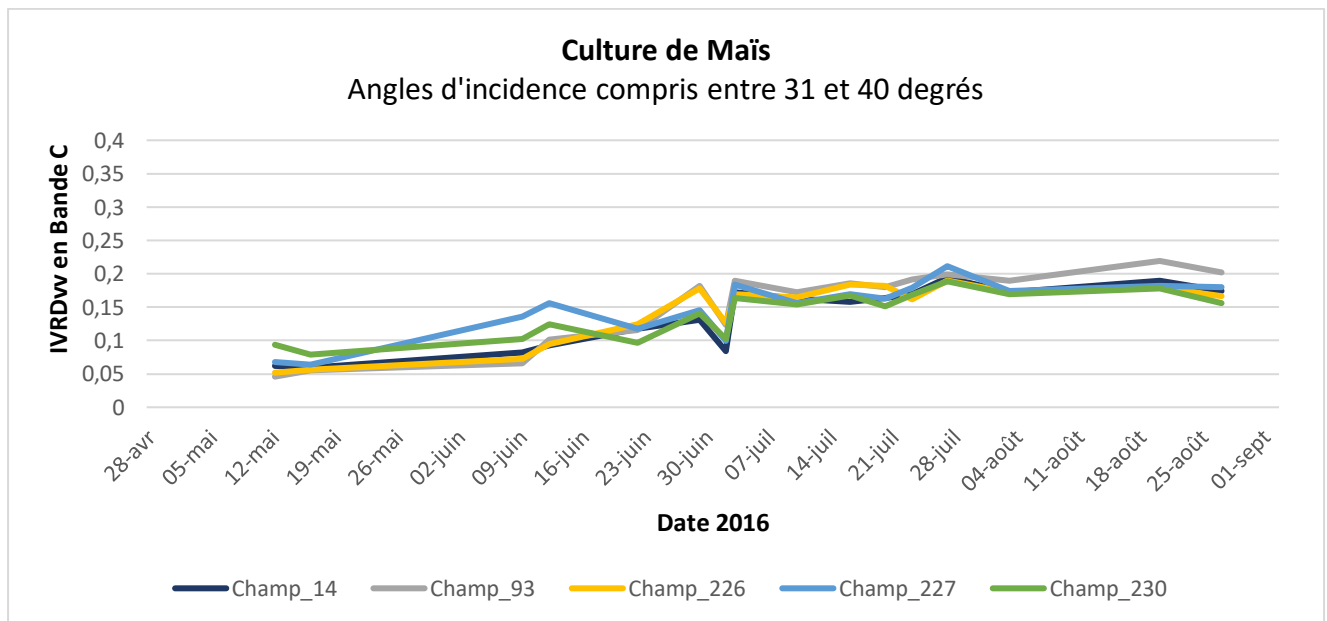


Figure 18.2b : Profils temporels de l'IVRDvw en bande C pour des champs de maïs observés aux angles d'incidence compris entre 31°-40°.



Les figures 19.1a, 19.1b, 19.2a et 19.2b montrent que la croissance de soja est bien en place à partir de la fin du mois de juin.

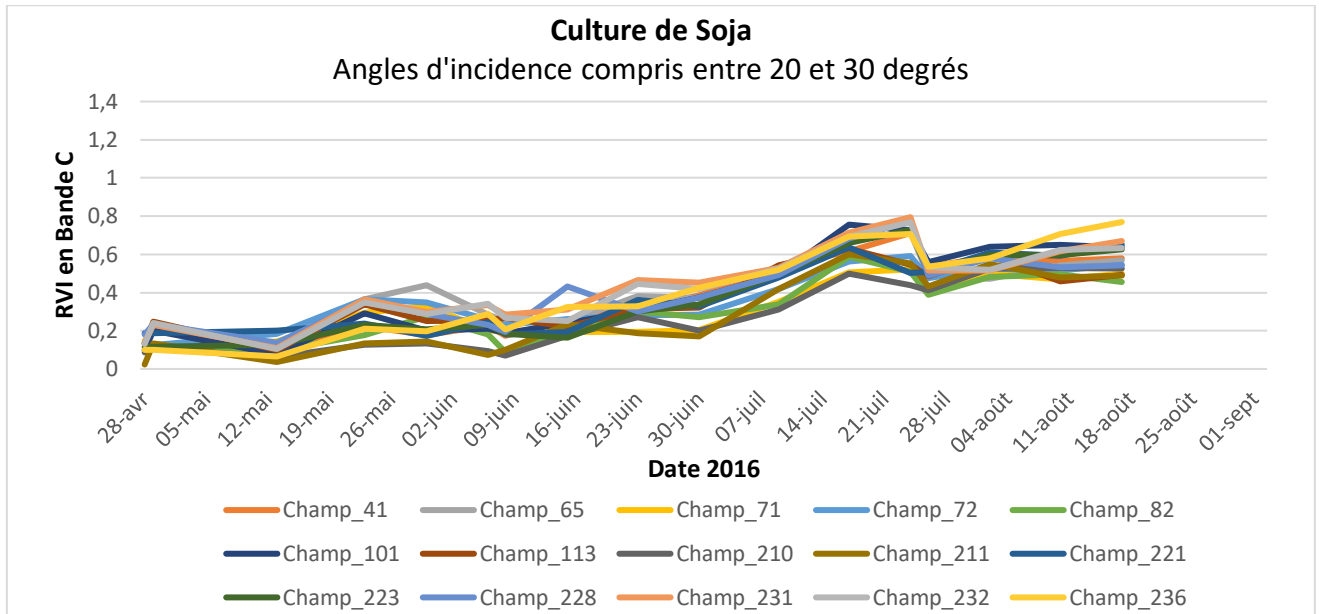


Figure 19.1a : Profils temporels du RVI en bande C pour des champs de soja observés aux angles d'incidence compris entre 20°-30°.

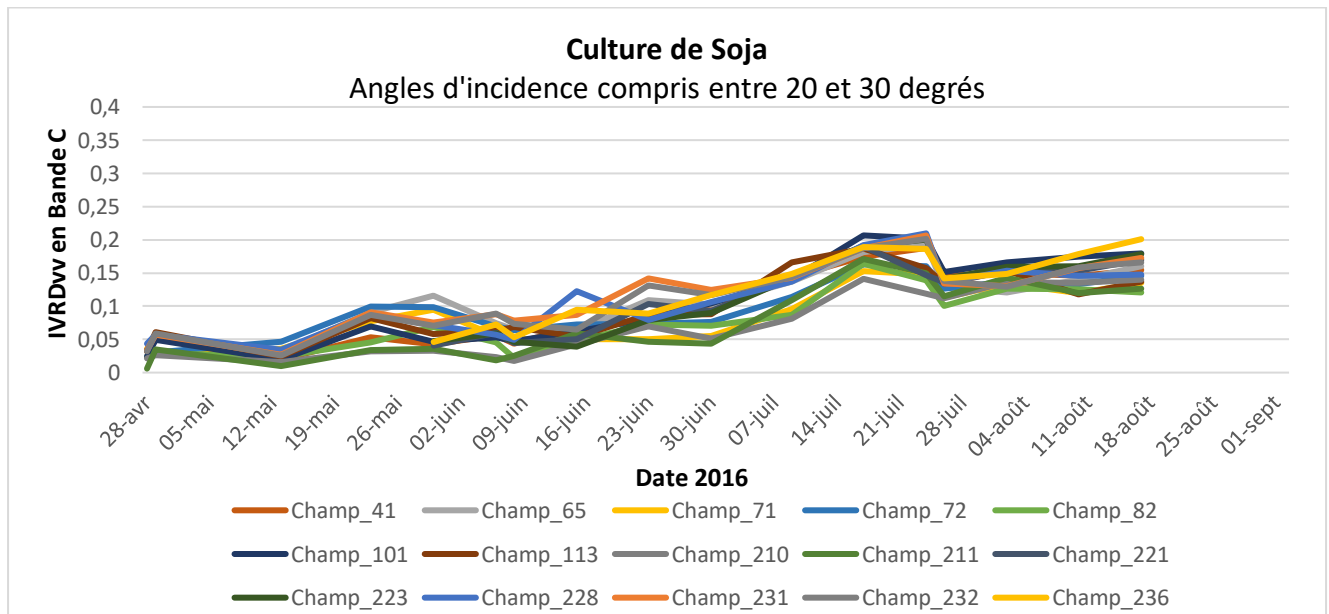


Figure 19.1b: Profils temporels de l'IVRDvw en bande C pour des champs de soja observés aux angles d'incidence compris entre 20°-30°.

