UCLouvain

AGRO LOUVAIN

Faculté des bioingénieurs

# Suivi par télédétection du pourcentage de matière sèche des cultures de maïs en Wallonie grâce aux images SAR en bande C de Sentinel-1


Auteur : Thibault CASTIN

Promoteur : Pr. Pierre DEFOURNY

Lecteurs : Pr. Xavier DRAYE

Ir. Guy FOUCART

Dr. Julien RADOUX



Année académique 2020-2021

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de Bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement

# Remerciements

Tout d'abord je remercie mon promoteur, Pierre Defourny, pour m'avoir permis de réaliser ce mémoire. Chacune des réunions que nous avons pu avoir ont été très précieuses. Ses judicieux conseils m'ont éclairé tout au long de ce projet et m'ont permis de le mener à bien.

Je remercie aussi Jean Bouchat pour son aide lors de la campagne de terrain, sa disponibilité et le temps qu'il m'a accordé. Il s'est toujours montré très volontaire pour m'aider.

Je tiens à remercier Guy Foucart dont l'expertise m'a permis de mettre en place ma campagne de terrain.

Enfin je tiens à remercier les membres de ma famille, ma maman, qui a passé beaucoup de temps à m'aider dans la rédaction du mémoire, mon papa, qui est venu m'épauler de nombreuses fois pendant ma campagne de terrain et enfin ma soeur, pour son aide inestimable tant entre les lignes de maïs qu'entre les lignes de code.

# Table des matières

**1 Introduction** **1**

**2 Synthèse bibliographique** **2**
2.1 Maïs . . . 2
2.1.1 Importance du maïs en Wallonie . . . 2
2.1.2 Hétérogénéité du territoire wallon . . . 2
2.1.3 Croissance et développement . . . 3
2.1.4 Date de récolte . . . 5
2.2 Sentinel-1 . . . 6
2.2.1 Programme Copernicus . . . 6
2.2.2 Radar à ouverture synthétique . . . 7
2.2.3 Polarimétrie . . . 9
2.2.4 Bande de fréquence C . . . 9
2.3 Prétraitement et Logiciel . . . 10
2.3.1 Prétraitement des images . . . 10
2.3.2 Présentation du projet Sen4CAP . . . 11
2.3.3 Fonctionnement du logiciel de prétraitement de Sen4CAP . . . 12
2.4 Utilisation des images SAR . . . 14

**3 Objectifs** **16**

**4 Matériel et méthode** **17**
4.1 Matériel . . . 17
4.1.1 Source de données . . . 17
4.1.2 Zones d'étude . . . 18
4.2 Méthodologie . . . 21
4.2.1 Variables d'intérêt . . . 21
4.2.2 Campagne de terrain . . . 22
4.2.3 Méthode d'analyse . . . 25

**5 Résultats** **28**
5.1 Données de terrain . . . 28
5.2 Conditions météorologiques . . . 31
5.3 Analyse exploratoire des données de terrain . . . 32
5.3.1 Matière sèche en % . . . 33
5.3.2 Biomasse . . . 34
5.3.3 Quantité d'eau dans la canopée . . . 36
5.3.4 Leaf Area Index . . . 37
5.3.5 Matière sèche en T/ha . . . 37
5.4 Séries temporelles du signal de Sentinel-1 . . . 39

5.5 Relation entre données de terrain et mesures de Sentinel-1 . . . . . 40
5.5.1 Relation "Matière sèche - Coefficient de rétrodiffusion" . . . . . 41
5.5.2 Relation "Biomasse - Coefficient de rétrodiffusion" . . . . . 42
5.5.3 Relation "CWC - Coefficient de rétrodiffusion" . . . . . 43
5.5.4 Relation "LAI - Coefficient de rétrodiffusion" . . . . . 46
5.6 Champs de l'année 2019 . . . . . 47
5.6.1 Analyse exploratoire de la MS et du LAI . . . . . 48
5.6.2 Évolution du signal . . . . . 50
5.6.3 Lien entre les variables et le signal . . . . . 51

**6 Discussion** **53**

**7 Conclusion** **56**

# Liste des sigles

**ASC** Ascending.

**CR** Cross Ratio.

**CWC** Canopy Water Content.

**DJ** Degrés jour.

**DSC** Descending.

**EMA** Erreur moyenne absolue.

**ESA** European Spatial Agency.

**GAI** Green Area Index.

**LAI** Leaf area index.

**MNT** Modèle numérique de terrain .

**MS** Matière sèche.

**PAC** Politique Agricole Commune.

**RMSE** Root Mean Square Error.

**SAR** Synthetic Aperture Radar / Radar à ouverture synthétique.

**Sen4CAP** Sentinels for Common Agricultural Policy.

**SIGC** Système intégré d'administration et de contrôle.

**UE** Union européenne.

**UTC** Coordinated universal time / Temps universel coordonné.

**WCM** Water Cloud Model.

# Liste des figures


1 Régions agricoles en Wallonie (SPW, 2018). . . . . 3
2 Etapes d'évolution d'un ensilage (Pitt et Sniffen, 1985). . . . . 4
3 Somme des températures en base 6°C de 2003 à 2012 pour 23 stations de l'asbl Pameseb. . . . . 4
4 Illustration de la différence entre les modes ASC et DSC (Tre Altamira, 2020). . 7
5 Schéma des trois principaux types de diffusion en SAR (Irwin et al., 2019). . . . 8
6 Correction $\sigma^0$ appliquée aux images Sentinel-1 (Filipponi, 2019). . . . . 11
7 Architecture de Sen4CAP (UCLouvain/ELI-Geomatics). . . . . 12
8 Processus de génération des images d'amplitude et de cohérence (UCLouvain/ELI-Geomatics). . . . . 13
9 Emplacement des champs étudiés en 2020. . . . . 18
10 Emplacements des champs étudiés en fonction de leur région agricole (champs de 2020 en bleu et de 2019 en rouge). . . . . 21
11 Protocole de sélection des trois mètres de maïs pour la biomasse. . . . . 23
12 Dates de réalisation des collectes *in situ* de 2020 et dates de passages associées pour les mode DSC en bleu et ASC en vert. . . . . 24
13 Photos de la campagne de terrain de 2020. . . . . 25
14 Dates de réalisation des collectes *in situ* de 2019 et dates de passages associées pour les mode DSC en bleu et ASC en vert. . . . . 26
15 Pluviométrie et températures entre le 17 août et le 20 octobre 2020 (Source : Belcam). . . . . 32
16 Légende des graphiques d'évolution des variables par champ en 2020. . . . . 33
17 Evolution de la matière sèche par champ du 18/08 au 16/10 2020. . . . . 33
18 Evolution de la matière sèche moyenne du 18/08 au 16/10 2020. . . . . 33
19 Histogrammes de répartition de la matière sèche en % par passage en 2020 (la médiane est en rouge). . . . . 34
20 Evolution de la biomasse aérienne totale fraîche par champ du 18/08 au 16/10 2020. . . . . 35
21 Evolution de la biomasse aérienne fraîche moyenne du 18/08 au 16/10 2020. . . 35
22 Histogrammes de répartition de la biomasse par passage en 2020 (la médiane est en rouge). . . . . 35
23 Evolution du canopy water content (CWC) par champ du 18/08 au 16/10 2020. 36
24 Evolution du canopy water content (CWC) moyen du 18/08 au 16/10 2020. . . . 36
25 Histogrammes de répartition du CWC par passage en 2020 (la médiane est en rouge). . . . . 36
26 Evolution du LAI par champ du 18/08 au 16/10 2020. . . . . 37
27 Evolution du LAI moyenne du 18/08 au 16/10 2020. . . . . 37
28 Histogrammes de répartition du LAI par passage en 2020 (la médiane est en rouge). . . . . 37

29 Evolution de la MS par champ du 18/08 au 16/10 2020. . . . . 38
30 Evolution de la MS moyenne du 18/08 au 16/10 2020. . . . . 38
31 Histogrammes de répartition de la matière sèche en T/ha par passage en 2020 (la médiane est en rouge). . . . . 38
32 Evolution du signal de Sentinel-1 en mode DSC (VH en rouge, VV en bleu, CR en vert) entre août et octobre 2020. . . . . 39
33 Evolution du signal de Sentinel-1 en mode ASC (VH en rouge, VV en bleu, CR en vert) entre août et octobre 2020. . . . . 40
34 Augmentation du $R^2$ avec la suppression du cinquième passage pour la MS en % en mode DSC, polarisation VV. . . . . 42
35 Corrélation entre le CWC et le signal en mode DSC polarisation VV. . . . . 44
36 Corrélation entre les variables Biomasse et CWC. . . . . 45
37 Corrélation entre les variables Biomasse et MS. . . . . 46
38 Corrélation entre les variables MS et CWC. . . . . 46
39 Légende des graphiques d'évolution des variables par champ pour l'année 2019. . 48
40 Evolution de la MS par champ entre le 29/08 et le 21/09 2019. . . . . 48
41 Evolution de la MS moyenne entre le 29/08 et le 21/09 2019. . . . . 48
42 Histogrammes de répartition de la matière sèche en % par passage en 2019 (la médiane est en rouge). . . . . 49
43 Evolution du LAI par champ entre le 29/08 et le 21/09 2019. . . . . 49
44 Evolution du LAI moyenne entre le 29/08 et le 21/09 2019. . . . . 49
45 Histogrammes de répartition du LAI par passage en 2019 (la médiane est en rouge). . . . . 50
46 Evolution du signal de Sentinel-1 pour le mode DSC (VH en rouge, VV en bleu, CR en vert) entre août et septembre 2019. . . . . 50
47 Evolution du signal de Sentinel-1 pour le mode ASC (VH en rouge, VV en bleu, CR en vert) entre août et septembre 2019. . . . . 51
48 Nuage de points pour le LAI en mode ASC et polarisation VV. . . . . 52
49 Nuage de points pour la MS en mode DSC, polarisation VH en fonction de la date de passage (gauche) et des régions agricoles (droite). . . . . 52

# Liste des tableaux


1 Cumuls nécessaires en degrés-jours (base 6) entre le semis et le stade de floraison ou la récolte (Goualan, 2014). . . . . 5
2 Jours de passage de Sentinel-1 au-dessus de la zone d'étude entre août et octobre 2020. . . . . 18
3 Informations sur les champs étudiés en 2020. . . . . 20
4 Résultats de la première tournée de la campagne de terrain de 2020. . . . . 28
5 Résultats de la deuxième tournée de la campagne de terrain de 2020. . . . . 29
6 Résultats de la troisième tournée de la campagne de terrain de 2020. . . . . 30
7 Résultats de la quatrième tournée de la campagne de terrain de 2020. . . . . 30
8 Résultats de la cinquième tournée de la campagne de terrain de 2020. . . . . 31
9 Coefficients de détermination pour la relation entre le signal et la MS en %. . . . 41
10 Coefficients de détermination pour la relation entre le signal et la MS en % par passage. . . . . 42
11 Coefficients de détermination pour la relation entre le signal et la biomasse. . . . 43
12 Coefficients de détermination pour la relation entre le signal et la biomasse par passage. . . . . 43
13 Coefficients de détermination pour la relation entre le signal et le CWC. . . . . 44
14 Coefficients de détermination pour la relation entre le signal et le CWC par passage. 44
15 Coefficients de détermination pour la relation entre le signal et le LAI. . . . . 46
16 Coefficients de détermination pour la relation entre le signal et le LAI par passage. 46
17 Coefficients de détermination pour le mode ASC, sans le passage du 7 septembre et leur changement par rapport aux résultats avec ce passage (tableaux 9, 11, 13 et 15). . . . . 47
18 Coefficients de détermination pour la MS et le LAI en 2019. . . . . 51

# Chapitre 1 - Introduction

En Wallonie, les productions de viande et de lait par les bovins représentent une part importante de la production agricole. Une des principales sources de nourriture pour ces bovins est le maïs. Le maïs est semé fin avril et le choix de la date de récolte, souvent entre septembre et octobre, est un enjeu important pour l'agriculteur. Il doit récolter à une date qui maximise le rendement et les qualités nutritives du maïs. L'élément clé qui détermine ces deux variables est la teneur en matière sèche des plants. Plus le maïs reste sur pied longtemps, plus la quantité de matière sèche totale augmente. Mais, dans le même temps, un pourcentage de matière sèche trop élevé mène à une perte de rendement puisqu'une partie de la ration n'est pas digérée. Inversement, si le maïs est récolté prématurément, l'importante humidité résiduelle mène à des problèmes de conservation durant le processus d'ensilage. D'une part, la qualité du grain se détériore, entraînant une diminution du rendement, d'autre part, le silo peut être contaminé par des toxines ce qui constitue un risque pour le cheptel (Xu et al., 2019).

La prédiction d'une date de récolte optimale est donc importante pour l'élevage wallon. Il existe plusieurs techniques pour évaluer cette date, comme examiner les caractéristiques visuelles de l'état de maturité des grains ou récolter des plants dans les champs pour mesurer leur matière sèche en laboratoire. Mais ces méthodes requièrent d'aller sur place et ne permettent pas un suivi régulier de l'évolution des parcelles. Les nouvelles méthodes de télédétection ouvrent des perspectives intéressantes pour le suivi des champs en continu. En particulier grâce aux images fournies par le programme européen Copernicus. Sentinel-1, un des satellites du programme, réunit de nombreuses caractéristiques permettant d'appréhender cette problématique. Le signal de Sentinel-1 n'est pas affecté par la nébulosité, il passe au-dessus de la Wallonie tous les trois jours et est équipé d'un radar en bande C ($\lambda$ = 4 à 8 cm) sensible à l'eau contenue dans les canopées de taille faible, comme le maïs. A l'aide de cet instrument, des perspectives de suivi régulier de la matière sèche au niveau de la parcelle, deviendraient envisageables.

Ce mémoire a pour objectif de mettre au point une méthode permettant de connaître l'état d'avancement d'une parcelle de maïs grâce aux images de Sentinel-1. Pour y parvenir, le pourcentage de matière sèche et la quantité de biomasse, relevés lors d'une campagne de terrain, sont mis en relation avec les coefficients de rétrodiffusion captés par Sentinel-1. L'aboutissement de ce travail permettrait de donner aux agriculteurs des informations, quasiment en temps réel, sur l'état de leurs champs. Ce qui les aiderait à choisir, en connaissance de cause, leurs dates optimales de récolte pour chaque parcelle. Le but est d'optimiser le rendement en choisissant la date et l'ordre de récolte de champs. Ces nouvelles données compléteraient les nombreux conseils déjà accessibles sur la plateforme numérique Belcam qui exploite les systèmes d'observation de la Terre pour des applications agricoles en Belgique.

# Chapitre 2 - Synthèse bibliographique

Cette section fait le point sur l'importance de la culture du maïs en Wallonie et de ses enjeux pour l'agriculture et la production de viande. Elle détaille ensuite le fonctionnement du satellite Sentinel-1 et la manière dont ses images sont traitées. Enfin, cette section recense certains travaux antérieurs qui mettent en évidence le potentiel de Sentinel-1 pour le suivi de parcelles de maïs.

## 2.1 Maïs

### 2.1.1 Importance du maïs en Wallonie

En 2017, la Wallonie a produit 50 000 tonnes de viande bovine (Petel et al., 2018) et 1,241 million de litres de lait. Cette même année, le nombre de bovins présents sur ce territoire est estimé à 1,2 millions (Petel et al., 2018). La production de lait représente 23 % de la valeur de la production agricole et horticole wallonne (Filagri, 2018) et la production de viande 22 %.

En Wallonie, le maïs représente une source importante de nourriture pour le bétail. En effet, la composition de la ration des bovins blanc bleu belge (84 % des bovins élevés pour la viande en Wallonie (Filagri, 2020)) en phase de croissance peut varier entre 18 % (intensif) et 52 % (semi-intensif) de maïs (Petel et al., 2018). Il existe plusieurs variétés de maïs pouvant être divisées en deux grandes classes : les variétés grain et les variétés fourrage. En Belgique, la production de maïs grain est limitée, seulement 5 500 hectares en Wallonie en 2019 contre 53 000 hectares de maïs fourrage (Statbel, 2019), soit un total de 8 % de la surface agricole utile pour ces deux classes.

Cette plante contient 200 g de cellulose par kg de matière sèche. Cette valeur est très élevée si on la compare au blé par exemple (28 g/kg de matière sèche). Le maïs est utile pour équilibrer les rations alimentaires basées sur l'herbe ou les fourrages grossiers. En effet, augmenter la part de fibres telle que la cellulose permet de limiter les risques d'acidose. L'acidose est un trouble métabolique caractérisé par une trop grande production d'acide lactique due à un excès de matière fermentescible dans la ration. L'ajout de matière qui fermente, riche en fibre et pauvre en sucre, réduit donc ce risque.

### 2.1.2 Hétérogénéité du territoire wallon

Le maïs ne se cultive pas de la même manière partout en Wallonie. C'est une plante qui a besoin de chaleur et qui ne résiste pas au gel. Le maïs pousse donc très bien dans les régions limoneuses et sablo-limoneuses mais peine à atteindre les sommes de température (voir section 2.1.3) nécessaires à son développement dans les régions plus en altitude et donc plus fraîches comme l'Ardenne ou la Fagne (figure 1).