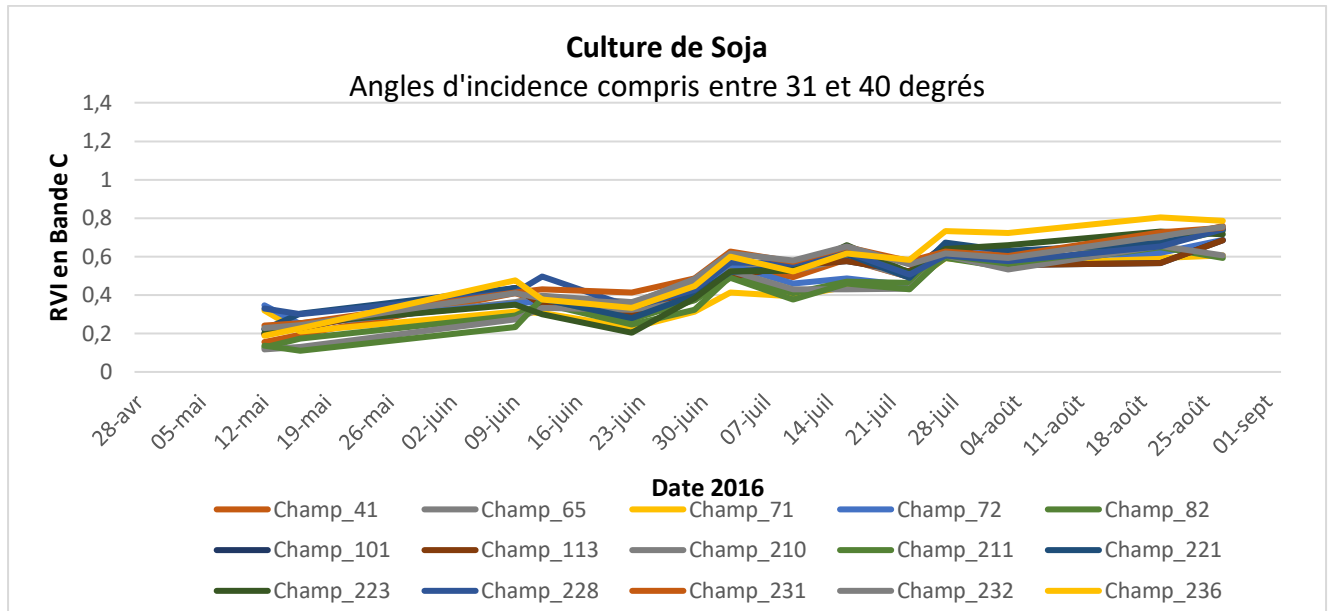


Figure 19.2a : Profils temporels du RVI en bande C pour des champs de soja observés aux angles d'incidence compris entre 31°-40°.

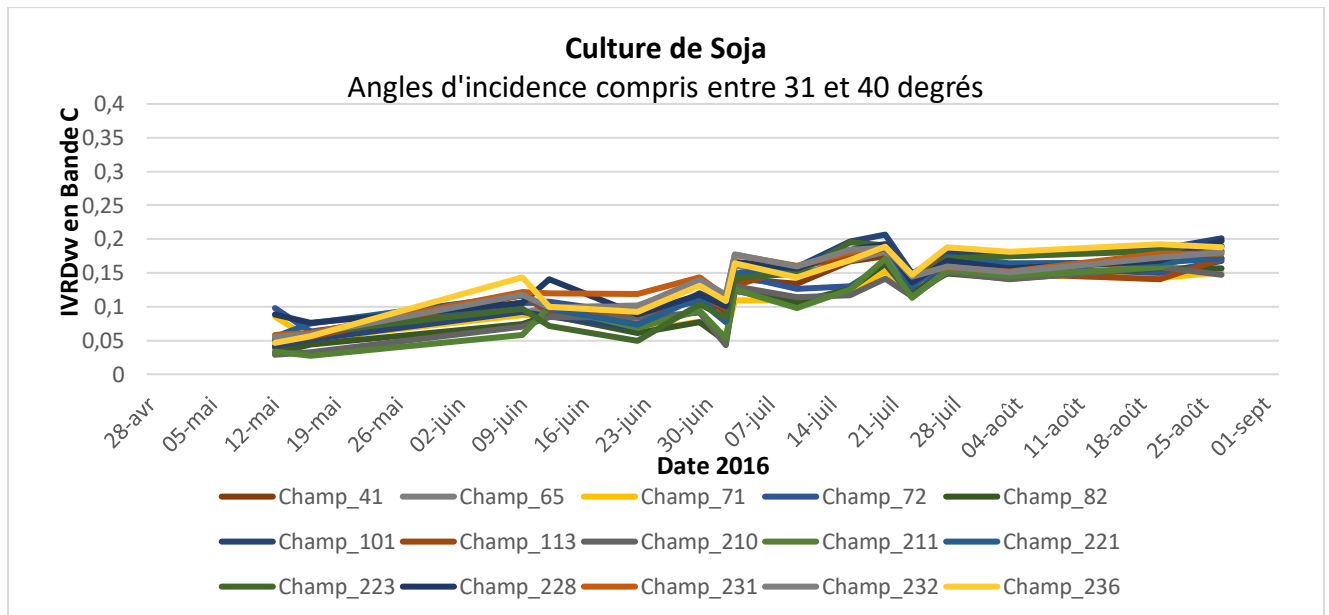


Figure 19.2b : Profils temporels de l'IVRDw en bande C pour des champs de soja observés aux angles d'incidence compris entre 31°-40°.

Les figures 20.1a et 20.1b montrent pour le blé une phase de croissance du 8 juin au 9 juillet, suivie d'un stade de maturité qui dure jusqu'au 02 août, puis d'un stade de sénescence caractérisé par une chute du RVI et de l'IVRDw. Tout comme les champs de canola observés dans l'intervalle angulaire 31°-40° (Figures 17.2a et 17.2b), les champs de blés (Figures 20.2a

et 20.2b) présentent des pics de RVI et IVRD<sub>vv</sub> vers le 10 juin. À partir de juillet, le RVI du blé semble moins homogène que l'IVRD<sub>vv</sub> aussi bien dans l'intervalle angulaire 20°-30° que dans 31°-40°.

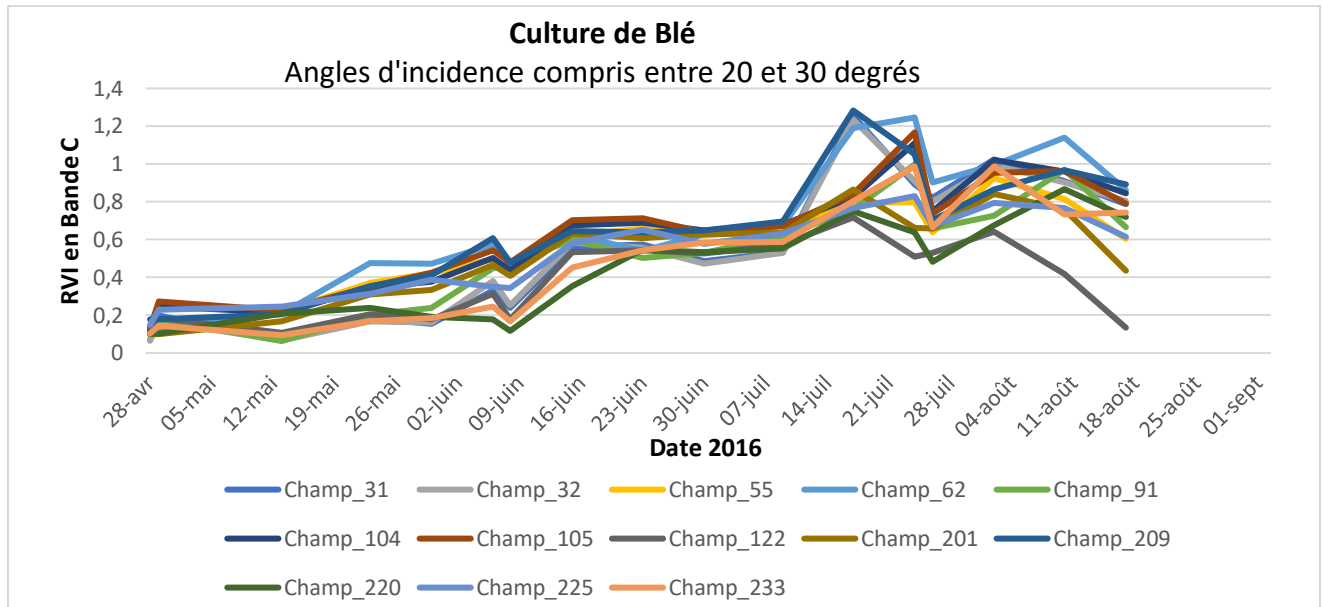


Figure 20.1a : Profils temporels du RVI en bande C pour des champs de blé observés aux angles d'incidence compris entre 20°-30°.

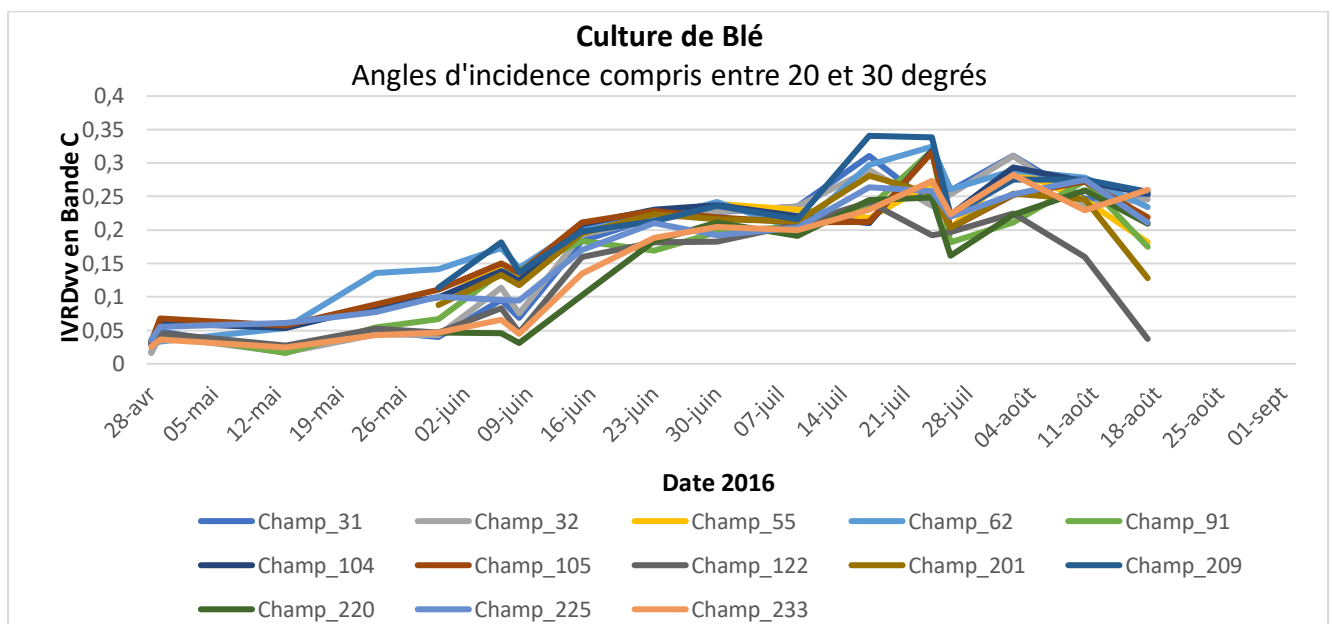


Figure 20.1b : Profils temporels de l'IVRD<sub>vv</sub> en bande C pour des champs de blé observés aux angles d'incidence compris entre 20°-30°.

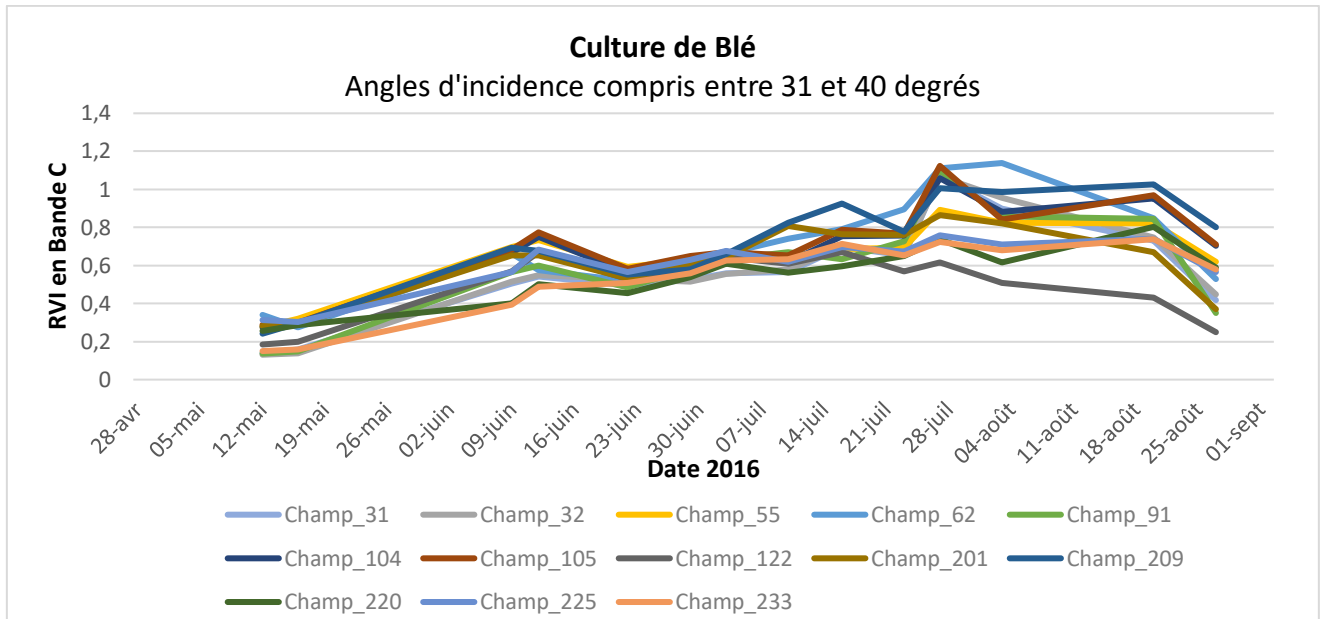


Figure 20.2a : Profils temporels du RVI en bande C pour des champs de blé observés aux angles d'incidence compris entre 31°-40°.

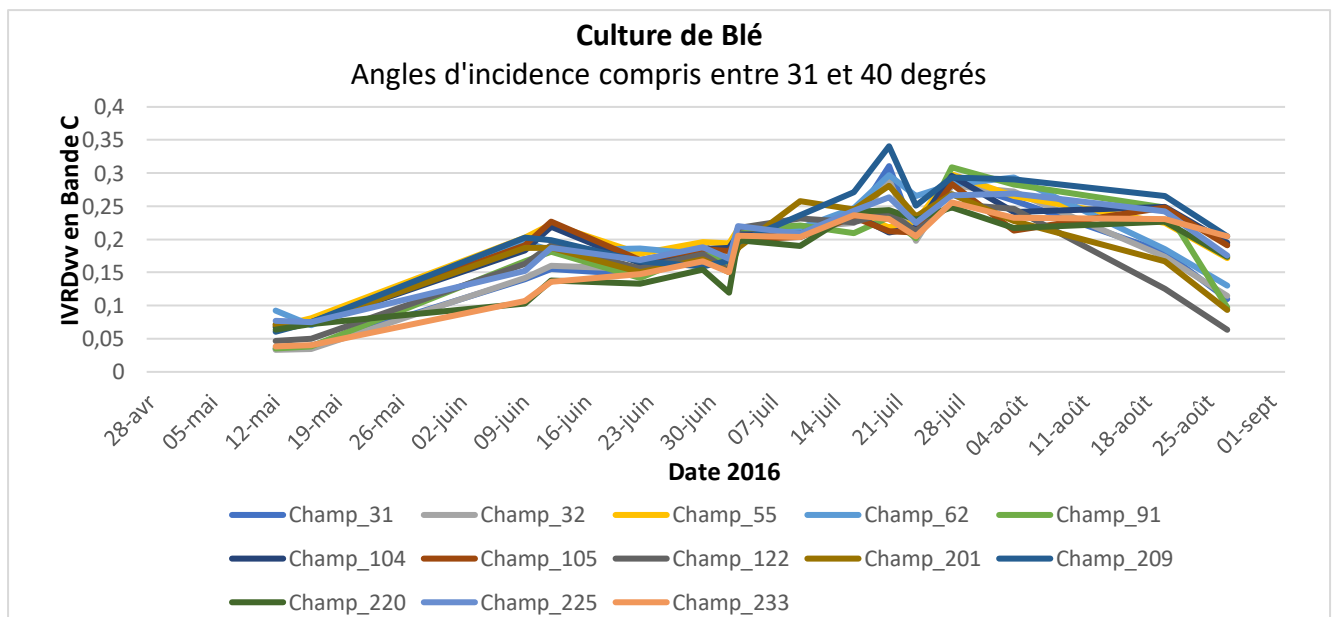


Figure 20.2b : Profils temporels de l'IVRDv en bande C pour des champs de blé observés aux angles d'incidence compris entre 31°-40°.