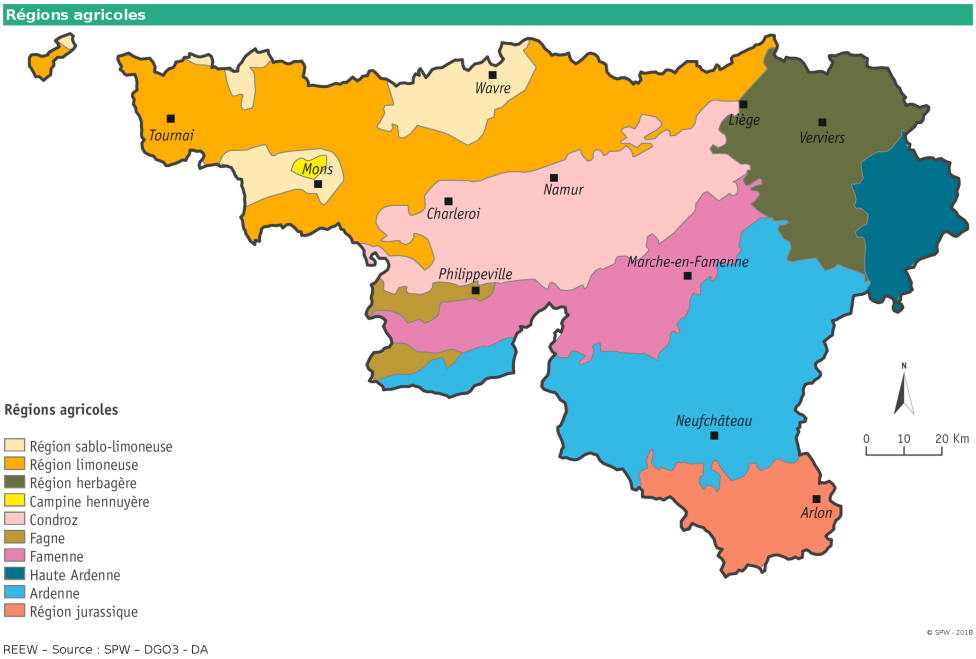



*Figure 1 – Régions agricoles en Wallonie (SPW, 2018).*

### 2.1.3 Croissance et développement

Le maïs (*Zea Mays* L.) est une plante originaire d'Amérique centrale de la famille des Poacées. Le maïs grain peut-être utilisé pour l'alimentation humaine, le maïs fourrage est exclusivement destiné aux animaux après avoir subi un processus d'ensilage. L'ensilage est une pratique agricole permettant de conserver les végétaux produits durant la saison de culture tout en les rendant plus digestes. Après la récolte, les végétaux sont finement hachés puis tassés pour limiter la présence d'oxygène. Une fois le silo bâché, le processus de fermentation démarre. L'ensilage est effectué en anaérobiose ce qui empêche sa dégradation par la flore microbienne. Au début, l'oxygène résiduel dans le silo réagit avec les sucres pour produire du dioxyde de carbone, de l'eau et de la chaleur. Une fois l'anaérobiose atteinte, les bactéries lactiques prennent le relais et acidifient le milieu jusqu'à un pH proche de 4 ce qui permet de stabiliser le silo et assurer sa conservation. Ce processus doit durer minimum entre 30 et 45 jours avant la réouverture du silo afin d'éviter les problèmes de conservation et de maladie. S'il y a une présence d'air ou peu de glucides, l'acidification se fait trop lentement et le silo peut être infecté par des bactéries butyriques. Ce phénomène, appelé déviation fermentaire, peut créer des problèmes de digestion chez l'animal.

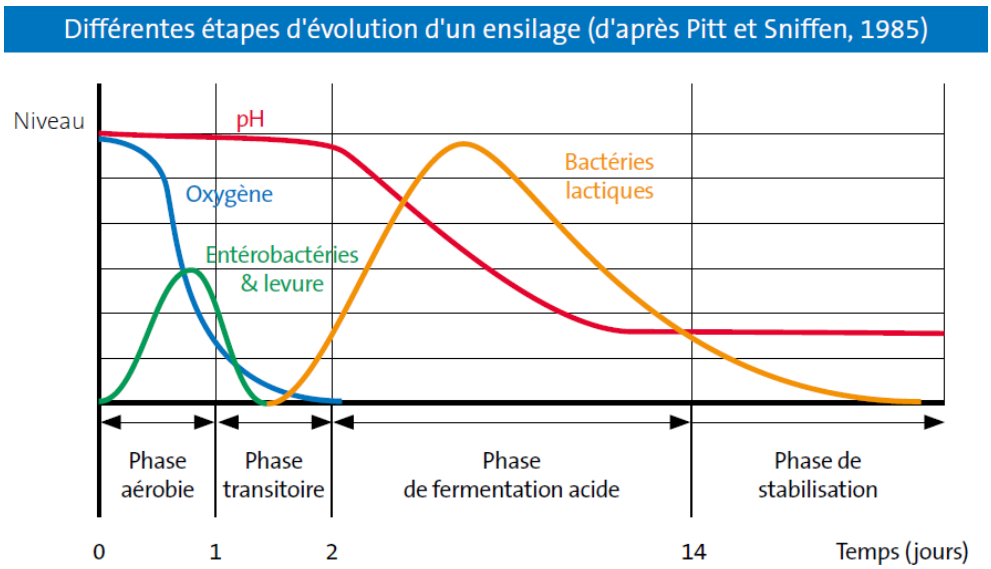



*Figure 2 – Etapes d'évolution d'un ensilage (Pitt et Sniffen, 1985).*

Le maïs étant une plante tropicale qui fixe le carbone en C4, elle est particulièrement adaptée aux climats chauds. Ainsi, selon la variété, le maïs requiert entre 1 340 et 1 760 degrés-jours (voir équation 1) pour atteindre sa pleine maturité (tableau 1). En Belgique, la saison de culture est assez courte, c'est un frein au développement de la culture du maïs grain. Le tableau 1 montre que les variétés grain requièrent des températures plus élevées que les maïs destinés au fourrage.

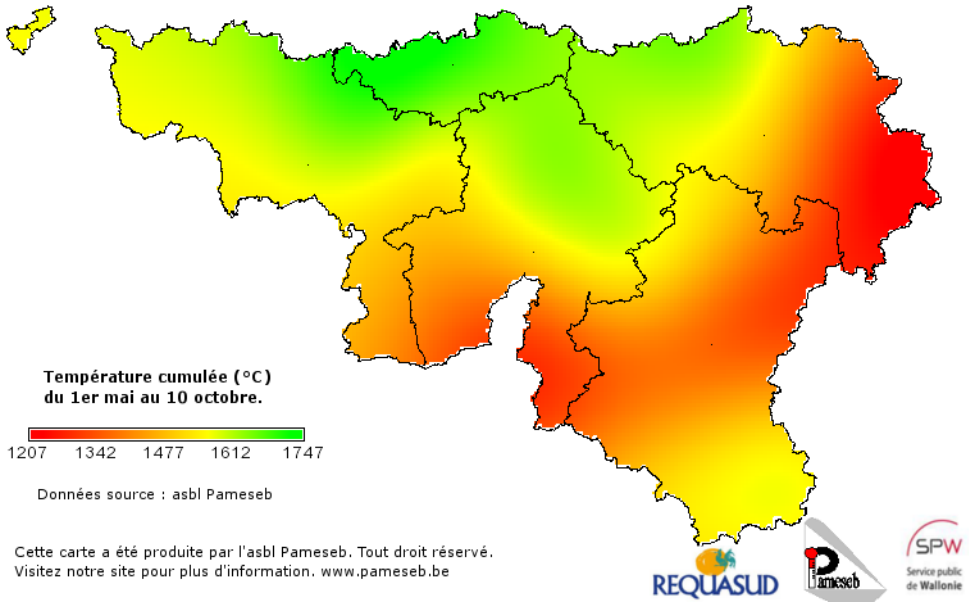



*Figure 3 – Somme des températures en base 6°C de 2003 à 2012 pour 23 stations de l'asbl Pameseb.*

Le maïs est semé fin avril/début mai et est récolté en septembre/octobre. Fin avril le risque de gelée est encore bien présent et Lambert et al. (2014) estiment qu'après le $1^{er}$ mai, chaque jour

de retard du semis diminue le rendement de 100 kg de matière sèche par hectare.

*Tableau 1 – Cumuls nécessaires en degrés-jours (base 6) entre le semis et le stade de floraison ou la récolte (Goualan, 2014).*

| **Groupe de précocité (fonction de la variété)** | **Stade de floraison** | **Ensilage - stade 30 % MS** | **Récolte grain 35 % humidité du grain** |
|---|---|---|---|
| Très précoce | 790 à 835 | 1 340 à 1 410 | 1 525 à 1 625 |
| Précoce | 825 à 870 | 1 390 à 1 470 | 1 630 à 1 650 |
| | | | **32 % humidité du grain** |
| Demi-tardif | 975 à 1 020 | 1 600 à 1 670 | 1 830 à 1 925 |
| Très tardif | 1 020 à 1 070 | 1 690 à 1 760 | 1 930 à 2 050 |

### 2.1.4 Date de récolte

Le moment de récolte du maïs est un moment clé pour l'agriculteur. En effet, plus le maïs reste longtemps sur pied, plus le rendement est élevé et la matière sèche dans la plante augmente. Mais un taux de matière sèche trop élevé mène à une diminution de la digestibilité et à une mauvaise conservation dans le silo (Moquet et Ferard, 2018). Idéalement, la récolte doit se faire entre 30-35 % de matière sèche.

La prise d'échantillons de maïs permet de connaître le taux de matière sèche du champ. Mais cette méthode est fastidieuse et difficile à réaliser de manière récurrente.

Une autre méthode se base sur la somme des températures. Elle consiste à additionner au fil des jours, la moyenne des températures extrêmes de la journée, dont on a retranché 6°C (équation 1). En-dessous de 6°C la plante ne se développe pas, cette température correspond donc au 0 de croissance de la végétation (Goualan, 2014). Cette somme est effectuée entre le semis et la récolte. C'est un outil utile pour prévoir la date de récolte. Une fois que la somme requise pour une variété est atteinte, la plante est prête à être récoltée. La température cumulée est trouvée selon la formule :

$$T^{Cumul}[DJ] = \sum_{i=1}^{n} (\frac{T_i^{max}[°C] + T_i^{min}[°C]}{2} - T^{base}[°C]), \quad (1)$$

avec $T^{max}$ la température maximum de la journée, $T^{min}$ la température minimale de la journée, $T^{base}$ correspondant au zéro de végétation soit 6°C et $T^{Cumul}$ la somme de températures exprimée en degrés jour (DJ) entre le semis et la récolte.

Cependant, cet indicateur a de nombreuses limites notamment en cas de stress hydrique. La plante n'est pas capable de se développer malgré la chaleur. La sécheresse au moment de la floraison de la fleur femelle rend également difficile l'évaluation de la matière sèche dans la plante au moment de la récolte (Omafra, 2016).

Il faut aussi souligner que dans les faits, les agriculteurs définissent la date de récolte en fonction de leur organisation, notamment selon la disponibilité des machines de récolte ou des entrepreneurs qui récoltent pour eux. Si ses silos sont presque vides, un agriculteur peut aussi être amené à récolter plus tôt. Enfin, une météo pluvieuse peut bloquer, durant plusieurs semaines, la récolte. De fait, un sol détrempé empêche le passage des engins agricoles et récolter un maïs trop humide (supérieur à 70 % d'humidité) rend le silo vulnérable à une fermentation nocive due à Clostridium (Omafra, 2016). L'ensilage contient alors une quantité plus élevée d'acide butyrique qui peut mener à l'acidose chez les vaches. L'excès d'humidité permet aussi au mildiou de se développer (Xu et al., 2019). Celui-ci produit de l'aflatoxine, toxique pour les animaux et pour les humains, pouvant se retrouver dans le lait des vaches laitières (Lafont et al., 1980).

## 2.2 Sentinel-1

### 2.2.1 Programme Copernicus

Copernicus est un programme européen d'observation de la Terre par satellite développé par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) et financé par l'Union européenne (UE). Il offre des services d'information basés, tant sur l'observation de la Terre par des satellites que sur des données collectées *in situ* (non spatiales). Ces services sont disponibles gratuitement et aident les prestataires de services, les autorités publiques et les autres organisations internationales à améliorer la qualité de vie des citoyens européens (Copernicus, 2020).

Dans le cadre de ce programme, de nombreux satellites ont été mis en orbite de la Terre. Les deux satellites destinés à la surveillance du sol sont actuellement opérationnels, Sentinel-1 et 2 (Sentinel-3 étant surtout utilisé pour caractériser les océans et Sentinel-4 et 5, l'atmosphère).

La mission Sentinel-1 forme une constellation de deux satellites. Le premier satellite, Sentinel-1A, a été lancé en 2014 et le deuxième, Sentinel-1B, a été lancé en 2016. Ces satellites sont présents sur une orbite héliosynchrone à 693 km de la Terre. Ils passent à proximité des pôles et ont un temps de retour de 12 jours à l'équateur. Ce temps de retour diminue quand la latitude augmente, cette diminution est due à la convergence des orbites. Un radar à ouverture synthétique (SAR) est embarqué à bord des satellites. La surface de la Terre balayée en un passage par ce dernier, appelée la fauchée, a une largeur de 250 km (Earth Observing System, 2014).

Chaque satellite de Sentinel-1 peut couvrir la terre en mode ascending (ASC) et descending (DSC) (figure 4). Ces modes correspondent au sens de rotation du satellite autour de la Terre et résultent en des angles d'observation différents. Les satellites couvrent la Belgique en mode

ASC vers 17h15, heure UTC soit vers 19h15 heure locale en été (UTC +2) et passent en mode DSC vers 5h30 UTC soit 7h30 heure locale. Ce deuxième mode est donc susceptible d'être affecté par la rosée qui peut être encore présente sur les plantes lorsque les jours raccourcissent et que la température diminue, à partir d'octobre par exemple.

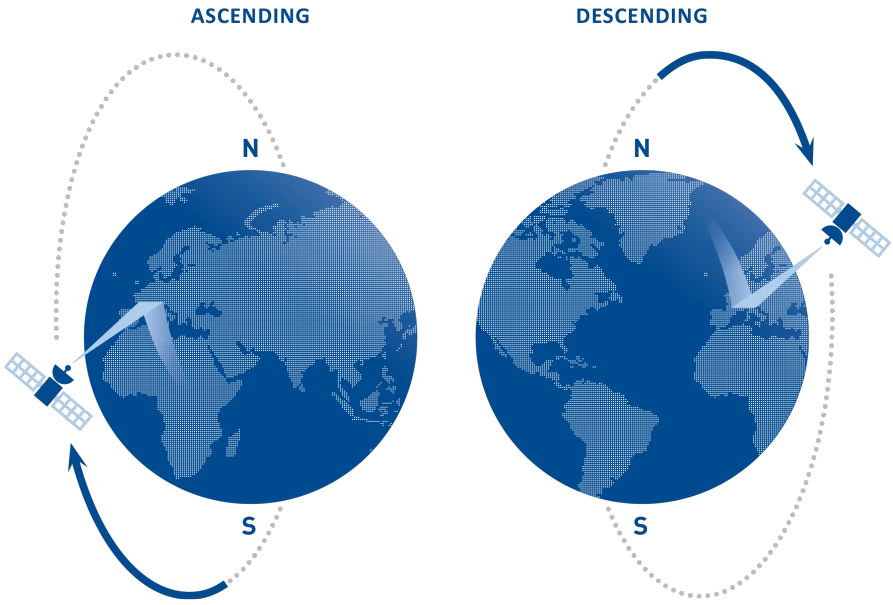



*Figure 4 – Illustration de la différence entre les modes ASC et DSC (Tre Altamira, 2020).*

La mission Sentinel-2 est aussi une constellation de deux satellites en orbite héliosynchrone (786 km d'altitude). Un imageur multispectral fonctionnant dans 13 bandes spectrales allant du visible au moyen infrarouge est embarqué à bord de chaque module. Contrairement aux images radars, les images des domaines visible et infrarouge sont sensibles aux conditions météorologiques.

### 2.2.2 Radar à ouverture synthétique

Un radar à ouverture synthétique est un radar monté sur une plateforme mobile. Tout comme un radar conventionnel, il émet des ondes électromagnétiques qui sont captées par l'antenne du radar après avoir interagi avec le milieu. Il s'agit donc d'un capteur actif qui peut fournir des images jour et nuit. Chaque point au sol est illuminé plusieurs fois grâce au déplacement de la plateforme. La combinaison de ces différents signaux enregistrés pour un même point permet la construction d'une image à haute résolution. Ce qui revient à avoir une antenne beaucoup plus grande que celle utilisée en réalité. L'antenne virtuelle qui est ainsi synthétisée est donc beaucoup plus grande que l'antenne physique.

On distingue les configurations monostatiques où l'émetteur et le receveur sont au même endroit (colocalisés) et les configurations bistatiques, si récepteur et émetteur sont séparés spatialement.

La polarimétrie monostatique est la plus couramment utilisée en SAR (c'est le cas de Sentinel-1) et le mode bistatique est plutôt utilisé en télédétection optique. A l'exception de la campagne BELSAR en Belgique, très peu d'expériences ont réussi à collecter correctement des données bistatiques en SAR (Olivier et Quegan, 2014).

L'image radar est une image complexe, la mesure associée à chaque pixel est constituée de deux parties : une partie réelle et une partie imaginaire. A partir de ces deux paramètres, les informations d'amplitude et de phase sont extraites.