### 4.1.3. Résultats de l'IVRD<sub>VV</sub> en bande X

L'effet de l'angle d'incidence sur l'IVRD<sub>VV</sub> en bande X est très négligeable, les images TerraSAR-X étant acquises à un angle d'incidence ne variant que très peu, soit entre 41,7° et 42,9°. Les images TerraSAR-X en mode ascendant choisies pour ce travail à cause de leurs dates d'acquisition proches des jours de prélèvement des données de terrain, couvrent entièrement les champs de canola et de blé uniquement. Elles ont été recueillies en double polarisation VV/VH. C'est pourquoi, le suivi de la croissance des cultures est possible en utilisant l'IVRD<sub>VV</sub>, l'indice de végétation radar à double polarisation VV (Équation 8b).

Le suivi temporel de l'IVRD<sub>VV</sub> pour la culture de canola présenté à la Figure 21, montre une croissance qui débute à partir de mi-juin, un effet de plateau de la première semaine de juillet à la fin juillet, correspondant au stade de maturité, suivi par une baisse de l'IVRD<sub>VV</sub> durant tout le mois d'août, correspondant au stade de sénescence.

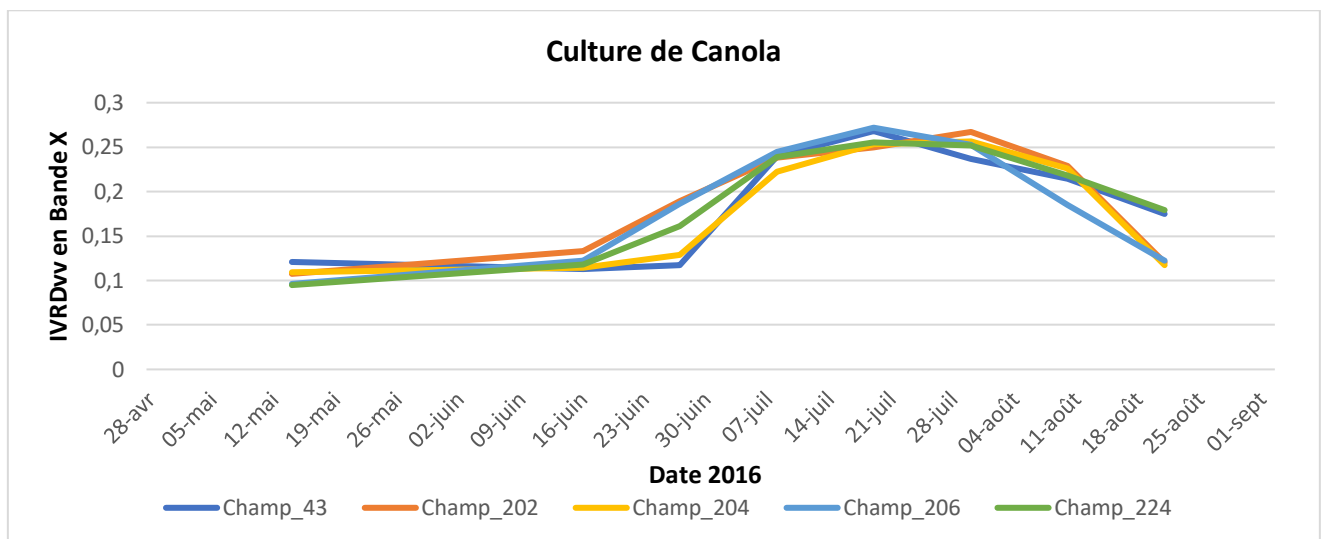


Figure 21: Profils temporels de l'IVRD<sub>VV</sub> en bande X pour des champs de canola.

Pour le blé, le suivi temporel de l'IVRD<sub>VV</sub> (Figure 22) montre une croissance qui débute à la fin du mois de juin (soit deux semaines plus tard que le Canola), suivi d'un effet de plateau à la mi-juillet indiquant le stade de maturité pendant tout le mois de juillet. Puis, l'IVRD<sub>VV</sub> décroît progressivement pendant que les cultures s'assèchent durant la phase de sénescence.

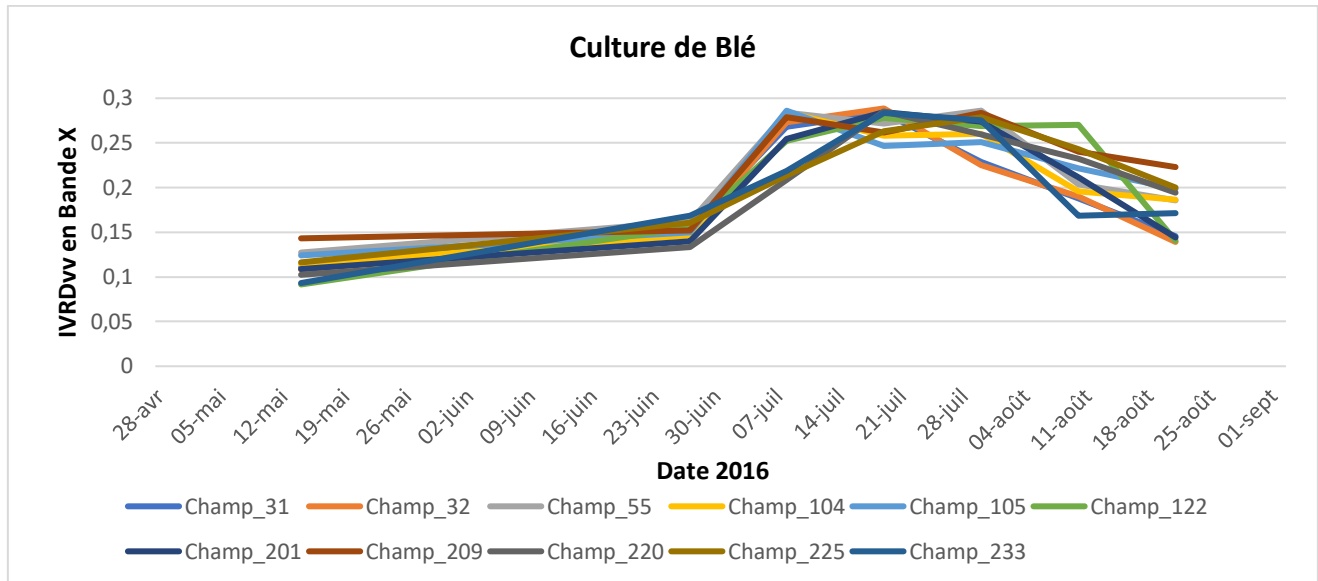


Figure 22: Profils temporels de l'IVRDvv en bande X pour des champs de blé.

Pour la culture de canola, le RVI et l'IVVRDvv en bande C identifient les stades de croissance à la même période que l'IVRDvv en bande X.

Pour le blé, le RVI et l'IVVRDvv en bande C calculés à 20°-30° (Figures 20.1a, 20.1b) montrent une phase de croissance qui commence beaucoup plus tôt (à partir du 8 juin) que ce qui est observée en bande X. Par contre la phase de sénescence est détectée quelques jours plus tard en bande C (03-07 août sur les figures 20.1a, 20.1b, 20.2a, 20.2b) qu'en bande X (30 juillet sur la figure 22).

#### 4.2. Comparaison des indices de végétation

Dans la section précédente, le suivi de la croissance des cultures effectué à l'aide de données radar en bandes L, C et X a montré l'inefficacité de la bande L à renseigner sur l'évolution temporelle des cultures (Figures 14.1a, 14.1b, 14.2a, 14.2b, 14.3a, 14.3b, 14.4a, 14.4b) et à fournir des informations relatives à la biomasse végétale (Figure 16). Ce résultat s'explique par la contribution des paramètres du sol qui est très significative en bande L. La présente section présente les comparaisons des régressions obtenues en bandes C et X entre la quantité de biomasse végétale mesurée et les indices de végétation radar; puis entre l'indice optique NDVI et les indices de végétation radar.

#### **4.2.1. Relation entre la quantité de biomasse sèche et les indices de végétation radar en bande C et X, et le NDVI**

Rappelons qu'en bande X, les données sont disponibles uniquement pour les cultures de blé et de canola. Les Figures 23, 24, 25 et 26 montrent les relations entre la biomasse et l'IVRD<sub>vv</sub>, le RVI et le NDVI pour les cultures de canola, de blé, de maïs et de soja, respectivement. De très fortes corrélations sont obtenues en bande X entre l'IVRD<sub>vv</sub> et la quantité de biomasse, soit un coefficient de corrélation  $R = 0,96$  pour le canola (Figure 23c) et  $R = 0,9$  pour le blé (Figure 24c). Elles sont dues au fait que la bande X opérant à des longueurs d'onde faibles, le signal radar réagit avec la végétation. Dans ce cas, la contribution des paramètres du sol est très négligeable dans l'onde rétrodiffusée. Les corrélations obtenues en bande C sont plus faibles mais bonnes, avec des valeurs de  $R$  de 0,8 et 0,7 respectivement pour le canola (Figure 23a) et le blé (Figure 24a). Le NDVI des deux cultures est aussi positivement corrélé à la quantité de biomasse végétale. Pour la culture de canola, la corrélation  $R = 0,9$  (Figure 23d) est légèrement inférieure à celle obtenue en bande X entre l'IVRD<sub>vv</sub> et la biomasse ( $R = 0,96$ ). Elle est moins bonne pour la culture de blé en raison probablement de la forte dispersion des points qui apparaît pour les faibles valeurs de biomasse (Figure 24d).

Pour la culture de maïs, le RVI et l'IVRD<sub>vv</sub> en bande C montrent des corrélations identiques à la quantité de la biomasse, soit  $R = 0,7$  (Figures 25a, 25b); alors que pour le soja, le RVI en bande C est légèrement mieux corrélé à la biomasse ( $R = 0,8$ ) que l'IVRD<sub>vv</sub> en bande C (Figure 26a). Les NDVI de ces deux cultures montrent de faibles corrélations à la quantité de la biomasse, soit  $R = 0,3$  (Figure 25c) pour le maïs et  $R = 0,5$  pour le soja (Figure 26c). Pour le maïs, cette faible relation à la biomasse serait due au nombre limité de données analysées ( $n=5$ ).

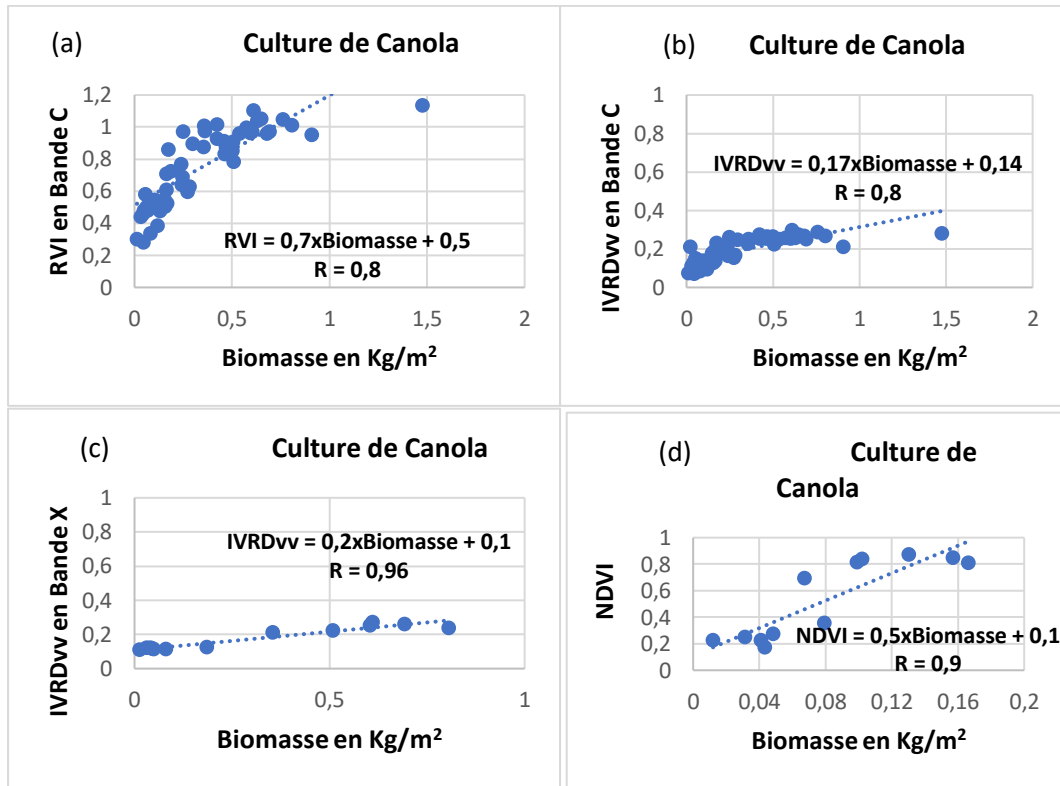
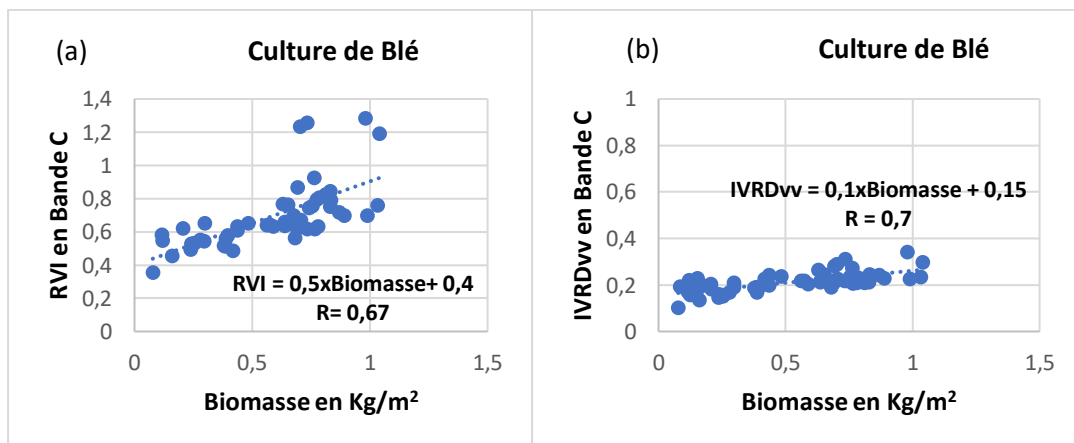


Figure 23: Corrélations entre la quantité de biomasse végétale et le RVI en bande C (a), l'IVRDvv en bande C (b), l'IVRDvv en bande X (c) et le NDVI (d) pour la culture de canola. Angle d'incidence compris entre 20°-40° en bande C et entre 41,7°- 42,9° en bande X.





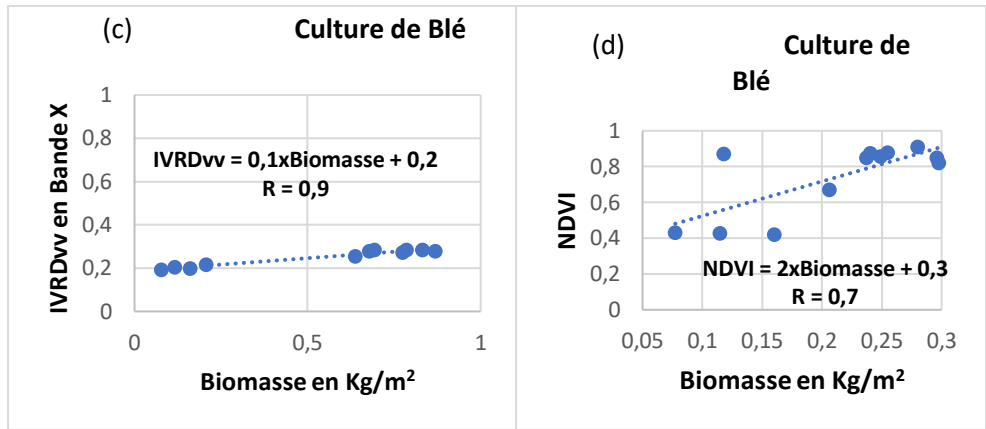


Figure 24: Corrélations entre la quantité de biomasse végétale et le RVI en bande C (a), l'IVRDvv en bande C (b), l'IVRDvv en bande X (c) et le NDVI (d) pour la culture de blé. Angle d'incidence compris entre 20°-40° en bande C et entre 41,7°-42,9° en bande X.