L'amplitude caractérise la réflectivité du pixel (Hachemi et al., 2009). Elle est exploitable directement et comparable à une image optique. La fraction de l'onde incidente qui est retournée dans la direction d'où elle provient, donc qui retourne vers le radar, est appelée coefficient de rétrodiffusion. Celui-ci est compris entre 0 et 1. En prenant le logarithme de ce dernier, il est exprimé en une unité plus lisible, le décibel (dB). L'amplitude du signal reçu dépend des propriétés du sol (le signal est plus ou moins réfléchi, transmis ou diffusé) et correspond à la quantité de lumière revenant vers le satellite. Par exemple, une zone lisse a tendance à réfléchir le signal comme un miroir et si la surface n'est pas perpendiculaire au faisceau, le signal ne revient pas au radar. La zone lisse apparaît alors sombre sur l'image d'amplitude. A l'opposé, les surfaces rugueuses et les pentes dirigées vers le satellite apparaissent lumineuses (Augier, 2020).

Trois processus de diffusions existent : la diffusion surfacique, volumique et celle due à l'effet de *double bounce*. La rugosité influence la diffusion de surface, la diffusion de volume est due à la présence d'objets à la surface du sol et l'effet de *double bounce* est créé par le rebond du signal sur la surface puis sur les éléments volumiques, et inversement (Ferro et al., 2011). Ce sont les principaux mécanismes qui jouent un rôle sur la diffusion et, par conséquent, sur le coefficient de rétrodiffusion.

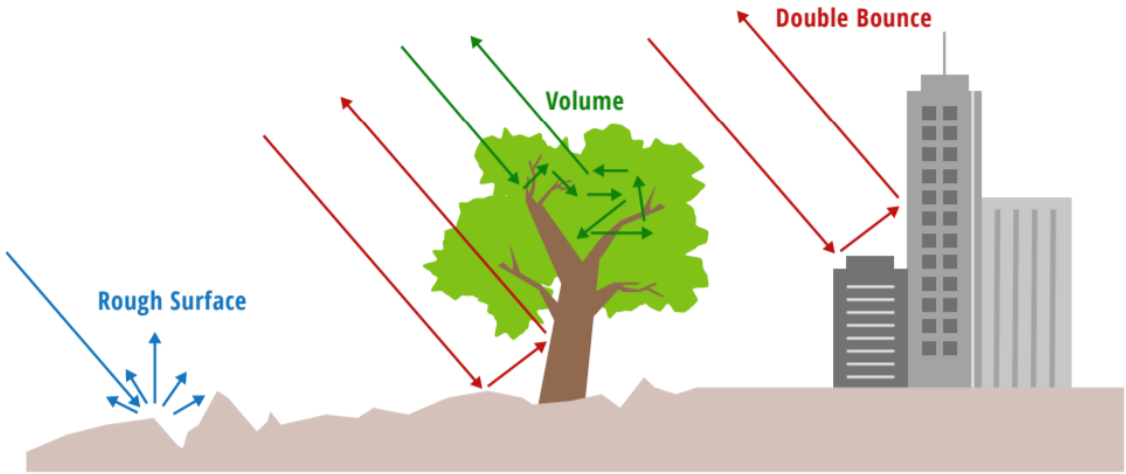



*Figure 5 – Schéma des trois principaux types de diffusion en SAR (Irwin et al., 2019).*

La phase correspond au déphasage entre l'onde radar rétrodiffusée et l'onde de référence générée par l'horloge du satellite (Augier, 2011). Elle est comprise entre 0 et $2\pi$ et n'est pas exploitable en tant que telle car une image de la phase ressemble juste à une image bruitée. elle est cependant exploitable par la technique d'interférométrie.

L'idée de l'interférométrie est de comparer, pour un même endroit, deux images radars prises d'une position un peu différente ou à un moment différent. Puisque la phase de chaque pixel de l'image SAR contient des informations précises, il est possible de détecter et de mesurer des différences millimétriques dans la longueur du chemin optique (IEEE, 2013). Cette précision est indépendante de la distance entre le capteur et l'objet. Ce qui en fait un outil particulièrement utile, notamment pour caractériser la topographie de surface.

Lors de l'analyse en interférométrie, lorsque deux images sont prises à un moment différent, si des éléments de la surface ont bougé de quelques centimètres entre les acquisitions, alors la cohérence entre les deux images est perdue et l'analyse avec l'interférométrie n'est plus possible. Le principe de l'interférométrie différentielle est de détecter les changements de phases entre les différentes acquisitions pour mesurer, par exemple, les déplacements de la surface de la Terre (Carnec, 1993).

### 2.2.3 Polarimétrie

La polarimétrie permet de trouver des variables quantitatives (par exemple la densité de végétation) et qualitatives (par exemple le type de végétation) de la surface en étudiant la polarisation des ondes électromagnétiques. Mesurer la matrice de diffusion complète permet de construire une observation sensible à la forme, l'orientation et aux propriétés diélectriques de la rétrodiffusion produite par la surface. Ce qui permet de développer des modèles pour identifier et/ou discriminer les mécanismes de diffusion qui se produisent au sein d'un même pixel. La matrice complète peut être mesurée en émettant deux ondes avec une polarisation orthogonale (H, horizontale et V, verticale) et en réceptionnant l'onde rétrodiffusée dans deux polarisations orthogonales, souvent les mêmes que pour l'émission (Jong-Sen Lee et al., 2001).

### 2.2.4 Bande de fréquence C

Une bande correspond à une partie du spectre électromagnétique caractérisée par sa longueur d'onde ou sa fréquence. Plusieurs bandes peuvent être utilisées sur les SAR. Sentinel-1 est uniquement équipé d'un instrument en bande C. Cette bande correspond à la partie du spectre électromagnétique de longueur d'onde comprise entre 4 et 8 cm. Sentinel-1 fonctionne à une longueur d'onde de 5,5 cm correspondant à une fréquence centrale de 5,4 GHz. En général, plus la longueur d'onde est grande, plus le signal pénètre dans la matière. Avec sa longueur d'onde, la bande C est la plus sensible à la biomasse des canopées de faible densité (Irwin et al., 2019).

Les nuages, la fumée et la brume n'ont pas d'influence sur la prise de mesure dans les longueurs

d'onde de la bande C (Mandal et al., 2019). Cependant, s'il pleut en même temps que la prise de mesure, alors le signal radar est atténué. La bande X est particulièrement sensible aux gouttes de pluie (Chen et al., 2017), c'est aussi le cas pour la bande C (Aydin et Giridhar, 1992). L'eau contenue dans le sol agit sur la permittivité, ce paramètre modifie l'interaction entre le signal et la surface (Bériaux et al., 2011). L'humidité du sol joue donc un rôle sur le coefficient de rétrodiffusion.

## 2.3 Prétraitement et Logiciel

### 2.3.1 Prétraitement des images

Les images prises par Sentinel-1 sont des données brutes et doivent être corrigées avant de pouvoir être utilisées. Les produits, dits de niveau 0, livrés par l'ESA ont subi deux étapes importantes : l'étalonnage/calibration qui assure que la valeur d'intensité représente bien la valeur de rétrodiffusion et le géoréférencement qui assure que chaque pixel de l'image SAR est associé à la bonne position au sol.

Généralement, les images présentent des déformations géométriques, notamment dues au relief. Les zones à l'ombre du signal radar ne sont pas recensées par celui-ci, ce qui entraîne une compression des pentes. Sans traitement, les variations du signal risquent d'être influencées majoritairement par le dénivelé et pas par la surface. C'est pourquoi les images de niveau 1, dérivées des images de niveau 0, sont en plus, corrigées en fonction du relief.

Deux types d'images de niveau 1 sont téléchargeables sur le site du programme Copernicus. Elles sont appelées Single Look Image (SLC) et Ground Range Detected (GRD). Les premières préservent l'information sur la phase alors que les secondes contiennent uniquement l'amplitude.

Des corrections plus pointues peuvent être appliquées par la suite. En effet, le fonctionnement du radar en lui-même crée des déformations. D'une part, un effet Doppler est présent puisque le radar est en mouvement. D'autre part, les bords de la bande de fauchée paraissent plus éloignées du capteur que ceux au nadir du satellite ce qui engendre une déformation cylindrique de l'image.

Un autre effet omniprésent sur les images SAR est l'effet de chatoiement (ou tavelure ou *speckle* en anglais) qui est causé par les nombreux éléments présents sur un pixel. La valeur détectée est la moyenne de tous ces éléments. Leur orientation étant aléatoire, les valeurs rétrodiffusées fluctuent (Olivier et Quegan, 2014). Le chatoiement apparaît dans les zones où la longueur d'onde du radar est comparable à la rugosité de surface (IEEE, 2013).

La chaîne de prétraitement montrée à la figure 6 corrige au mieux ces effets. Cette chaîne correspond aux corrections appelées $\sigma^0$. C'est la chaîne utilisée par le projet Sen4CAP.

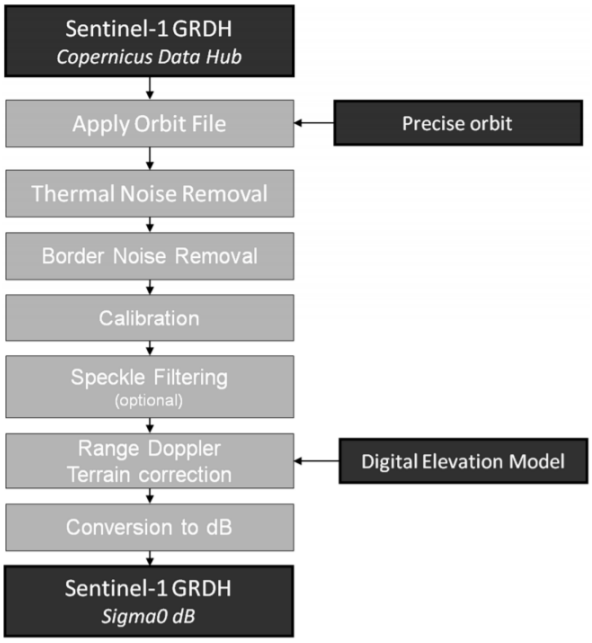



*Figure 6 – Correction $\sigma^0$ appliquée aux images Sentinel-1 (Filipponi, 2019).*

### 2.3.2 Présentation du projet Sen4CAP

Sentinels for Common Agricultural Policy (Sen4CAP) est un projet visant à fournir aux Européens, et plus particulièrement aux décideurs de la politique agricole commune (PAC), des algorithmes validés et d'autres services issus de l'observation de la Terre pour suivre les pratiques agricoles. Une attention particulière est portée à la manière dont les informations fournies par Sentinel-1 et 2 peuvent soutenir la modernisation et la simplification de la PAC dans la période post 2020 (UCLouvain, 2020). Une réforme de la PAC est prévue en 2023 par le Conseil de l'Union européenne et compte élever les objectifs environnementaux. L'utilisation du programme Copernicus permet de mieux suivre l'effet des mesures prises par le Conseil (Conseil européen, 2020).

La PAC vise à améliorer la productivité agricole européenne de manière durable tout en garantissant un niveau de vie décent aux agriculteurs au sein de l'UE. Dotée d'un budget annuel d'environ 59 milliards d'euros, la PAC renforce la compétitivité et la durabilité de l'agriculture en Europe par une série de mesures comprenant des paiements directs, des interventions sur les marchés économiques et le développement de la ruralité. La plus grande partie du budget de la PAC est gérée et contrôlée par son système intégré d'administration et de contrôle (SIGC). Cet outil protège les finances de la PAC et aide les agriculteurs à soumettre leurs déclarations. Sen4CAP joue un pour réduire les coûts de fonctionnement et pour faire évoluer le SIGC d'un système de contrôle à un système de suivi (ESA, 2020).

Une manière de faire évoluer le SIGC est de lui fournir des informations et des analyses fiables. Sen4CAP ne sert donc pas juste à produire des images issues des satellites Sentinels mais fournit

aussi des informations pratiques (tableaux, bases de données) qui peuvent être recoupées avec les déclarations de l'agriculteur. Par exemple, les produits actuellement développés dans le cadre du projet sont : carte des types de cultures, du fauchage des prairies, des indicateurs de l'état de la végétation, un outil de suivi des pratiques agricoles, ainsi que des services de visualisation interactive pour l'imagerie satellite.

### 2.3.3 Fonctionnement du logiciel de prétraitement de Sen4CAP

Un aspect important du projet Sen4CAP est la mise en place et la maintenance des chaînes de prétraitement des images Sentinel-1 et 2. La figure 7 montre l'architecture et les différentes composantes présentes dans Sen4CAP.

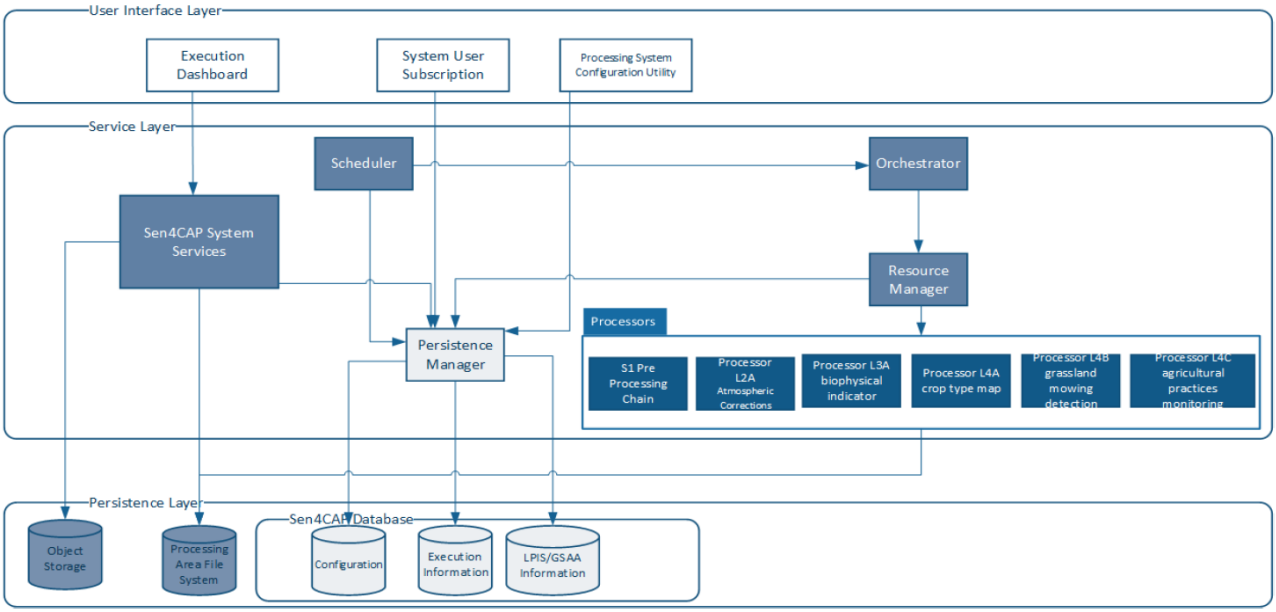



*Figure 7 – Architecture de Sen4CAP (UCLouvain/ELI-Geomatics).*

Le *user interface layer* permet l'utilisation interactive des fonctions du logiciel Sen4CAP, il fait le lien entre l'utilisateur et le programme. Le *service layer* sert, entre autres, à gérer les téléchargements et à déclencher les chaînes de prétraitement. L'*orchestrator* lance l'exécution des processeurs de Sen4CAP, vérifie le nombre de demandes d'exécution, détermine la chaîne de traitement à lancer, surveille l'exécution de l'étape en cours dans les chaînes de traitement et décide quelle étape doit être exécutée ensuite. Le *resource manager* est en charge de l'exécution simultanée des différents travaux par les processeurs. Le *scheduler* est responsable, via l'*orchestrator*, de l'exécution de tâches planifiées pour fonctionner en temps quasi réel ou en différé. Ceci permet de définir certaines tâches qui sont effectuées lorsque toutes les informations d'entrée sont disponibles. C'est utile si des travaux doivent être effectués tous les mois ou lorsqu'une tâche nécessite deux images prises à des moments différents. Par exemple, deux images sont nécessaires pour produire la carte de cohérence de Sentinel-1 (utile en interférométrie) et il faut attendre 6 jours à l'équateur, 3 sous nos latitudes, pour avoir la deuxième image.

Le prétraitement d'une image fonctionne de la manière suivante : une région d'intérêt (choisie par l'utilisateur) est donnée au processeur, celui-ci croise cette région avec les surfaces observées par Sentinel-1 et prétraite les images qui couvrent la zone d'intérêt. Les images sélectionnées sont ensuite utilisées pour créer les cartes d'amplitude et de cohérence. La figure 8 montre comment le processeur dédié au prétraitement de Sentinel-1, produit ces cartes. On remarque que deux polarisations sont disponibles sur l'image d'amplitude, les polarisations VV et VH.