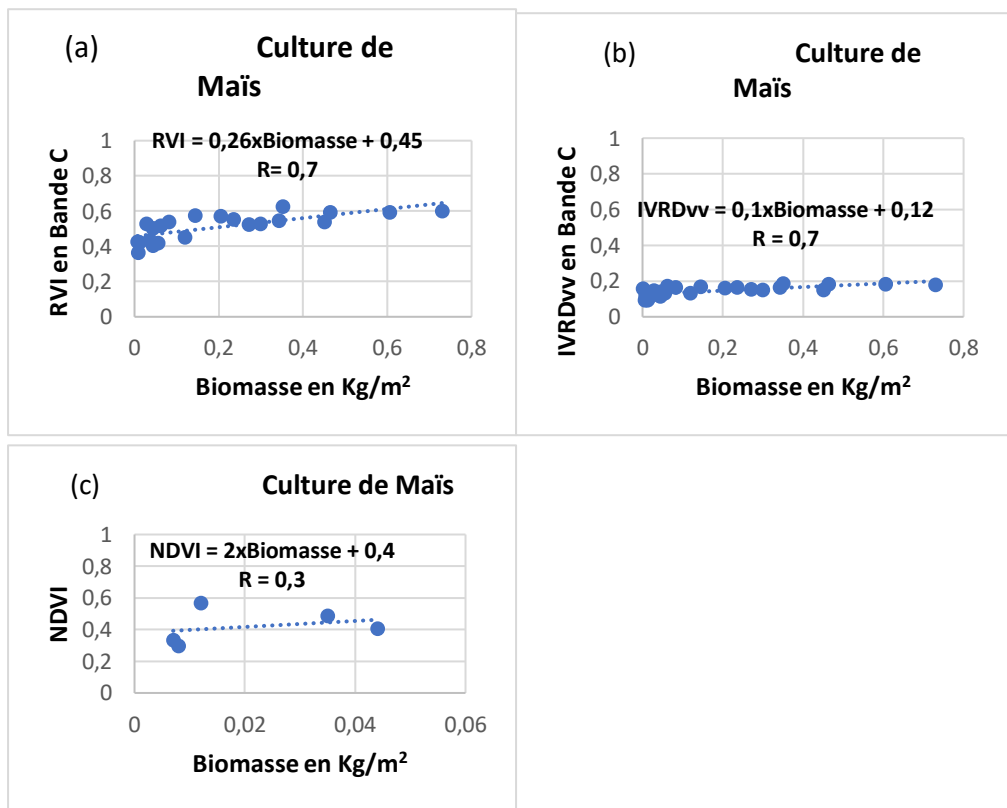


Figure 25: Corrélations entre la quantité de biomasse végétale et le RVI en bande C (a), l'IVRDvv en bande C (b) et le NDVI (c) pour la culture de maïs. Angle d'incidence compris entre 20°-40°.

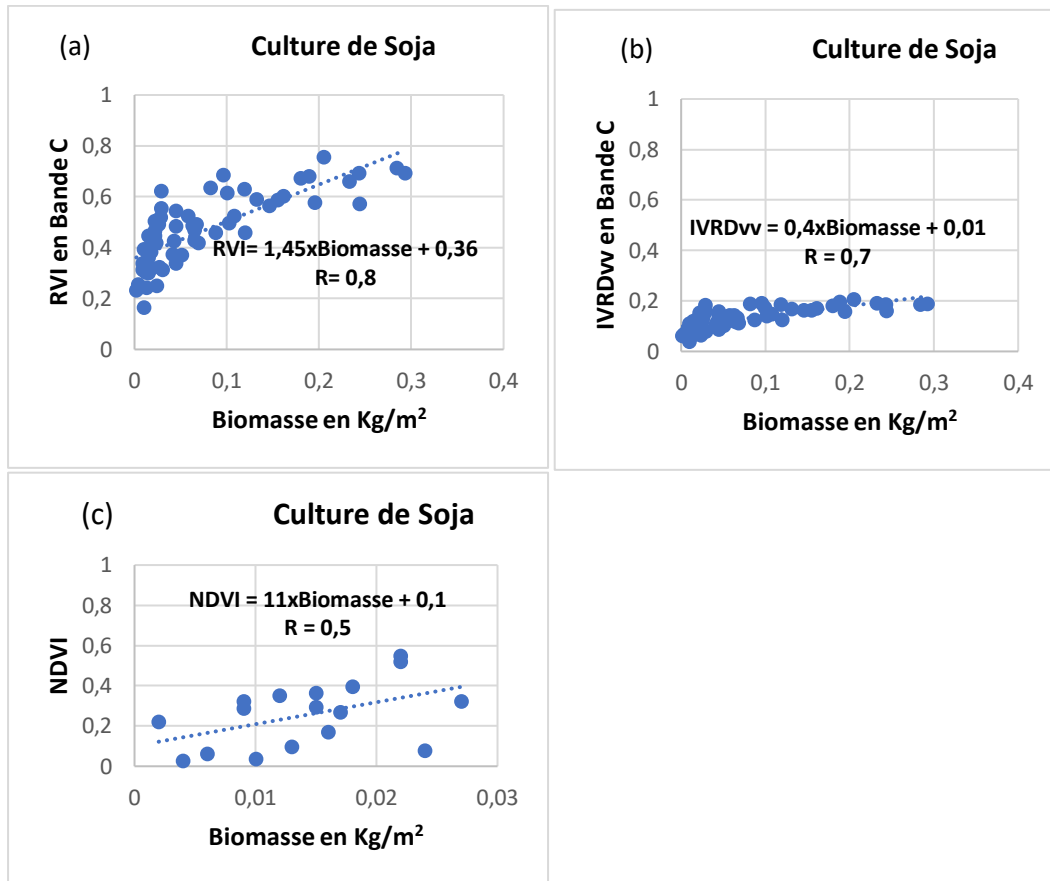


Figure 26: Corrélations entre la quantité de biomasse végétale et le RVI en bande C (a), l'IVRDvv en bande C (b) et le NDVI (c) pour la culture de soja. Angle d'incidence compris entre 20°-40°.

#### 4.2.2. Relation entre le RVI, l'IVRDvv et le NDVI

La corrélation établie entre le RVI, l'IVRDvv et le NDVI, montre que pour la culture de canola, le NDVI est beaucoup mieux corrélé à l'IVRDvv en bande X (Figure 27c) que le RVI et l'IVRDvv en bande C (Figures 27a et 27b). Pour la culture de blé, les corrélations obtenues entre le NDVI et les indices de végétation radar (RVI et IVRDvv) en bande C sont supérieures ou égales à la corrélation entre le NDVI et l'IVRDvv en bande X (Figure 27d-e-f).

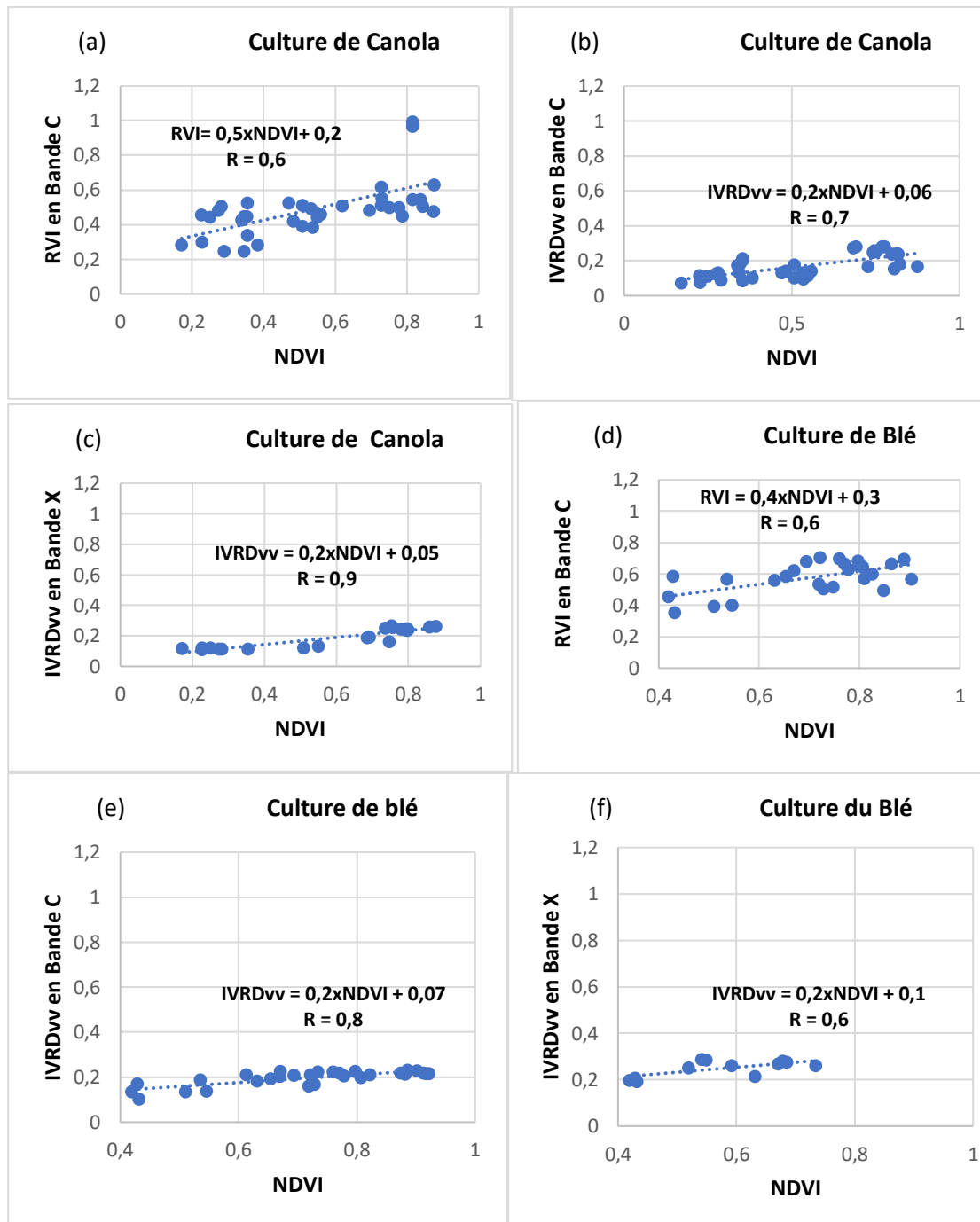


Figure 27 : Corrélation entre le RVI en bande C, l'IVRDvw en bandes C et X, et le NDVI pour les cultures de canola (a), (b) et (c) et de blé (d), (e) et (f). Angle d'incidence compris entre 20°-40° en bande C et entre 41,7°-42,9° en bande X.