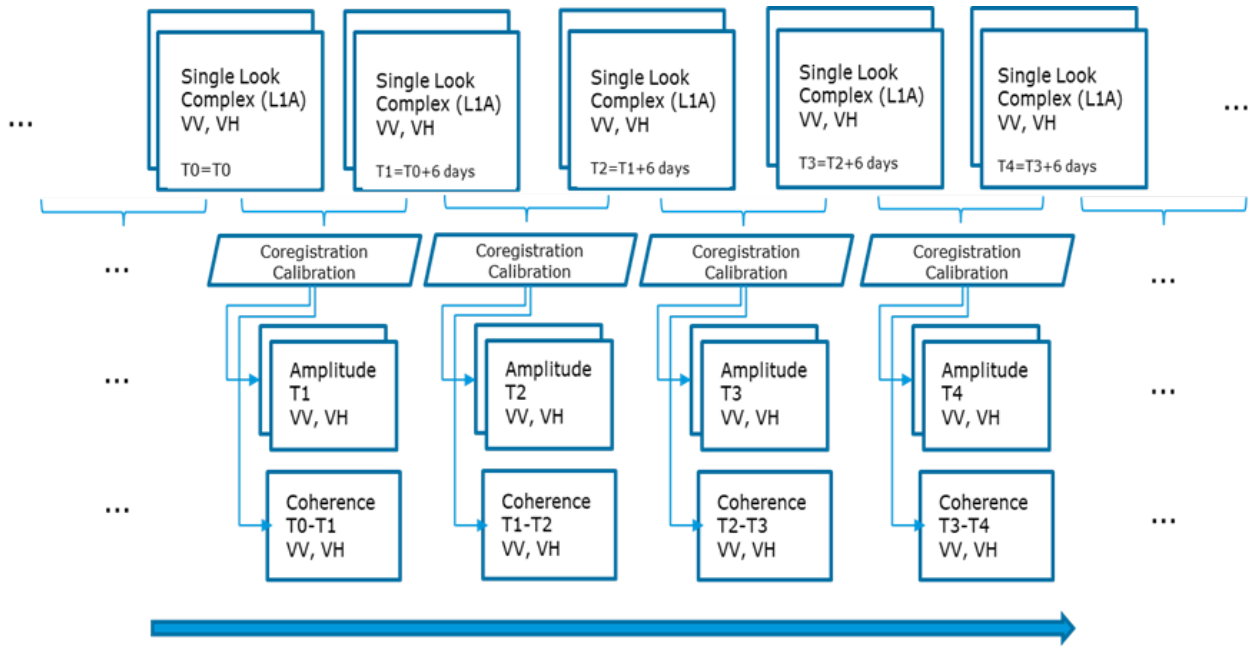



*Figure 8 – Processus de génération des images d'amplitude et de cohérence (UCLouvain/ELI-Geomatics).*

Les images produites sont stockées dans la base de données de Sen4CAP. L'équation 2 montre comment est calculée l'image de cohérence. Les images de Sentinel-1A et 1B sont utilisées indifféremment, car les deux capteurs étant identiques, les valeurs qu'ils mesurent sont comparables. L'image maîtresse (équation 2) est actuellement définie sur Sentinel-1B.

$$\gamma = \frac{|\{s_1 s_2^*\}|}{\sqrt{\{s_1 s_1^*\}\{s_2 s_2^*\}}}\ ,\ 0 \leq \gamma \leq 1 \tag{2}$$

$\gamma$ est le coefficient de corrélation complexe, aussi appelé cohérence, $s_1$ est l'image maîtresse, $s_2$ est la seconde image utilisée, les crochets indiquent une fenêtre de pixels autour de chaque pixel qui est moyennée pour diminuer le bruit, $|..|$ indique une valeur absolue et $^*$ indique le produit conjugué complexe. La cohérence est maximale (égale à 1) lorsque la position et les propriétés physiques, dans la fenêtre de moyenne, sont les mêmes pour $s_1$ et $s_2$ (Tamm et al., 2016).

## 2.4 Utilisation des images SAR

En 2015, Bériaux et al. ont suivi l'évolution de cultures de maïs sur une année grâce à des images SAR en bande C. Ils ont notamment suivi le Leaf Area Index (LAI), un indicateur de la croissance des cultures, mesuré en surface foliaire ($m^2$) par surface de sol ($m^2$). Le Water Cloud Model (WCM) a permis d'estimer le LAI depuis des données captées par le radar et des données d'humidité du sol. Cette approche a été développée par Attema et Ulaby (1978), elle consiste à modéliser la canopée comme un nuage de gouttelettes d'eau. Ils ont constaté que la polarisation croisée (VH) a la sensibilité la plus grande aux variations de LAI. La co-polarisation VV est sensible à des LAI inférieurs à 2 $m^2/m^2$ (Bériaux et al., 2015). En considérant toutes les polarisations, l'erreur (RMSE) diminue de 0,32 $m^2/m^2$ soit un quart de l'erreur en polarisation simple. L'analyse de la fusion VV-HV est encourageante pour le suivi des canopées de maïs puisqu'elle a donné le meilleur résultat ($R^2$= 0,67) et que le principal mode d'acquisition des données de Sentinel-1 produit des données en VV-VH. Ils concluent aussi que la polarisation HH n'est pas sensible aux canopées de maïs ($R^2$= 0,13).

Pandžić et al. (2020) se sont intéressés à l'évolution de parcelles de maïs en Serbie à l'aide d'images SAR de Sentinel-1 combinées à l'utilisation des degrés-jours. Ils tiennent comptent des différents stades importants de la croissance du maïs : semis, émergence, émergence de la fleur mâle, maturité physiologique, récolte. Ils notent qu'il n'est pas facile de trouver les dates précises dans les changements de morphologie du maïs. Ceci est du à l'influence de la pluie sur le signal. La date de récolte est également difficile à définir. Malheureusement cette étude ne fait aucune relation avec des mesures sur le terrain. Elle n'est donc qu'utile à montrer les perspectives de cette méthode.

En 2009, McNairnet al. ont classé 18 cultures grâce à une combinaison d'images optiques et SAR. Leurs résultats montrent une classification correcte de 88,6 % des champs de maïs en utilisant une seule image optique du satellite SPOT pour leur meilleur jour. Cependant leurs résultats sont systématiquement inférieurs de 20-25 % avec les images SAR du satellite ASAR et ne dépassent jamais 60 %. Les bandes optiques semblent donc plus adaptées pour rendre compte de ce qu'il y a sur les champs mais sont très dépendantes de la météo. En combinant plusieurs dates ils arrivent au taux de détection de 85 %.

Bériaux et al. (2013) ont étudié l'impact de l'humidité du sol dans la récupération du LAI des cultures de maïs au départ de données SAR en bande C et en polarisation VV. Ils ont montré que les contributions du sol et des plantes sont combinées dans le signal rétrodiffusé et que la végétation apparaît comme du sol nu au dessus de 21 % d'humidité du sol.

Bériaux et al. (2011) parviennent à tenir compte de l'humidité du sol à l'aide de deux méthodes. La première méthode utilise un modèle hydrologique, le modèle SWAP (Soil, Water, Atmosphere, and Plant model). Dans la deuxième méthode, la permittivité du sol en surface est

mesurée par un radar à pénétration du sol. Les résultats montrent qu'autant l'humidité du sol modélisée avec le modèle SWAP que la permittivité du sol mesurée avec un radar à pénétration du sol permettent d'estimer le LAI à partir d'images SAR en utilisant le WCM. Ce dernier est applicable pour la bande C mais pas au-delà (Irwin et al., 2019).

# Chapitre 3 - Objectifs

Ce mémoire a pour objectif de développer une méthodologie permettant d'estimer le pourcentage de matière sèche des plants d'une parcelle de maïs en Wallonie en utilisant les images de Sentinel-1 et d'évaluer les performances de cette méthode. Cette étude concerne le maïs fourrage, destiné au bétail et donc à la production de lait et de viande. Cet objectif valorise les données de Sentinel-1, disponibles gratuitement depuis 2014. L'utilisation des images SAR de Sentinel-1 rend l'acquisition d'information sur la matière sèche beaucoup plus régulière et permet un suivi tout au long de la saison de culture. Le satellite est sensible au contenu en eau des plantes et cette variable est liée au pourcentage de matière sèche. Chacun des 2 satellites de Sentinel-1 couvre la Wallonie tous les six jours. Ensemble, ils couvrent donc ce territoire tous les trois jours. Le court temps de retour de ces satellites rend possible le suivi régulier de la perte d'eau durant la fin de la saison. Le maïs commence à sécher en août jusqu'à ce qu'il soit récolté en octobre. Cette période est critique puisque c'est la période pendant laquelle l'agriculteur doit choisir sa date de récolte. La méthode développée ici tente de fournir régulièrement les informations du contenu en matière sèche pour chaque parcelle afin de permettre à l'agriculteur de choisir, en connaissance de cause, sa date de récolte optimale pour chaque parcelle. En particulier, une telle information permet de décider dans quel ordre il devrait les récolter. La concentration en eau du maïs au moment de la récolte est une variable essentielle pour la qualité du fourrage qui est distribué aux animaux car elle est déterminante pour la bonne conservation du fourrage dans le silo. De plus, le rendement est fonction de la matière sèche ; pour une même quantité de maïs produite, la récolte avec la plus grande teneur en matière sèche est celle avec le meilleur rendement. Cette variable joue donc un rôle capital pour la santé économique de l'exploitation agricole.

# Chapitre 4 - Matériel et méthode

Cette section présente le matériel utilisé pour la prise de mesures sur le terrain et les différentes sources de données qui permettent de faire le lien entre les images de Sentinel-1 et la réalité de terrain. La section se termine par la présentation de la méthode suivie pour l'acquisition et la mise en relation de ces données.

## 4.1 Matériel

### 4.1.1 Source de données

Afin de disposer de données *in situ*, une campagne de terrain (section 4.2.2) a été effectuée en 2020 sur les parcelles présentées à la section 4.1.2. La plateforme Belcam a été utilisée pour recenser les champs et avoir une idée de leur stade de développement. Une autre série de champs, plantés en maïs en 2019, a été fournie par le Centre indépendant de promotion fourragère (CIPF). La campagne de terrain du CIPF ne suit pas le protocole mis en place pour les données de 2020. Ces données sont constituées de récolte de MS pour 12 champs dont 5 ne sont récoltés qu'aux deux derniers passages. Il y a en tout 4 dates d'observation.

Le parcellaire de 2019 a servi de source pour encoder les champs des deux années dans le logiciel SIG QGIS. Une fois les parcelles encodées, une zone tampon de 20 mètres vers l'intérieur du champ a été appliquée pour éviter les effets de bord, c'est-à-dire l'influence des éléments extérieurs au champ sur le signal. Pour les champs de 2020, leurs formes ont été corrigées manuellement pour représenter au mieux la parcelle effectivement plantée en maïs et pour exclure les zones de trop grande hétérogénéité. Ces nouvelles délimitations de parcelles sont appelées sous-parcelles. N'ayant pas d'information pour ces paramètres en 2019, les formes des parcelles sont encodées telles quelles.

Les données de Sentinel-1 ont été prétraitées par le système opensource Sen4CAP. Les données produites et utilisées ici sont corrigées en $\sigma^0$ (section 2.3.1). Elles sont présentées au format CSV, elles contiennent les informations sur l'observation par satellite (mode, satellite, heure de passage, orbite), ainsi que la moyenne, la médiane, le maximum, le minimum et la variance pour les polarisations VV et VH ainsi que le ratio VH/VV aussi appelé ratio croisé (CR). Ces données sont disponibles en unité de puissance exprimée en dB. Il faut noter que Sen4CAP produit automatiquement les moyennes par parcelle en fonction du plan cadastral. Cependant, ce sont bien les moyennes par sous-parcelle qui ont été utilisées ici pour récupérer les données de Sentinel-1. L'ensemble des dates de passage de Sentinel-1 pour la période d'étude en 2020 sont reprises au tableau 2.

*Tableau 2 – Jours de passage de Sentinel-1 au-dessus de la zone d'étude entre août et octobre 2020.*

| S1-A [1] ASC | S1-A DSC | S1-B ASC | S1-B DSC |
|---|---|---|---|
| 09/08 | 01/08 | 03/08 | 07/08 |
| 21/08 | 13/08 | 15/08 | 19/08 |
| 02/09 | 25/08 | 27/08 | 31/08 |
| 14/09 | 11/09 | 08/09 | 24/09 |
| 26/09 | 18/09 | 20/09 | 06/10 |
| 08/10 | 30/09 | 02/10 | 18/10 |
| 20/10 | 12/10 | 14/10 | |
| | 24/10 | 26/10 | |

### 4.1.2 Zones d'étude

Pour effectuer la campagne de terrain en 2020, 18 parcelles situées en province de Hainaut ont été choisies, elles sont relativement concentrées (figure 9). Ces parcelles sont situées sur trois communes : Manage, Seneffe et Ecaussinnes et appartiennent à 4 agriculteurs.

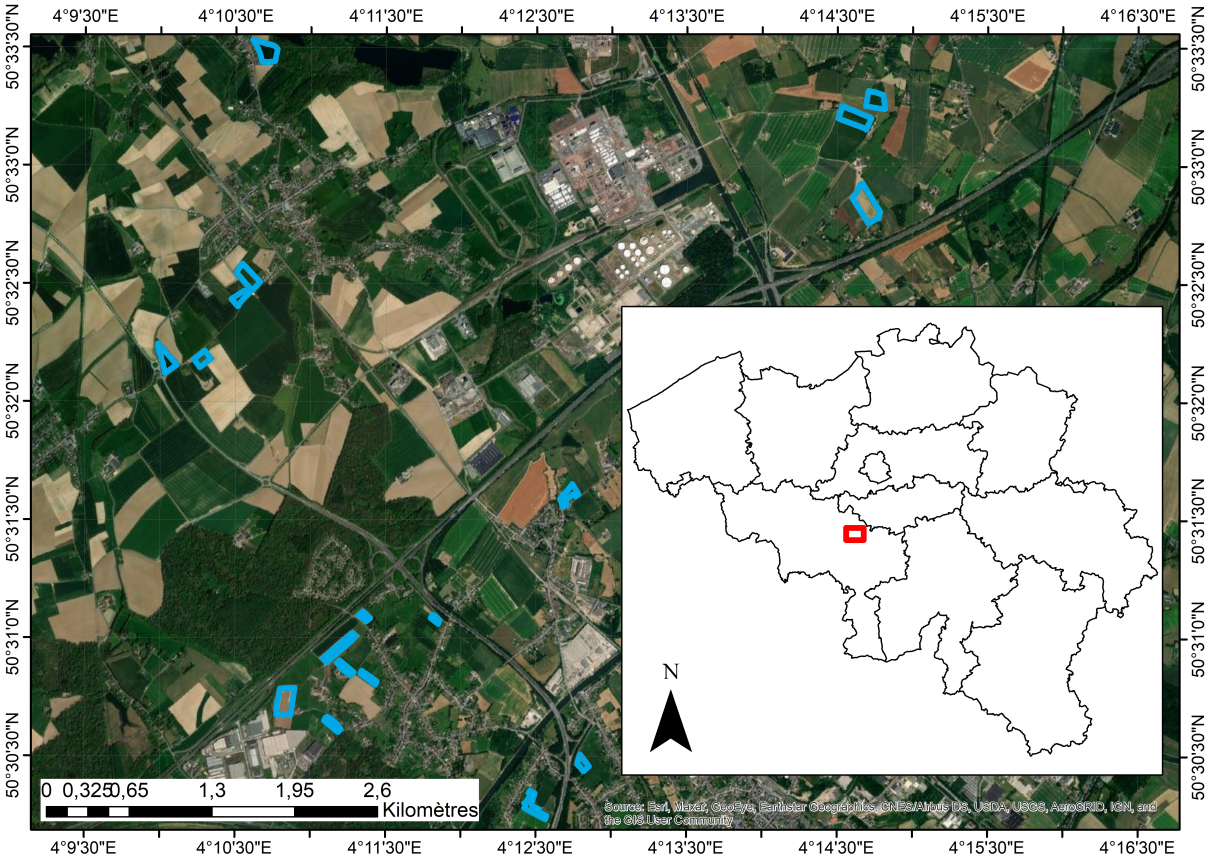



*Figure 9 – Emplacement des champs étudiés en 2020.*

1. Sentinel-1, satellite A

Le tableau 3 détaille une série d'informations sur les champs étudiés. Ces informations ont été communiquées par les agriculteurs au moment de la demande d'autorisation pour échantillonner leurs champs.

Le code du champ reprend le nom de l'agriculteur et un numéro pour différencier les champs appartenant à un même agriculteur. Les numéros manquants dans les suites de numéros correspondent aux champs qui ont été abandonnés. Soit parce qu'avant d'aller sur place, il y avait un doute sur la bonne appartenance de la parcelle à l'agriculteur. Soit parce qu'après avoir été sur place, la parcelle était trop hétérogène ou présentait des adventices trop développées. Pour ces raisons, le champ Vandenbergh5 aurait du être abandonné, mais sa proximité avec les autres parcelles du même agriculteur a rendu son échantillonnage facile et des mesures ont malgré tout été effectuées. Afin d'obtenir un maximum de données, cette parcelle, un peu différente des autres, a finalement été gardée. L'orientation des rangs est précisée et la taille correspond en fait au nombre de pixels dans la sous-parcelle utilisée pour extraire les valeurs de Sentinel-1 via Sen4CAP. Les pixels produits par Sen4CAP ont une dimension de 20 m sur 20 m. On constate que certains champs sont très petits et cela peut poser problème à cause du chatoiement sur les images SAR (section 2.3.1). Enfin les coordonnées géographiques correspondent à l'endroit de prise de mesures, elles permettent de donner la localisation des champs et des pixels d'intérêt (section 4.2.2).

*Tableau 3 – Informations sur les champs étudiés en 2020.*

| **Code du champ** | **Semis** | **Orientation** | **Taille** | **°Nord** | **°Est** | **Commentaires** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Derijk1 | fin/04 | N | 40 | 50°33'13,7" | 4°14'46.9" | Maïs haut, 2 variétés |
| Derijk2 | fin/04 | NO | 84 | 50°32'54,9" | 4°14'44,7" | Maïs haut, 2 variétés |
| Derijk3 | fin/04 | NO | 59 | 50°33'11,3" | 4°14'36,9" | Maïs haut, 2 variétés |
| Licop1 | 20/04 | NO | 23 | 50°31'32,3" | 4°12'44,9" | Maïs rouge |
| Licop2 | 25/04 | NE | 15 | 50°30'24,7" | 4°12'53,6" | Beau maïs |
| Philippe1 | 23/04 | N | 49 | 50°33'25,2" | 4°10'49,3" | Moins sec côté forêt, prise dans la partie plus sèche, maïs assez en avance |
| Philippe4 | 23/04 | NO | 43 | 50°32'26,8" | 4°10'41,2" | Assez sec |
| Philippe5 | 23/04 | NE | 17 | 50°32'25,2" | 4°10'38,3" | Maïs assez sec (idem que Philippe4), bloc de béton dans le champ |
| Philippe7 | 23/04 | NO | 22 | 50°32'08,3" | 4°10'19,1" | Situé sous une éolienne |
| Philippe8 | 23/04 | NO | 33 | 50°32'08,2" | 4°10'09,4" | Bien avancé |
| Vandenbergh1 | 21/04 | NO | 15 | 50°30'35,8" | 4°11'14,7" | Maïs haut |
| Vandenbergh2 | 26/04 | NO | 14 | 50°30'49,7" | 4'11'19,7" | Hétérogène, petit maïs, prise vers la maison car maïs plus développé |
| Vandenbergh3 | 26/04 | NO | 10 | 50°30'48,7" | 4°11'26,2" | Hétérogène, petit maïs, collecte vers les maisons car maïs plus développé |
| Vandenbergh4 | 21/04 | NE | 32 | 50°30'57,9" | 4°11'20,1" | Maïs haut |
| Vandenbergh5 | 21/04 | NO | 8 | 50°30'03,9" | 4°11'26" | Hétérogène, maïs petit, très sec, présence de chénopodes |
| Vandenbergh6 | 26/04 | NO | 6 | 50°31'02,5" | 4°11'54,2" | Beau maïs, quelques trous dans les rangs |
| Vandenbergh8 | 21/04 | NO | 28 | 50°30'18,8" | 4°12'33,3" | Beau maïs |
| Vandenbergh9 | 21/04 | N | 61 | 50°30'44,4" | 4°10'56,9" | Beau maïs |

Douze autres champs ont été échantillonnés en 2019 par le CIPF, leur position est affichée à la figure 10. Les champs de 2019 sont en rouge et ceux de 2020 en bleu. Le CIPF effectue chaque année le suivi de différentes parcelles de maïs pour les agriculteurs.

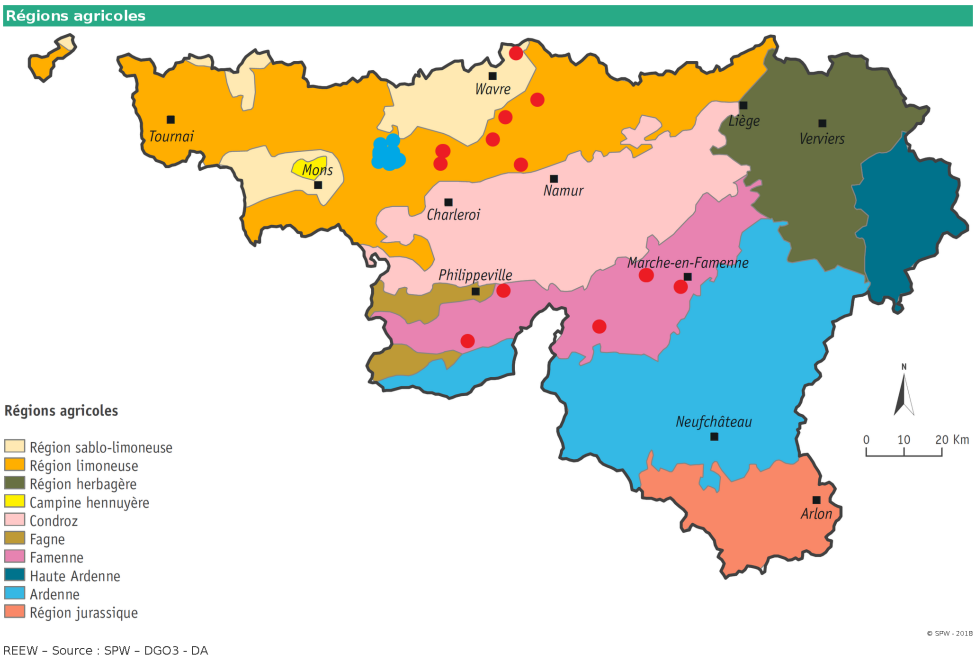



*Figure 10 – Emplacements des champs étudiés en fonction de leur région agricole (champs de 2020 en bleu et de 2019 en rouge).*

## 4.2 Méthodologie

### 4.2.1 Variables d'intérêt

Cinq variables ont été identifiées comme présentant un intérêt et vont faire l'objet d'une étude statistique : pourcentage de MS, biomasse, *canopy water content* (CWC), MS en T/ha, *leaf area index* (LAI). Le but est de mettre en relation ces différentes variables d'intérêt avec les données de Sentinel-1.

Le pourcentage de MS est la variable principale, elle est mesurée *in situ*. Son lien avec les mesures radar n'est pas direct. Il faut donc s'intéresser à d'autres variables.

La biomasse est une autre variable facilement observable dans les champs. La biomasse de la canopée permet d'approcher la quantité d'eau présente dans la végétation. Les mesures de Sentinel-1 sont sensibles à la quantité d'eau, elles devraient donc être plus corrélées avec la biomasse qu'avec la matière sèche directement.

En combinant la MS et la biomasse grâce à l'équation 4, il est possible de trouver le CWC ainsi que la MS en T/ha. Le CWC est la quantité d'eau contenue dans la canopée. On s'attend à ce

que le CWC soit la variable la mieux reliée aux valeurs de Sentinel-1 car le radar est sensible à l'eau. Si la Biomasse et le CWC sont bien corrélés au signal, et entre eux, on peut espérer retrouver le pourcentage de matière sèche grâce à Sentinel-1.

Enfin, le LAI est disponible sur la plateforme Belcam. Il s'agit en réalité d'un *green area index* (GAI) mesuré grâce à Sentinel-2 via l'inversion du transfert radiatif (le transfert d'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique). A la différence du LAI, qui ne tient compte que des feuilles, le GAI prend aussi en compte la tige, le satellite étant incapable de différencier la tige des feuilles. L'appellation LAI est utilisée pour le reste du document. En fin de saison, l'évolution de la courbe de LAI de l'année est modélisé et pour chaque date il devient possible de retrouver le LAI alors que ce n'est pas possible en temps réel puisque le moindre nuage bloque le fonctionnement de Sentinel-2. Cette variable est disponible à une résolution de 5 mètres sur l'entièreté des parcelles.

Seuls la MS et le LAI sont disponibles pour 2019, la biomasse n'ayant pas été observée *in situ* par le CIPF. Le CWC et la MS en T/ha, calculés via la MS et la biomasse sont donc aussi absents.

La section 2.2.4 de la synthèse bibliographique montre l'importance de la météo et en particulier de la pluviométrie. Les données de pluviométrie sont extraites de Belcam, elles sont issues du réseau de stations météorologiques de l'asbl PAMASEB.

### 4.2.2 Campagne de terrain

Afin de mettre en relation des données de terrain avec les données de Sentinel-1, une campagne de terrain a été effectuée. Elle consiste en la prise, *in situ*, de deux variables : la biomasse et la MS. Ces variables sont prélevées dans 18 champs (section 4.1.2) situés en Hainaut, dans la partie la plus homogène des champs (sous-parcelles). C'est l'estimation du LAI sur la plateforme Belcam qui est utilisée pour avoir une idée de l'homogénéité du champ. Elle permet aussi de voir à quel moment le maïs commence à sécher et donc de définir la première date d'échantillonnage. Au sein de la sous-parcelle se trouve le pixel d'intérêt. Ce pixel, d'une superficie d'un are est défini dès la première campagne, il est choisi dans une partie du champ qui semble homogène visuellement. C'est indispensable puisque le pixel échantillonné vaut pour l'entièreté du champ et chaque champ est échantillonné dans le même pixel à chaque campagne. La concentration des champs et leur situation ont pour but de minimiser le temps nécessaire à la prise de mesures. L'accessibilité du champ avec le matériel d'échantillonnage est aussi un critère de choix.

Deux types de mesures ont été prises sur le terrain : la biomasse aérienne totale, qui donne une information précieuse sur l'état de la végétation et le taux de matière sèche, variable d'intérêt pour les agriculteurs.

### *Biomasse*

La biomasse fraîche a été mesurée en pesant tous les plans de maïs le long de trois mètres au sol. Soit, la somme de trois fois un mètre répartis au sein d'un même pixel. Afin de retrouver le pixel de prélèvement à chaque passage, des jalons sont placés en bordure de champ. La position du deuxième mètre prélevé a été enregistrée grâce à un GPS LEICA, il correspond au centre du pixel étudié pour chaque parcelle. La figure 11 montre comment sont répartis les trois mètres récoltés. Lors des campagnes suivantes, les trois mètres sont récoltés au sein de ce pixel en s'écartant de quelques rangs des trouées créées par les récoltes précédentes.

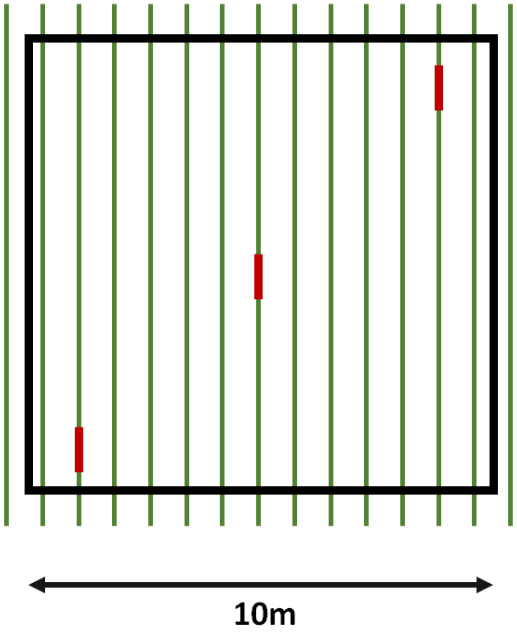



*Figure 11 – Protocole de sélection des trois mètres de maïs pour la biomasse.*

Au total trois endroits par parcelle servent pour la biomasse fraîche, à raison d'un mètre par localisation. Ce maïs est ramené en bord de champ et pesé avec une balance Kern FKB 8K0.05 alimentée par une batterie. Sa précision est de 0,05 gramme. En réalité, les données n'ont été lues qu'au gramme près car les conditions de terrain ne permettent pas d'être plus précis. Un des problèmes est lié au volume du maïs car il crée une grande prise au vent et la balance se stabilise difficilement. La balance, installée à proximité du champ, a dû être posée de la manière la plus stable possible, le sol n'étant pas toujours plat. L'horizontalité du plateau de la balance a aussi fait l'objet d'une attention particulière afin d'assurer l'exactitude de la mesure.

### *Matière sèche*

La seconde observation récoltée sur le terrain est la MS. Pour chaque parcelle, deux plants entiers ont été sélectionnés, coupés en morceaux puis placés dans des sachets micro-perforés. Ces échantillons sont pesés une première fois sur le champ et une seconde fois après avoir été séchés dans une étuve à 70°C pendant trois jours. Le pourcentage de MS est retrouvé grâce à l'équation,

$$MS[\%] = \frac{m_{sèche}[g] - m_{sac}[g]}{m_{fraîche}[g] - m_{sac}[g]}. \tag{3}$$

Cinq campagnes de mesures *in situ* ont été réalisées. Les dates ont été choisies pour être au plus proche des dates de passage d'un des satellites de Sentinel-1 tout en évitant que le sol soit humide au moment du prélèvement et qu'il y ait de l'eau sur les plantes. Le signal reçu risquerait de ne pas être représentatif de l'eau présente à l'intérieur des plantes. La fréquence de passage envisagée est de deux semaines. En fin de saison, cette fréquence a été augmentée, c'est pourquoi il n'y a que 7 jours entre les troisième et quatrième passages, c'est la période critique. Le cinquième passage s'est effectué beaucoup plus tard car il y a eu une période de précipitation continue qui n'a pas permis de récolter les données du cinquième passage de manière représentative (sol humide).

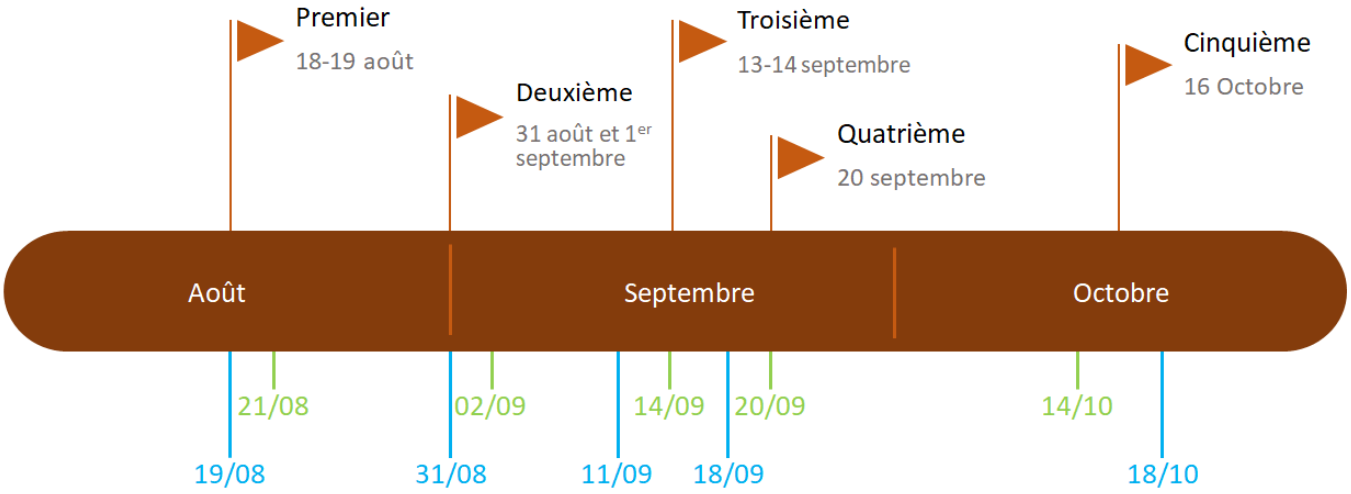



*Figure 12 – Dates de réalisation des collectes in situ de 2020 et dates de passages associées pour les mode DSC en bleu et ASC en vert.*

La méthode d'observation des variables mesurées sur le terrain est résumée dans le protocole suivant :

1. Pour chaque parcelle, se rendre sur le pixel d'intérêt
2. Couper trois lignes d'une longueur d'un mètre
3. Pour le premier passage, prendre le point GPS du centre du pixel
4. Mettre les maïs entiers dans les sacs
5. Ramener ces sacs au bord du champ
6. Pour le premier passage, placer un jalon à l'endroit de sortie du champ, pour retrouver le lieu de prélèvement lors de la campagne suivante
7. Peser chaque sac

8. Choisir 2 plants au hasard parmi les trois mètres récoltés
9. Couper ces plantes en tronçons de 20 cm
10. Placer les morceaux dans un sac micro-perforé
11. Peser ce sac
12. Echantillonner le champ suivant en appliquant la même procédure
13. Une fois tous les champs échantillonnés, les sacs sont emmenés à l'étuve. Ils sont placés pendant 72h à 70°C. Lorsque l'étuve n'est pas disponible immédiatement les échantillons sont placés en attente dans une salle climatisée à 25°C
14. Peser les sachets avec les plantes séchées



*Figure 13 – Photos de la campagne de terrain de 2020.*

### 4.2.3 Méthode d'analyse

Une fois toutes les variables récoltées, elles peuvent être analysées et mises en relation. Une analyse exploratoire des données *in situ* est faite afin de dégager les tendances qui se sont produites tout au long de la saison de culture. On s'attend à ce que la biomasse croisse au fil du temps, contrairement à la MS et au CWC, qui devraient décroître. Les liens entre les différentes variables peuvent aussi être mis en exergue. On s'attend à ce que la biomasse et le CWC soient correlés positivement.

Ensuite, chacune des variables est mise en relation avec les coefficients de rétrodiffusion de Sentinel-1. Ceci permet de calculer le coefficient de détermination pour chaque variable. Ces coefficients sont calculés pour l'entièreté de la saison et pour chaque passage. Au vu des dates d'observation sur le terrain en 2020, les dates suivantes de passage du satellite ont été retenues : 19/08, 31/08, 11/09, 18/09, 18/10, pour le mode DSC et 21/08, 02/09, 14/09, 20/09, 14/10, pour le mode ASC (figure 12). En 2019, ce sont les dates suivantes qui ont été retenues : 31/08, 06/09, 12/09, 18/09, pour le mode DSC et 28/08, 03/09, 15/09, 21/09, pour le mode ASC (figure 14). Pour les deux années, le CWC et le coefficient de rétrodiffusion devraient être les

mieux correlés. La biomasse devrait aussi montrer une bonne corrélation.