Quant aux cultures de soja et de maïs (Figure 28), de fortes relations ( $R = 0,9$ ) sont remarquées entre le NDVI et les indices de végétation radar calculés en bande C.

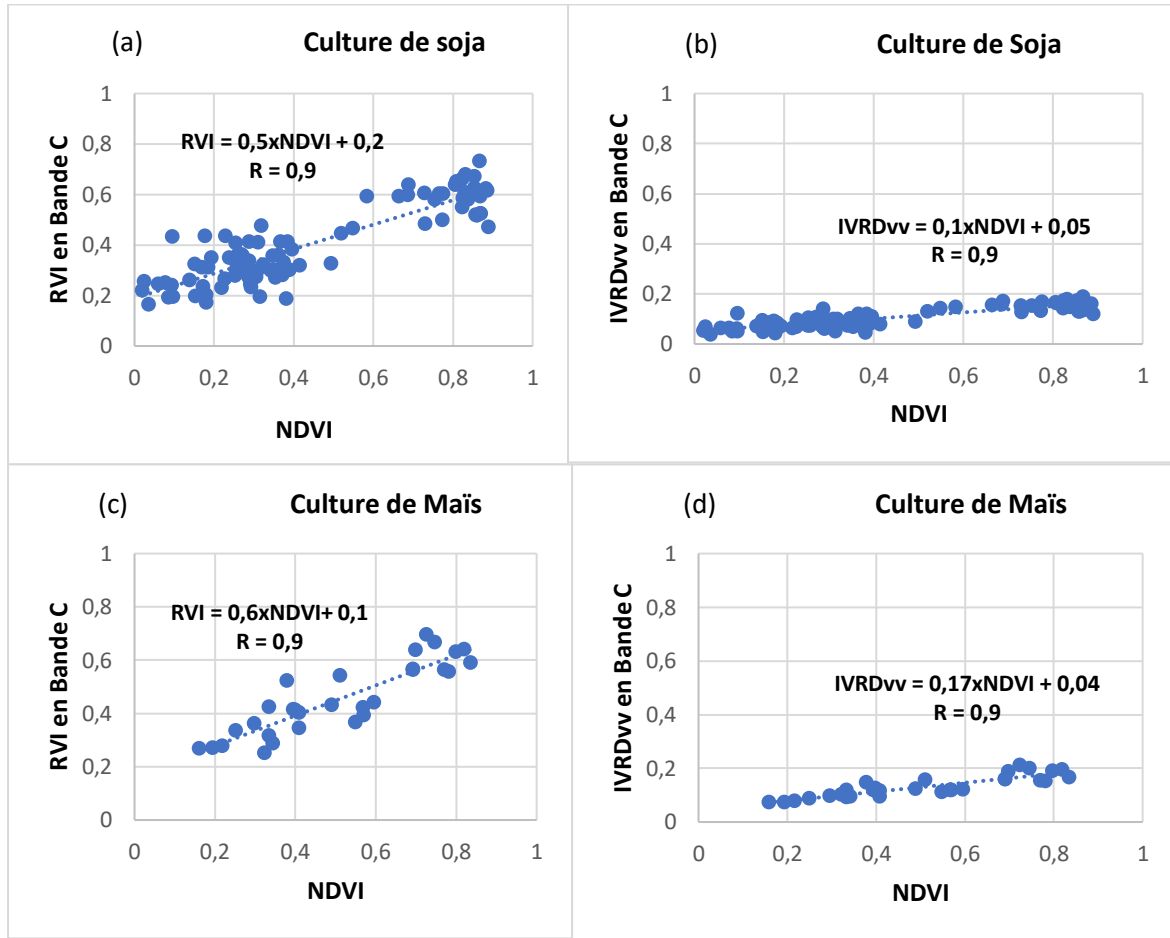


Figure 28: Corrélation entre le RVI et l'IVRDvv en bande C et le NDVI pour les cultures de soja (a) et (b) et de maïs (c) et (d). Angle d'incidence compris entre 20°-40°

## 5. Conclusion

Ce travail présenté a pour objectif de comparer l'application de la télédétection radar dans plusieurs fréquences (bandes L, C et X) à la télédétection optique pour le suivi de la croissance des cultures et l'évaluation de la biomasse. Pour cette fin, les indices de végétation radar (RVI et IVRD<sub>vv</sub>) et optique (NDVI) ont été utilisés pour étudier l'évolution des cultures de blé, de canola, de maïs et de soja.

La donnée radar en bande L s'est montrée inefficace pour effectuer le suivi de l'évolution de la croissance des cultures. En effet, les indices de végétation radar (RVI et IVRD<sub>vv</sub>) en bande L ont montré des profils temporels très similaires à celui de l'humidité du sol et une faible corrélation à la biomasse végétale indiquant que le terme de surface constitue la portion prépondérante dans l'onde rétrodiffusée. Les bandes C et X ont montré des résultats qui évaluent mieux la croissance des cultures ainsi que la variation de la quantité de la biomasse végétale, la bande X restant toutefois beaucoup mieux corrélée à celle-ci. Nos analyses ont montré que les stades de croissance, de maturité et de sénescence des cultures de blé, canola, maïs et soja peuvent être déterminés à partir des profils temporels du RVI et de l'IVRD<sub>vv</sub> en bandes C et X.

La comparaison effectuée entre l'IVRD<sub>vv</sub>, le RVI, et le NDVI a permis d'évaluer l'aptitude de ces indices à traduire l'évolution de la biomasse végétale. Pour les cultures de blé et de canola, l'IVRD<sub>vv</sub> en bande X a donné des résultats mieux corrélés à la quantité de la biomasse végétale que l'IVRD<sub>vv</sub> en bande C, le RVI en bande C et le NDVI (Figures 23-24). Pour les cultures de maïs et de soja non couvertes par la bande X, le RVI et l'IVRD<sub>vv</sub> en bande C corrélés à la biomasse ont montré des relations identiques pour le maïs; alors que pour le soja, le RVI en bande C est légèrement mieux corrélé à la biomasse que l'IVRD<sub>vv</sub> en bande C (Figures 25-26). Pour ces deux cultures l'IVRD<sub>vv</sub> et le RVI en bande C traduisent mieux la variation de la quantité de biomasse que le NDVI.

Ces résultats permettent de conclure que dans un contexte de suivi de la croissance des cultures et d'évaluation de la biomasse, la bande X du radar est mieux adaptée que l'optique. L'IVRD<sub>vv</sub> en bande X pour le blé et le canola, et le RVI et l'IVRD<sub>vv</sub> en bande C pour le maïs et le soja, évaluent mieux la quantité de biomasse végétale que le NDVI.

## 6. Références

Baig, M., Zhang, L., Shuai, T., and Tong, Q., “Derivation of a tasseled cap transform based on Landsat 8 at-satellite reflectance”, *Remote Sensing Letters*, vol.5, 423-431, 2014.

Bajwa, Sreekala G., Rupe, John C., Mason, J., “Soybean disease monitoring with leaf reflectance”, *Remote sensing*, vol.9, 127-141, 2017.

Bonn F., Rochon G., “Précis de télédétection”, *Principes et méthodes*, vol.1, 1992.

Bouvet, T., Le Toan, N., Lam-Dao, “Monitoring of the rice cropping system in the Mekong Delta using ENVISAT/ASAR dual polarization data”, *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol.47, 517-526, 2009.

Bush, T.F., Ulaby, F.T., “An evaluation of radar as a crop classifier”, *Remote sensing environment*, vol.7, 15-36, 1978.

Capodici, F., Maltese, A., Ciruolo, G., D’Urso, G., La Loggia, G., “Power sensitivity analysis of multi-frequency, multi-polarized, multi-temporal SAR data for soil-vegetation system variables characterization”, vol.9, 677, 2017.

Castel, T., Beaudoin, A., Caraglio, Y., Floury, N., Le Toan, T., Barczi, J.F., “Estimation de la ressource forestière par télédétection radar. Apport du couplage d’un modèle architectural de plantes avec un modèle théorique de rétrodiffusion”, colloque international, Université d’Ottawa, 1999.