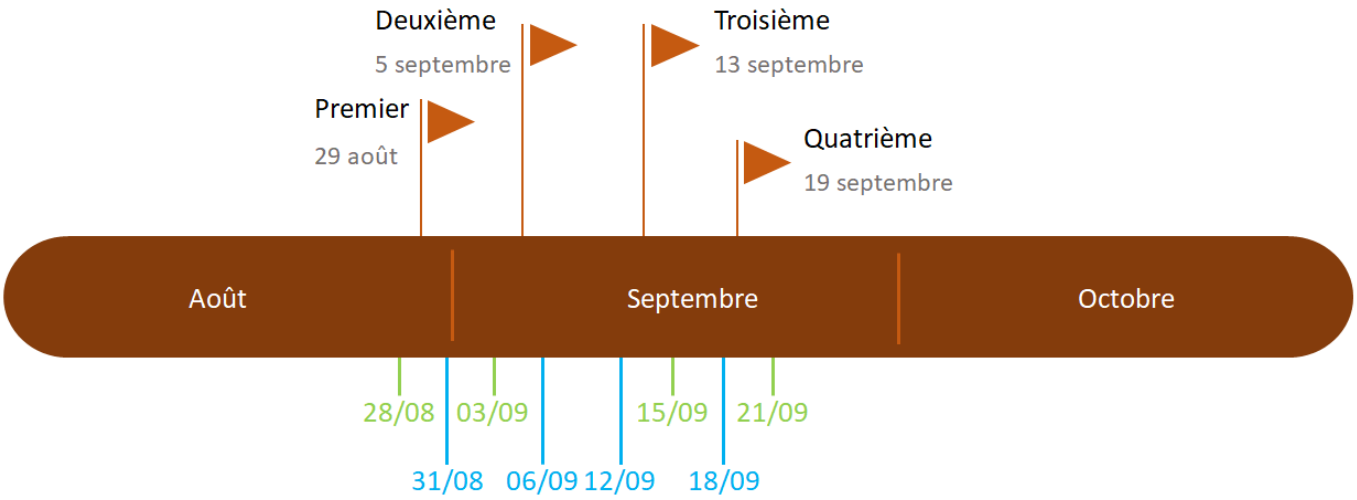



*Figure 14 – Dates de réalisation des collectes in situ de 2019 et dates de passages associées pour les mode DSC en bleu et ASC en vert.*

Sur les images SAR, l'effet de chatoiement peut être important. Certains champs en 2020 ont une surface limitée, et si un pixel avec une valeur extrême se trouve dans ces champs il peut modifier de manière significative la moyenne, sans représenter la réalité de terrain. Afin d'isoler cet effet, les coefficients de détermination pour 2020 ont aussi été calculés uniquement avec les parcelles de plus de 20 pixels.

Pour la campagne de 2020, la distance maximale entre deux champs est de 7,2 km, ils sont donc soumis aux mêmes conditions météorologiques. Pour savoir si la pluie a un impact important dans l'absence de corrélation entre les variables physiques et le signal radar, les coefficients de détermination ont aussi été calculés par passage. Ainsi, si une corrélation existe entre les variables physiques et le signal mais que, sur l'ensemble des passages, aucune corrélation n'est constatée à cause du changement des conditions hydriques, cette corrélation devrait apparaître en séparant les passages.

Les modes ASC et DSC sont séparés lors de l'analyse car leurs géométries d'observation sont différentes et on s'attend à avoir des résultats systématiquement différents, même pour des jours rapprochés. Cependant, les satellites A et B sont utilisés indifféremment, le prétraitement des images ne devant laisser aucun différence systématique entre les deux satellites.

Les mêmes mises en relation que pour 2020 ont été effectuées aux champs de 2019. La biomasse n'ayant pas été prélevée, il est impossible de faire le lien entre biomasse et le CWC. L'analyse se cantonne donc à la MS et au LAI, ce dernier étant disponible sur Belcam pour l'année 2019. Ces champs ont la particularité d'être répartis sur l'ensemble du territoire wallon. Ils ne sont donc ni soumis aux mêmes conditions hydriques ni aux mêmes types de sol. Il est intéressant

de voir si les résultats sont aussi bons que ceux obtenus avec les parcelles de 2020 qui, elles, sont assez similaires.

# Chapitre 5 - Résultats

Cette section présente les données brutes relevées sur le terrain grâce à la méthodologie expliquée à la section précédente. Elle présente ensuite les résultats de la mise en relation de ces données de terrain entre elles et avec les données de Sentinel-1.

## 5.1 Données de terrain

Les tableaux suivants synthétisent les mesures relevées sur le terrain : la date et l'heure de récolte, la somme de la masse des trois mètres de maïs frais (pour la biomasse) ainsi que la masse fraîche et la masse sèche de un ou deux plants (pour le pourcentage de MS).

### Premier passage

Lors du premier jour de récolte, les sacs sont pesés en étant tenus verticalement sur la balance. Par la suite, un bac a été ajouté pour déposer les plants dessus pour améliorer la stabilité lors de la pesée. Seuls les dix champs collectés le 18 août sont pesés sans bac. Pour ces mêmes champs, un seul plant a été sélectionné pour être mis à l'étuve, alors que pour les passages suivants, ce sont systématiquement deux plants qui sont sélectionnés.

*Tableau 4 – Résultats de la première tournée de la campagne de terrain de 2020.*

| **Champ** | **Date** | **Heure** | **Masse 3m [g]** | **Masse de 1 ou 2 plant(s) [g]** | **Masse sèche [g]** |
|---|---|---|---|---|---|
| Derijk1 | 19/08 | 10h24 | 18 969 | 1 491 | 316 |
| Derijk2 | 19/08 | 9h35 | 15 462 | 1 373 | 267 |
| Derijk3 | 19/08 | 9h57 | 15 395 | 1 251 | 291 |
| Licop1 | 18/08 | 13h13 | 14 473 | 716 | 174 |
| Licop2 | 18/08 | 9h33 | 17 318 | 901 | 177 |
| Philippe1 | 19/08 | 11h30 | 16 074 | 1 259 | 264 |
| Philippe4 | 19/08 | 12h06 | 13 835 | 1 034 | 211 |
| Philippe5 | 19/08 | 11h47 | 13 149 | 1 114 | 223 |
| Philippe7 | 19/08 | 12h49 | 14 105 | 1 069 | 259 |
| Philippe8 | 19/08 | 12h29 | 11 325 | 1 254 | 249 |
| Vandenbergh1 | 18/08 | 10h44 | 14 228 | 773 | 161 |
| Vandenbergh2 | 18/08 | 11h11 | 11 904 | 514 | 102 |
| Vandenbergh3 | 18/08 | 11h22 | 10 036 | 876 | 171 |
| Vandenbergh4 | 18/08 | 11h49 | 17 940 | 824 | 183 |
| Vandenbergh5 | 18/08 | 12h33 | 6 685 | 340 | 113 |
| Vandenbergh6 | 18/08 | 12h47 | 11 151 | 540 | 105 |
| Vandenbergh8 | 18/08 | 10h10 | 17 645 | 740 | 168 |
| Vandenbergh9 | 18/08 | 12h12 | 17 382 | 880 | 172 |

## Deuxième passage

Ce passage a été réalisé durant une période pluvieuse, le sol était donc humide. Les mesures effectuées le 1er septembre ont une précision plus faible que les autres. Un court-circuit est survenu et a mis hors service la balance lors de l'échantillonnage du troisième champ du deuxième jour de campagne. L'obtention rapide de nouveau matériel n'étant pas possible, un pèse-personne d'une précision de 100 g pour les trois mètres et une balance de cuisine d'une précision d'un gramme pour les deux plants ont été utilisés. La première mesure réalisée avec le pèse-personne est de 3 900 g alors qu'on avait pesé 3 875 g avant que la balance ne soit hors service, l'erreur est donc faible (0,6 %).

*Tableau 5 – Résultats de la deuxième tournée de la campagne de terrain de 2020.*

| Champ | Date | Heure | Masse 3m (g) | Masse 2 plants (g) | Masse sèche (g) |
|---|---|---|---|---|---|
| Derijk1 | 01/09 | 9h56 | 15 056 | 1 298 | 369 |
| Derijk2 | 01/09 | 9h12 | 17 453 | 1 399 | 367 |
| Derijk3 | 01/09 | 9h40 | 13 403 | 842 | 239 |
| Licop1 | 31/08 | 12h07 | 13 360 | 1 172 | 295 |
| Licop2 | 31/08 | 9h05 | 17 998 | 1 451 | 311 |
| Philippe1 | 01/09 | 11h43 | 13 215 | 1 057 | 292 |
| Philippe4 | 01/09 | 13h09 | 11 615 | 1 086 | 323 |
| Philippe5 | 01/09 | 12h55 | 11 815 | 1 422 | 393 |
| Philippe7 | 01/09 | 12h32 | 11 915 | 1 195 | 377 |
| Philippe8 | 01/09 | 12h10 | 12 915 | 1 254 | 278 |
| Vandenbergh1 | 31/08 | 11h45 | 13 354 | 1 601 | 448 |
| Vandenbergh2 | 31/08 | 11h14 | 11 725 | 1 284 | 313 |
| Vandenbergh3 | 31/08 | 11h26 | 10 484 | 948 | 225 |
| Vandenbergh4 | 31/08 | 10h21 | 14 909 | 1 101 | 323 |
| Vandenbergh5 | 31/08 | 10h01 | 8 393 | 654 | 278 |
| Vandenbergh6 | 31/08 | 9h50 | 11 677 | 1 390 | 350 |
| Vandenbergh8 | 31/08 | 9h25 | 16 001 | 1 622 | 367 |
| Vandenbergh9 | 31/08 | 10h58 | 15 772 | 1 375 | 350 |

## Troisième passage

On constate que mi-septembre les premiers champs de maïs ont été récoltés par les agriculteurs. Pour cette raison, aucune observation n'a donc pu être relevée pour les champs Philippe8 et Vandenbergh5.

*Tableau 6 – Résultats de la troisième tournée de la campagne de terrain de 2020.*

| Champ | Date | Heure | Masse 3m (g) | Masse 2 plants (g) | Masse sèche (g) |
|---|---|---|---|---|---|
| Derijk1 | 14/09 | 10h02 | 13 433 | 1 169 | 429 |
| Derijk2 | 14/09 | 9h31 | 16 617 | 1 676 | 551 |
| Derijk3 | 14/09 | 9h48 | 14 310 | 1 288 | 460 |
| Licop1 | 13/09 | 12h07 | 12 258 | 882 | 335 |
| Licop2 | 13/09 | 9h23 | 14 197 | 1 564 | 474 |
| Philippe1 | 14/09 | 10h43 | 13 132 | 1 350 | 463 |
| Philippe4 | 14/09 | 11h16 | 11 358 | 1 354 | 514 |
| Philippe5 | 14/09 | 11h03 | 10 850 | 1 268 | 483 |
| Philippe7 | 14/09 | 11h37 | 11 995 | 1 044 | 438 |
| Vandenbergh1 | 13/09 | 10h05 | 12 554 | 1 130 | 395 |
| Vandenbergh2 | 13/09 | 10h21 | 12 042 | 1 542 | 543 |
| Vandenbergh3 | 13/09 | 10h33 | 8 618 | 1 332 | 430 |
| Vandenbergh4 | 13/09 | 10h52 | 11 529 | 1 198 | 483 |
| Vandenbergh6 | 13/09 | 11h42 | 9 488 | 952 | 286 |
| Vandenbergh8 | 13/09 | 9h47 | 12 287 | 1 606 | 535 |
| Vandenbergh9 | 13/09 | 11h22 | 16 470 | 1 377 | 449 |

## Quatrième passage

Les semaines précédant le quatrième passage ont été très sèches. Comme la rosée est de plus en plus présente sur les plantes, la récolte a été effectuée plus tard dans la journée pour permettre son évaporation. Cependant le satellite passe toujours en mode DSC à 7h30 et est potentiellement affecté par cette rosée. Il faut donc en tenir compte lors de l'analyse des résultats.

*Tableau 7 – Résultats de la quatrième tournée de la campagne de terrain de 2020.*

| Champ | Date | Heure | Masse 3m (g) | Masse 2 plants (g) | Masse sèche (g) |
|---|---|---|---|---|---|
| Derijk2 | 20/09 | 11h28 | 11 336 | 1 567 | 610 |
| Derijk3 | 20/09 | 11h46 | 9 345 | 839 | 409 |
| Licop1 | 20/09 | 10h59 | 11 310 | 683 | 289 |
| Philippe1 | 20/09 | 12h18 | 11 477 | 901 | 377 |
| Vandenbergh2 | 20/09 | 10h10 | 8 475 | 906 | 372 |
| Vandenbergh3 | 20/09 | 10h22 | 8 292 | 778 | 283 |
| Vandenbergh6 | 20/09 | 10h40 | 7 458 | 1 017 | 481 |
| Vandenbergh8 | 20/09 | 9h44 | 10 487 | 1 302 | 575 |

### Cinquième passage

Cinq champs n'avaient toujours pas été exploités par les agriculteurs. Les précipitations constantes pendant les trois semaines précédentes ont certainement empêché la récolte de ces champs. Le sol était humide, mais la récolte a été faite à un moment où il ne pleuvait pas. La semaine suivante, ces cinq champs avaient été récoltés. Ce passage, effectué en octobre, est donc le dernier de la campagne de terrain.

*Tableau 8 – Résultats de la cinquième tournée de la campagne de terrain de 2020.*

| **Champ** | **Date** | **Heure** | **Masse 3m (g)** | **Masse 2 plants (g)** | **Masse sèche (g)** |
|---|---|---|---|---|---|
| Licop1 | 16/10 | 12h42 | 10 690 | 974 | 457 |
| Philippe1 | 16/10 | 13h20 | 10 147 | 981 | 449 |
| Vandenbergh2 | 16/10 | 11h40 | 6 680 | 931 | 444 |
| Vandenbergh3 | 16/10 | 12h00 | 7 367 | 902 | 429 |
| Vandenbergh6 | 16/10 | 12h30 | 6 647 | 846 | 428 |

## 5.2 Conditions météorologiques

La figure suivante indique les conditions de température et de pluviométrie enregistrées au cours de la campagne de terrain. Ces données météorologiques sont issues du réseau PAMESEB et ont été visualisées sur le site de Belcam. Il est constitué de 30 stations situées en Wallonie. La station la plus proche de toutes les parcelles étudiées dans ce mémoire se trouve à Feluy dans la commune de Seneffe. Elle se situe à une distance maximale de 5,25 km des parcelles.

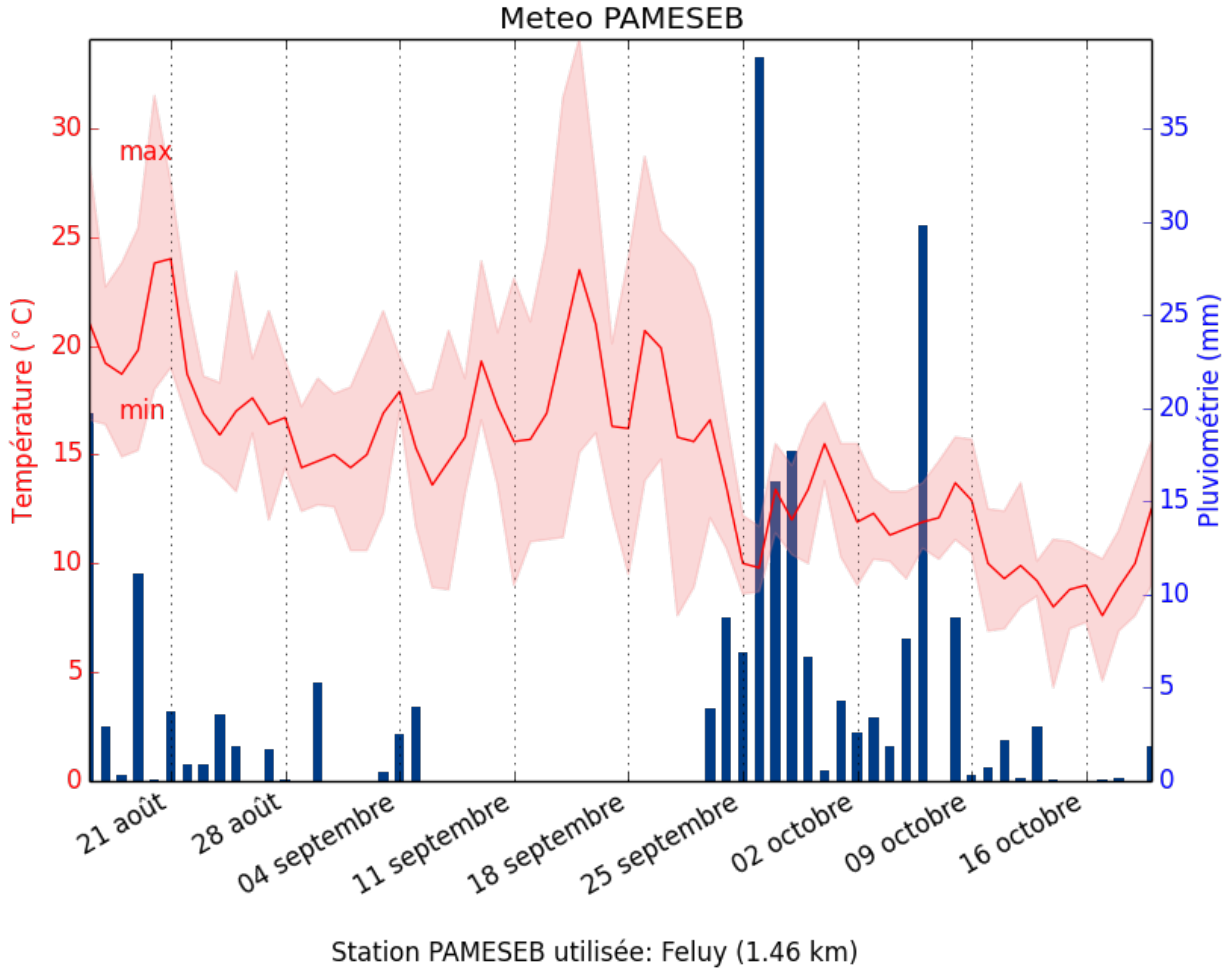



*Figure 15 – Pluviométrie et températures entre le 17 août et le 20 octobre 2020 (Source : Belcam).*

La figure 15 ci-dessus met en évidence une période de sécheresse entre le 6 septembre et le 22 septembre. Et une période pluvieuse entre le 23 septembre et le 14 octobre. Les passages trois et quatre ne voient donc pas leur signal influencé par l'eau de pluie résiduelle dans le sol. En revanche, les mesures effectuées lors du dernier passage, juste après cette longue période de pluie, peuvent être influencées par cette pluie résiduelle. Ce phénomène est d'autant plus marqué que, la saison avançant, la végétation sèche et donc l'influence du sol dans le signal est plus importante.

## 5.3 Analyse exploratoire des données de terrain

Cette section rassemble les graphiques résultant de l'analyse individuelle de chaque donnée de terrain. Pour chaque variable sont présentés un graphique de l'évolution de la variable par champ (dont la légende est à la figure 16), un graphique de l'évolution de la moyenne de tous les champs et un histogramme de répartition. Les deux premiers graphiques traduisent l'évolution de la variable au cours du temps et l'histogramme donne une idée de la dispersion des champs.

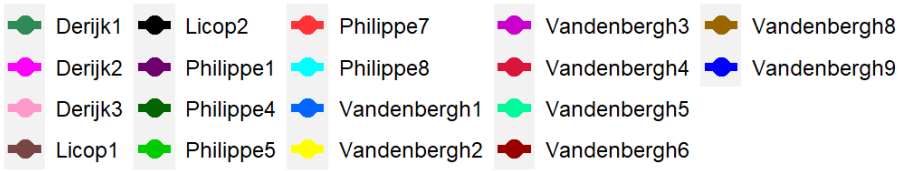



*Figure 16 – Légende des graphiques d'évolution des variables par champ en 2020.*

### 5.3.1 Matière sèche en %

La figure 17 montre l'évolution du pourcentage de matière sèche lors de la période d'observation et la figure 18 reprend ce résultat sous forme de moyenne.

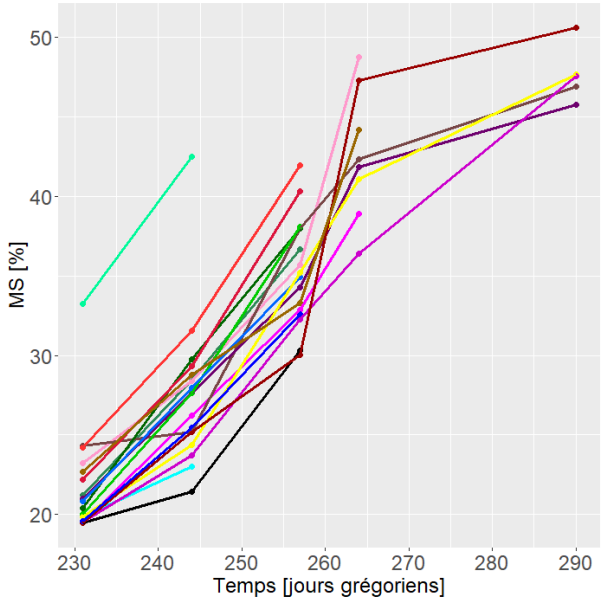



*Figure 17 – Evolution de la matière sèche par champ du 18/08 au 16/10 2020.*

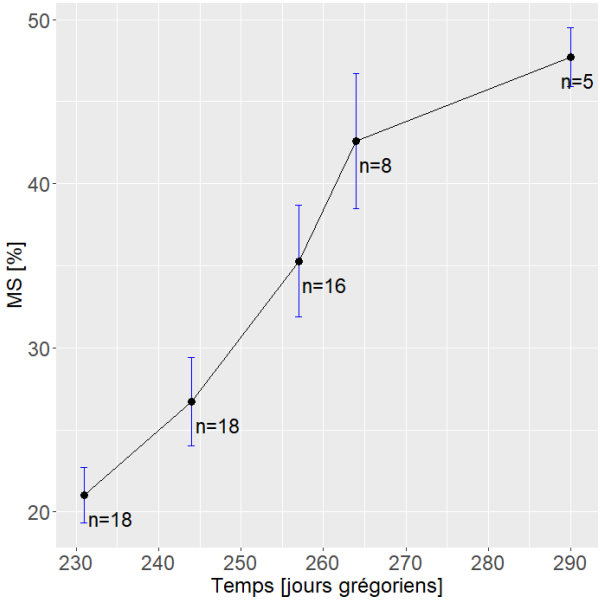



*Figure 18 – Evolution de la matière sèche moyenne du 18/08 au 16/10 2020.*

Le temps est exprimé en jours grégoriens c'est-à-dire qu'il est représenté par le nombre de jours qui se sont écoulés depuis le 1er janvier. Il est à noter que 2020 est une année bissextile.

Comme attendu, la matière sèche augmente tout au long de la saison passant de 21 % en moyenne à près de 47 %. Cette dernière valeur est très élevée comparée aux 30-35 % évoqués dans la littérature. Cette valeur correspond aux champs qui n'ont pas pu être récoltés avant cette date suite à un long épisode pluvieux. La plupart des agriculteurs ont récolté leurs champs avant ce stade. Treize champs sur 18 ont été récoltés avant le 290ème jour avec un pourcentage de matière sèche moyen de 37,7 % au moment de l'observation précédant la récolte. Ce qui est nettement plus proche de l'optimum de récolte renseigné dans la littérature.

Les histogrammes de la figure 19 montrent la dispersion de la teneur en matière sèche par passage. Répartir la matière sèche dans des classes permet de savoir si la variable suit une loi

normale et si certains champs ne sont pas singulièrement différents des autres.

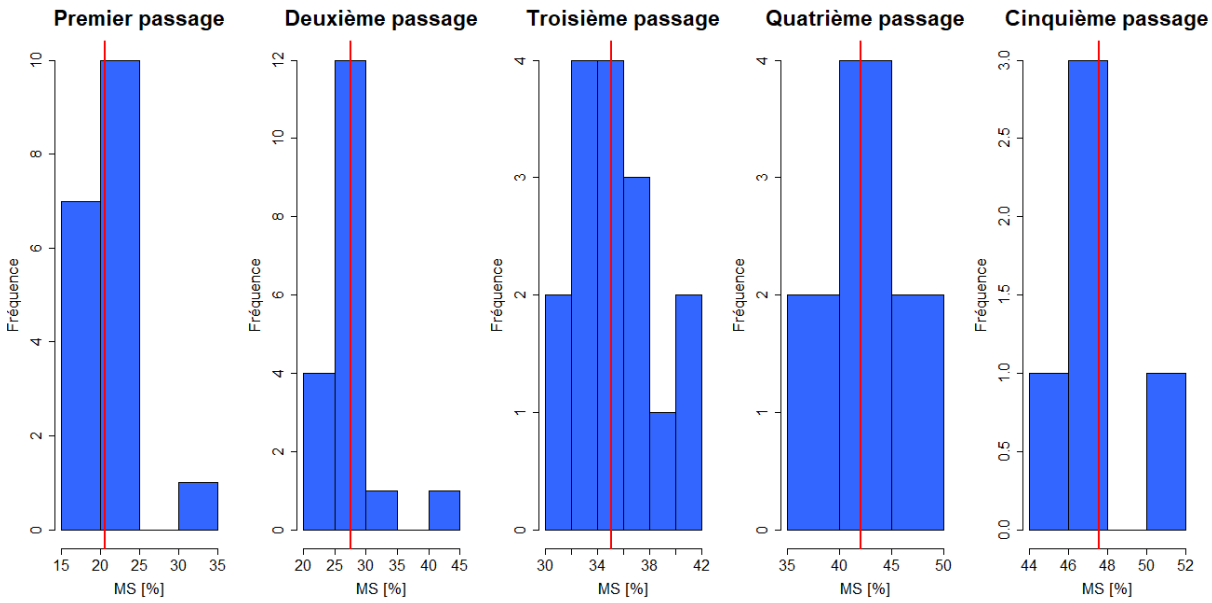



*Figure 19 – Histogrammes de répartition de la matière sèche en % par passage en 2020 (la médiane est en rouge).*

Pour les premier et deuxième passages, un champ se démarque des autres : la parcelle "Vandenbergh5". Cette parcelle n'a été échantillonnée que lors des deux premiers passages puisqu'elle a ensuite été récoltée par l'agriculteur.

### 5.3.2 Biomasse

La figure 20 montre l'évolution de la biomasse fraîche lors de la période d'observation et la figure 21 reprend ce résultat sous forme de moyenne.

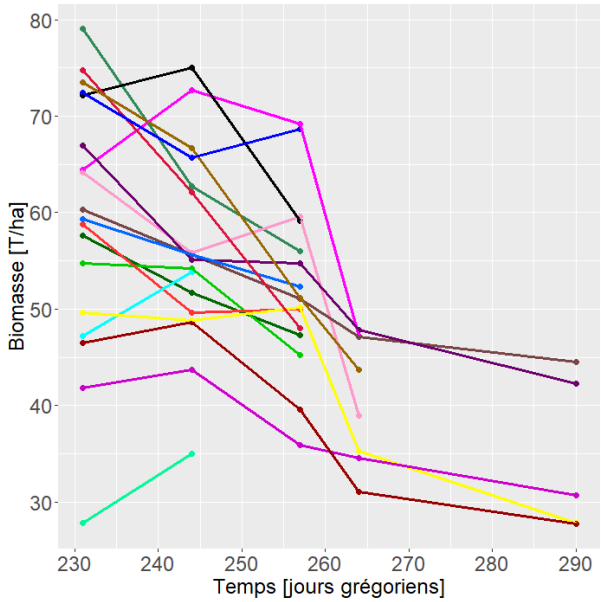



*Figure 20 – Evolution de la biomasse aérienne totale fraîche par champ du 18/08 au 16/10 2020.*

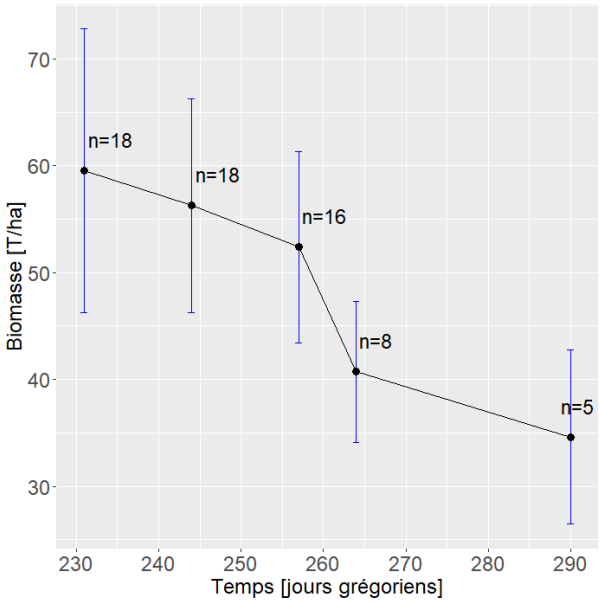



*Figure 21 – Evolution de la biomasse aérienne fraîche moyenne du 18/08 au 16/10 2020.*

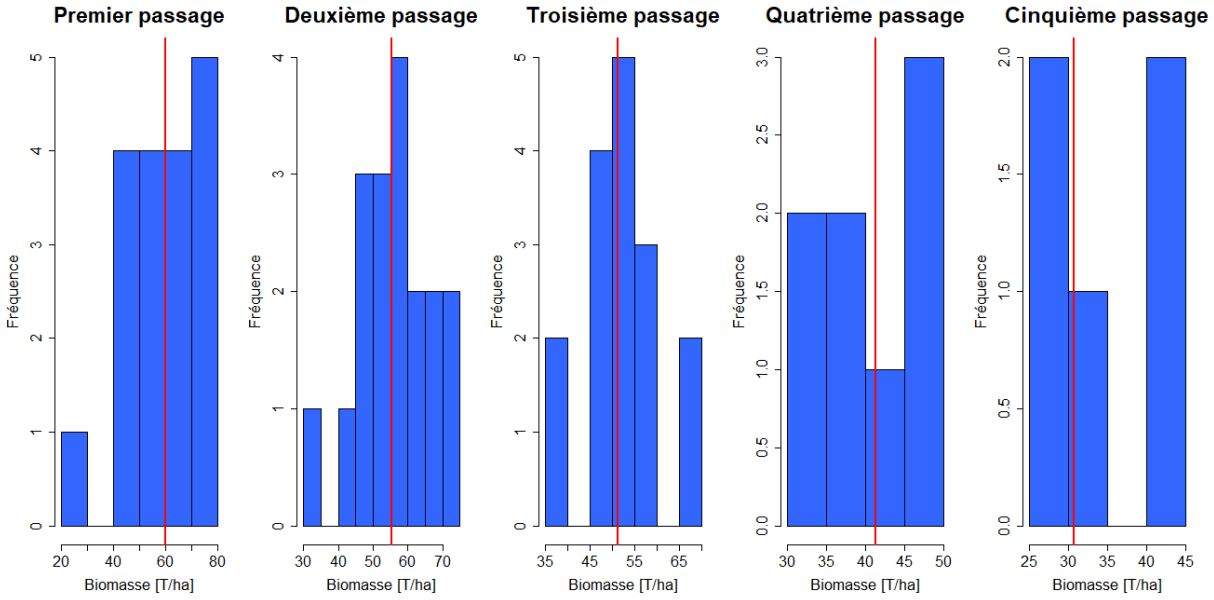



*Figure 22 – Histogrammes de répartition de la biomasse par passage en 2020 (la médiane est en rouge).*

A l'inverse de la matière sèche, la biomasse diminue de manière constante au cours de la saison. La plupart des champs semble avoir commencé à sécher excepté les parcelles noir (Licop2), rose foncé (Derijk2), rouge (Philippe7) et vert clair (Vandenbergh5) qui voient leur biomasse augmenter entre les premier et deuxième passages. En regardant la figure 22 on remarque, encore une fois, que ce dernier champ se démarque des autres. L'écart-type est assez important, cela s'explique, pour le dernier passage, par la présence de deux groupes avec une différence marquée de développement.

### 5.3.3 Quantité d'eau dans la canopée

La figure 23 montre l'évolution du CWC lors de la période d'observation et la figure 24 reprend ce résultat sous forme de moyenne.

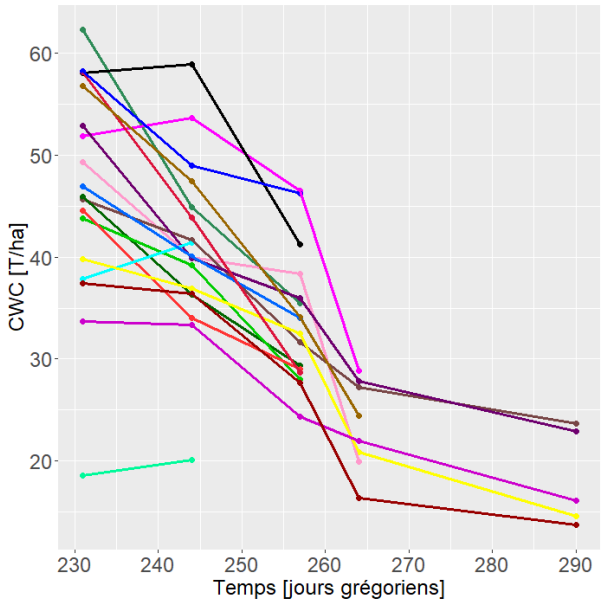



*Figure 23 – Evolution du canopy water content (CWC) par champ du 18/08 au 16/10 2020.*

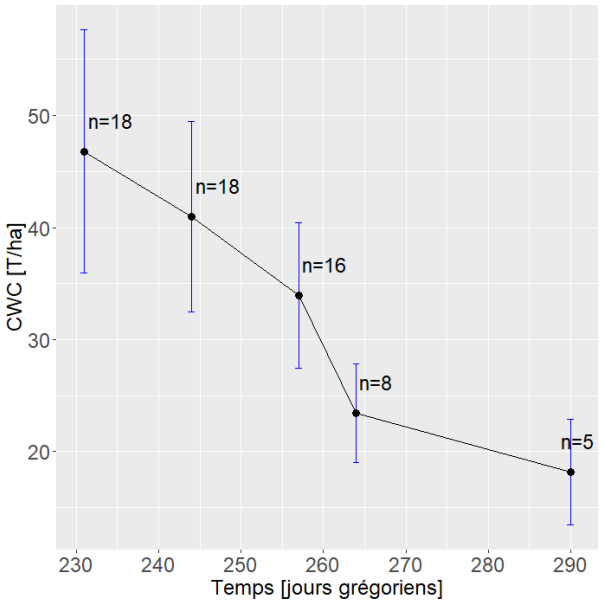



*Figure 24 – Evolution du canopy water content (CWC) moyen du 18/08 au 16/10 2020.*

A l'instar de la biomasse, le CWC décroît dès les premières mesures ce qui confirme que le début de la campagne de terrain a bien été réalisé après que le séchage du maïs ait commencé.