Charbonneau, F., Trudel, M., Fernandes, R., “Use of dual-polarization and multi incidence SAR for soil permeability mapping”, *Atelier ASAR*, 2005.

Chen, D., Huang, J., Jackson, T.J., “Vegetation water content estimation for corn and soybeans using spectral indices derived from MODIS near and short-wave infrared bands”, *Remote Sensing of Environment*, vol.98, 225-236, 2005.

Delogu, E., Boulet, G., Olivoso, A., Garrigues, S., Brut, A., Tallec, T., Demarty, J., Soudani, K., Lagouarde, J.-P., “Evaluation of the SPARSE dual-source model for predicting water stress and evapotranspiration from thermal infrared data over multiple crops and climates”, *Remote sensing*, vol.10, 1806, 2018.

Escadafal, R., Huete, A., “Étude des propriétés spectrales des sols arides appliqués à l’amélioration des indices de végétation obtenus par télédétection”, *Comptes Rendus de l’Académie des Sciences, Paris, Série 2*, 1385-1391, 1991.

Gao, B., “NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space”, *Remote Sensing of Environment*, vol.58, 257-266, 1996.

Gasó, D. V., Berger, A. G., Ciganda, V.S., “Predicting wheat grain yield and spatial variability at field scale using a simple regression or a crop model in conjunction with Landsat images”, *Computers and Electronics in Agriculture*, Science Direct, vol.159, 75-83, 2019.

Gerber F., “Estimation du contenu en eau de la végétation par télédétection hyperspectrale dans le moyen infrarouge”, Thèse de doctorat, École doctorale des Sciences de la Terre, Paris, 2011.

Girard, M.C., Girard C.M., “Traitement des données de télédétection”, Éditions Dunod, 2e éd., Paris, 1999.

GSP216 Introduction to remote sensing.

[http://gsp.humboldt.edu/olm\\_2015/Courses/GSP\\_216\\_Online/lesson2-1/vegetation.html](http://gsp.humboldt.edu/olm_2015/Courses/GSP_216_Online/lesson2-1/vegetation.html)

Guyot, G., Seguin, B., “Possibilités d’utilisation de la télédétection satellitaire en agrométéorologie”, *EDP Sciences, Agronomie*, vol.8, 1-13, 1988.

Gitelson, A., “Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation”, *Journal of plant physiology*, vol.161, 165-173, 2004

Huang, Y., Walker, J. P., Gao, Y., Wu, X., Moneris, A., “Estimation of vegetation water content from the radar vegetation index at L-Band”, *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, vol.54, 981-989, 2016.

Huete, A.R., Jackson, R.D., Post, D.F., “Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds”, *Remote sensing of environment*, vol.17, 37-53, 1985.

Huete, A.R., “Vegetation indices, remote sensing and forest monitoring”. *Geography Compass*, vol.6, 513-532, 2012.

Jacquemoud, S., Féret, J.B., Ustin, S.L., “Compréhension et modélisation de la couleur des feuilles”, *École thématique interdisciplinaire du CNRS, Roussillon en Provence*, 23-27, 2009.

Jacquemoud S., Bousquet L., “Modélisation des propriétés optiques des feuilles : état de l'art, perspectives et applications en télédétection”. *Actes du 12ème Congrès de l'Association Québécoise de Télédétection*, 2005.

Joerg, H., Pardini, M., Hajnsek, I., Papathanassiou, K.P., “Sensitivity of SAR tomography to the phenological cycle of agriculture crops at X-, C-, and L-band”, *IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, vol.11, 3014-3029, 2018.

Kim, Y., Jackson, T., Bindlish, R., Hong, S., Jung, G., Lee, K., “Retrieval of wheat growth parameters with radar vegetation indices”, *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, vol.11, 2014.

- Kim, Y.H., Oh, J.H., Kim, Y.I., “Comparative analysis of the multispectral vegetation indices and the radar vegetation index”, *Journal of the Korean society of surveying, geodesy, photogrammetry and cartography*, vol.32, 607-615, 2014.
- Kim, Y., Jackson, T., Lee, H., Hong, S., "Radar vegetation index for estimating the vegetation water content of rice and soybean", *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol.9, 564-568, 2012.
- Kim, Y., Van Zyl, J., “Vegetation effects on soil moisture estimation”, *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 800-802, 2004.
- Lee, J.S., “Polarimetric radar imaging: from basics to application”, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2009.
- Lillesand, T.M., Kiefer R.W., Chipman J.W., “Remote sensing and image interpretation”, seventh edition. 2015.
- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., “Remote sensing and interpretation”, John Wiley & Sons, New York, NY, 1994.
- Lin, H., Chen, J., Pei, Z., Zhang, S., Hu, X., “Monitoring sugarcane growth using ENVISAT ASAR data”. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol.47, 2572-2580, 2009.
- Liu, M., Wang, T., Skidmore, A.K., Liu, X., Li, M., “Identifying rice stress on a regional scale from multi-temporal satellite images using a Bayesian method”, *Environmental pollution*, vol.247, 488-498, 2019
- Magagi, R., Berg, A.A., Goita, K., Belair, S., Jackson, T.J., Toth, B., Walker, A., McNairn, H., O'Neill, P.E., Moghaddam, M., Gherboudj, I., Colliander, A., Cosh, M.H., Burgin, M., Fisher, J.B., Seung-Bum Kim, Mladenova, I., Djamai, N., Rousseau, L.-P.B., Belanger, J., Jiali, S., Merzouki, A., “Canadian Experiment for Soil Moisture in 2010 (CanEx-SM10): Overview and Preliminary Results”. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 347-363, 2013.
- Mandal, D., Kumar, V., McNairn, H., Bhattacharya, A., Rao, Y.S., “Joint estimation of plant area index (PAI) and wet biomass in wheat and soybean from C-band polarimetric SAR data”, *International journal of applied earth observation and geoinformation*, vol.79, 24-34, 2019.
- Mannschatz, T., Pflug, B., Borg, E., Feger, K.-H., Dietrich, P., “Uncertainties of LAI estimation from satellite imaging due to atmospheric correction”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 153, 24–39, 2014.
- Mather, P.M., “Computer processing of remotely-sensed images”, John, W. & Sons, 1987.



McNairn, H., Jackson, T.J., Powers, J., Bélair, S., Berg, A., Bullock, P., Colliander, S., Cosh, M.H., Kim, S., Magagi, R., Pacheco, A., Merzouki, A., Hosseini, M. and Hanis-Gervais, K., “SMAPVEX16 Database Report”, 56 p, 2017.

Meyzonnette, J.L., Lepine T., “Bases de la radiométrie optique”. Éditions Cépadués. Paris, France, 2003.

Richardson A.J., Wiegand, C.L., “Distinguishing vegetation from soil background information”, photogrammetric engineering and remote sensing, 1541-1552, 1977.

SMAP Validation Experiment 2012, “Database rapport”, 40 p, 2012.

Srivastava, P.K., O'Neill, P., Cosh, M., Lang, R., Joseph, A., “Evaluation of radar vegetation indices for vegetation water content estimation using data from a ground-based SMAP simulator”, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1296-1299, 2015.

Tucker, C.J., “Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation”, Remote sensing of environment, 127-150, 1979.

Ulaby, F.T., Dobson, M.C., “Handbook of radar scattering statistics for terrain”, Atech house, 1989.

Ulaby, F. T., Moore, R. K., Fung, A. K., “Microwave Remote Sensing Active and Passive”, Atech house, vol.2, 1986.

Vaglio Laurin, G., Liesenberg, V., Chen, Q., Guerriero, L., Del Frate, F., Bartolini, A., Coomes, D., Wilebore, B., Lindsell, J., and Valentini, R., “Optical and SAR sensor synergies for forest and land cover mapping in a tropical site in West Africa”, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 21, 7-16, 2013.

Wang, H., Magagi, R., Goita, K., Trudel M., McNairn, H., and Powers J., "Crop phenology retrieval via polarimetric SAR decomposition and Random Forest algorithm", Remote sensing of environment, vol. 231, 111234 <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111234>, 2019..

Yang, H., “Remote sensing technique for predicting harvest time of tomatoes”, 3rd International Conference on Environmental Science and Information Application Technology, vol.10, 666-671, 2011.

Yuan, L., Bao, Z., Zhang, H., Zhang, Y., Liang, X., “Habitat monitoring to evaluate crop disease and pest distribution based on mutlti-source satellite remote sensing imagery”, Optik, Science Direct, vol.145, 66-73, 2017.

Yuzugullu, O., Erten, E., Hajnsek, I., “Morphology estimation of rice fields using X-band PolSAR data”, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 7121-7124, 2016

Zhou, Y., Yang, G., Wang, S., Wang, L., Wang, F., Liu, X., “A new index for mapping built-up and land areas from Landsat-8 OLI data”, Remote Sensing Letters, vol.5, 862-871, 2014.