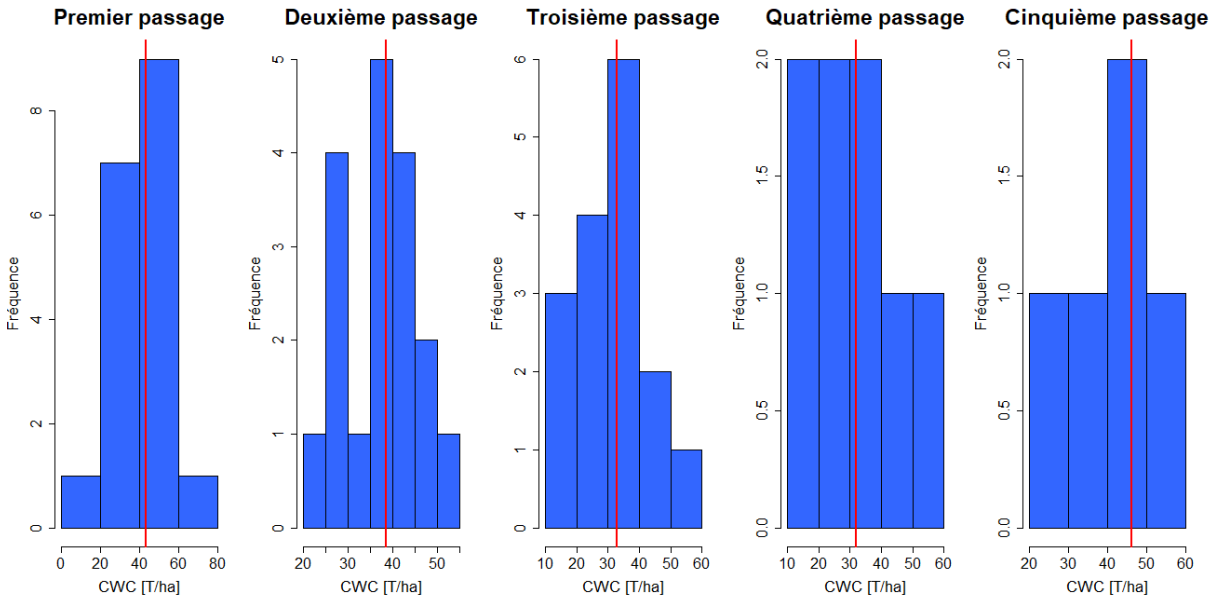



*Figure 25 – Histogrammes de répartition du CWC par passage en 2020 (la médiane est en rouge).*

### 5.3.4 Leaf Area Index

La figure 26 montre l'évolution du LAI lors de la période d'observation et la figure 27 reprend ce résultat sous forme de moyenne.

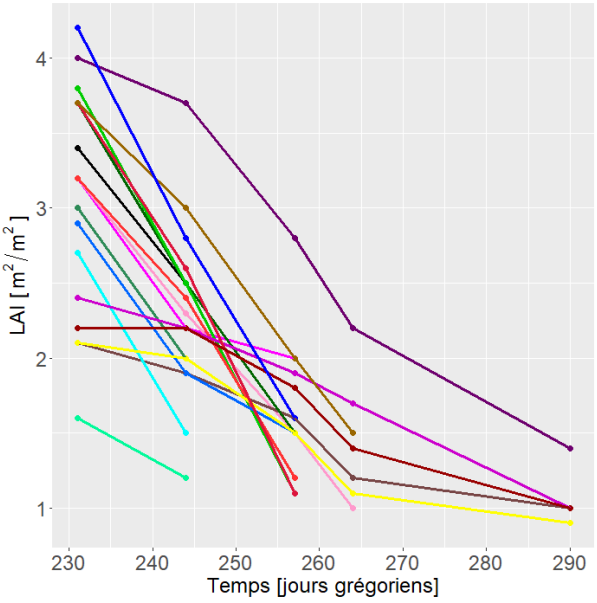



*Figure 26 – Evolution du LAI par champ du 18/08 au 16/10 2020.*

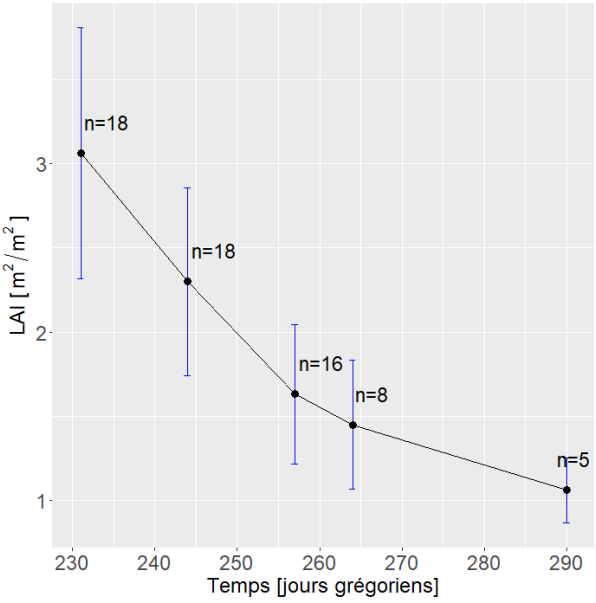



*Figure 27 – Evolution du LAI moyenne du 18/08 au 16/10 2020.*

Comme prévu, le LAI diminue tout au long de la période étudiée, à mesure que le maïs sèche.

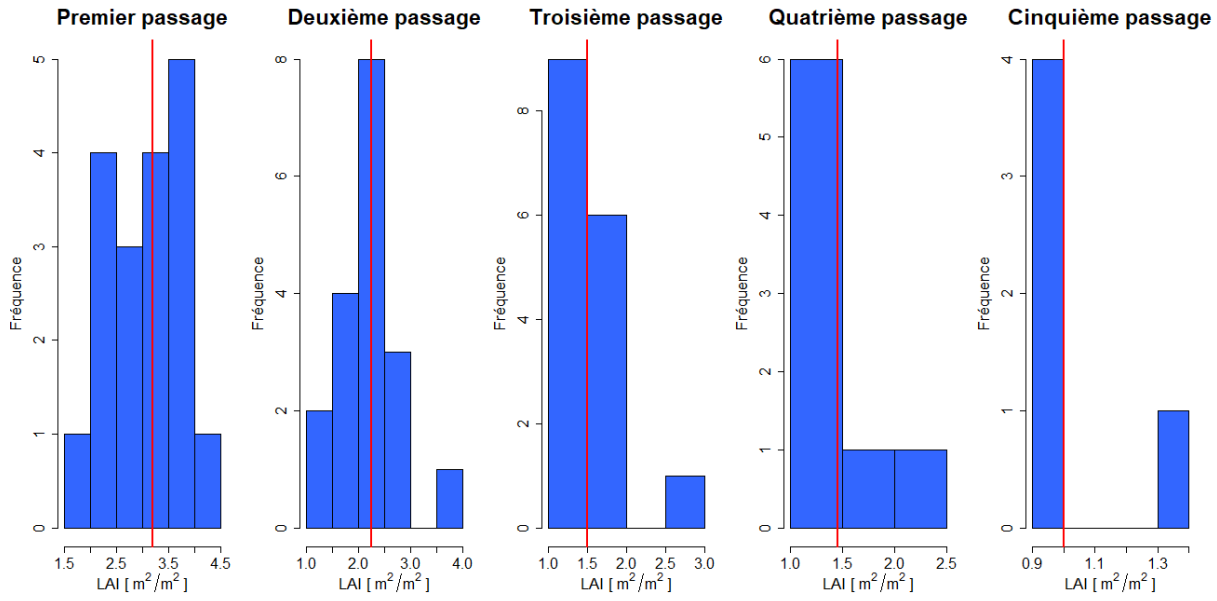



*Figure 28 – Histogrammes de répartition du LAI par passage en 2020 (la médiane est en rouge).*

### 5.3.5 Matière sèche en T/ha

La figure 29 montre l'évolution de la matière sèche en [T/ha] lors de la période d'observation et la figure 30 reprend ce résultat sous forme de moyenne.

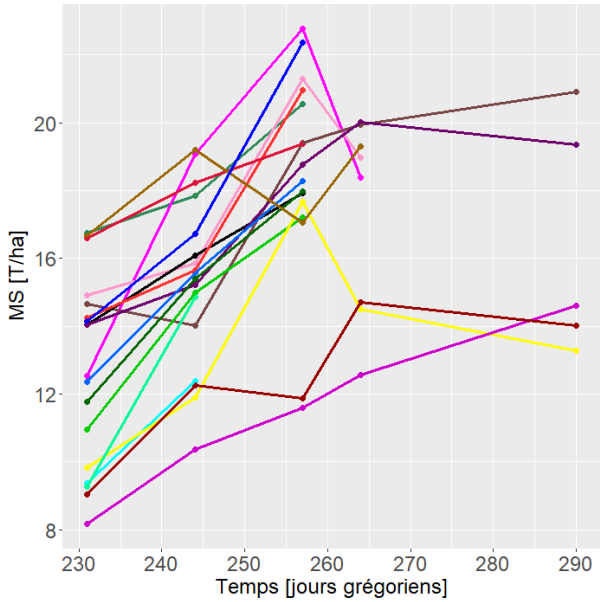



*Figure 29 – Evolution de la MS par champ du 18/08 au 16/10 2020.*

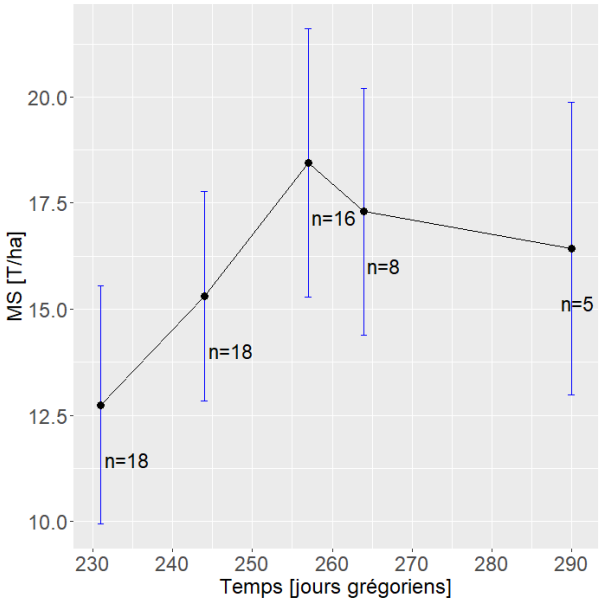



*Figure 30 – Evolution de la MS moyenne du 18/08 au 16/10 2020.*

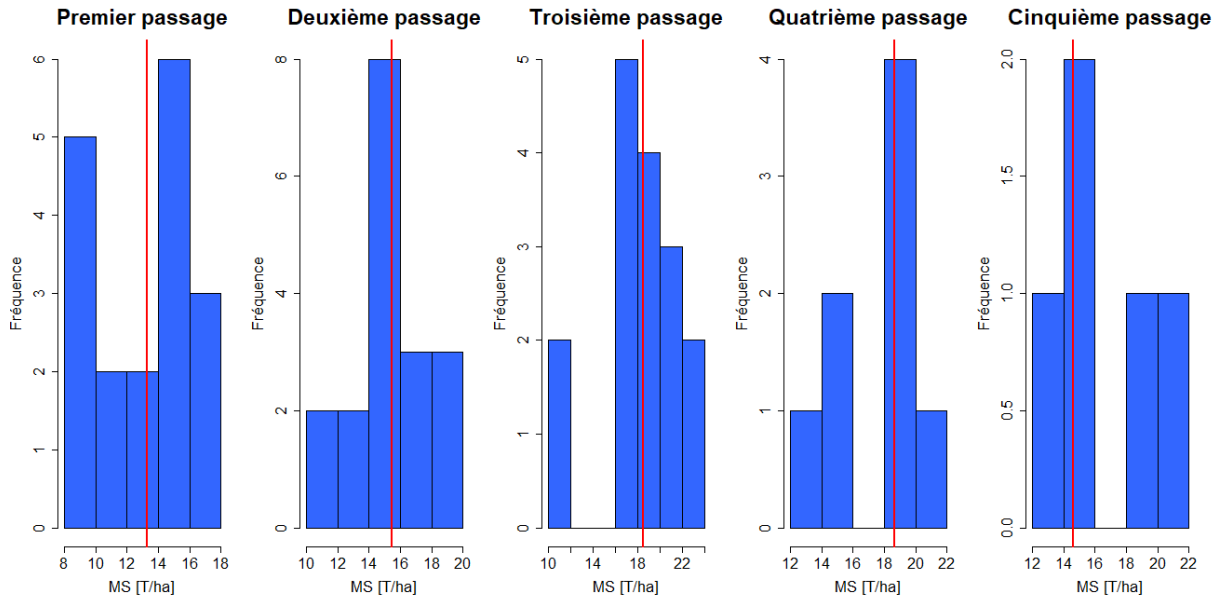



*Figure 31 – Histogrammes de répartition de la matière sèche en T/ha par passage en 2020 (la médiane est en rouge).*

Les deux derniers points de la figure 30 ont un comportement particulier. En effet, la matière sèche, exprimée en tonnes par hectare, n'est pas censée diminuer, elle ne peut pas disparaître. Les champs plantés plus tard dans la saison doivent être laissés plus longtemps sur pied pour atteindre leur maturité et plus un champ est planté tard, plus son rendement diminue (Lambert et al., 2014). Il est donc probable qu'au dernier passage, il reste plus de champs avec une faible quantité de matière sèche et que l'effet de recul de la masse de matière sèche soit dû à la récolte, les jours précédents, des champs avec le meilleur rendement. Les dates de semis des 5 champs

restant au dernier passage, vont dans le sens de cette hypothèse. En effet, les champs du dessus (lignes brune et mauve de la figure 29) ont été semés le 21 avril alors que ceux du bas ont été semés 5 jours plus tard. En se référant à la figure 20, il semblerait donc que ce retard de semis ait induit un retard de développement pour ce groupe de trois champs par rapport aux autres parcelles.

## 5.4 Séries temporelles du signal de Sentinel-1

Le signal pour une parcelle est la moyenne des coefficients de rétrodiffusion de chaque pixel de cette parcelle. L'évolution du signal par parcelle est représenté sous forme de fine ligne claire aux figures 32 (DSC) et 33 (ASC). La moyenne de tous les champs est représentée par les lignes foncées plus épaisses. La polarisation VH est représentée en rouge, VV en bleu et le CR en vert.

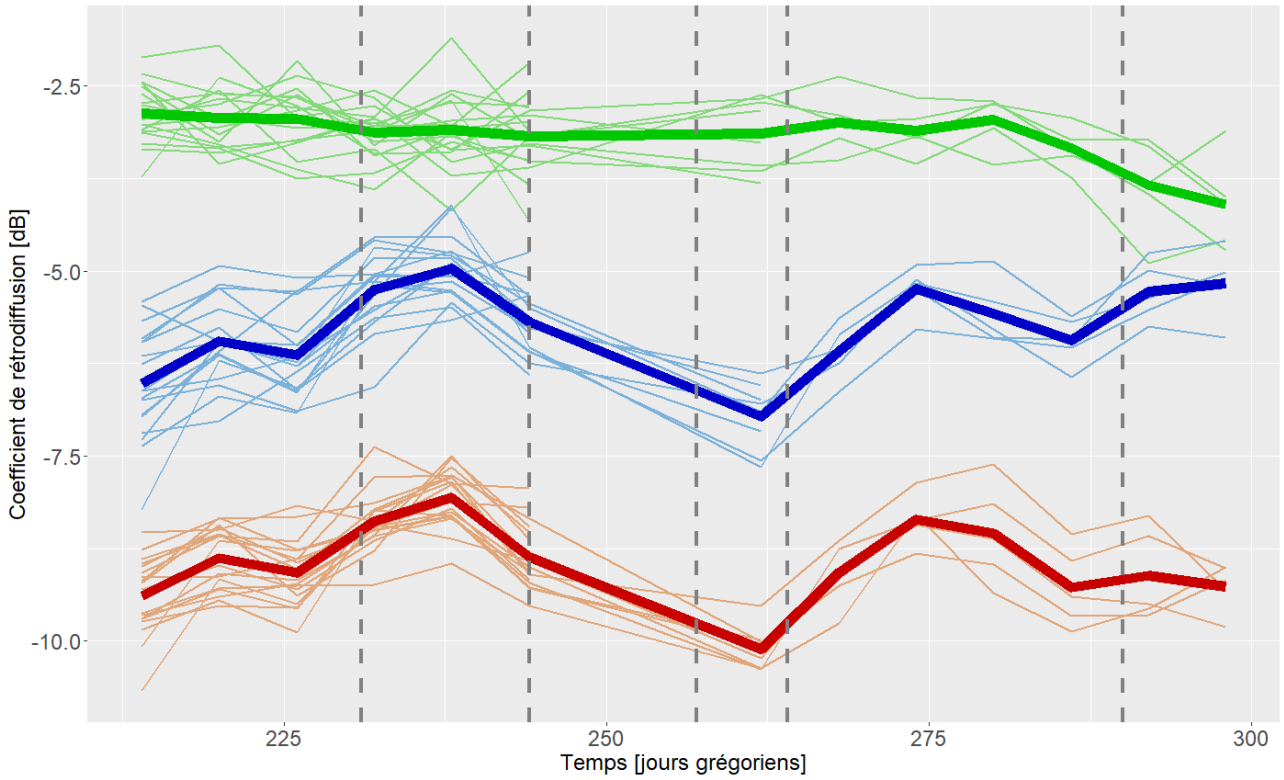



*Figure 32 – Evolution du signal de Sentinel-1 en mode DSC (VH en rouge, VV en bleu, CR en vert) entre août et octobre 2020.*

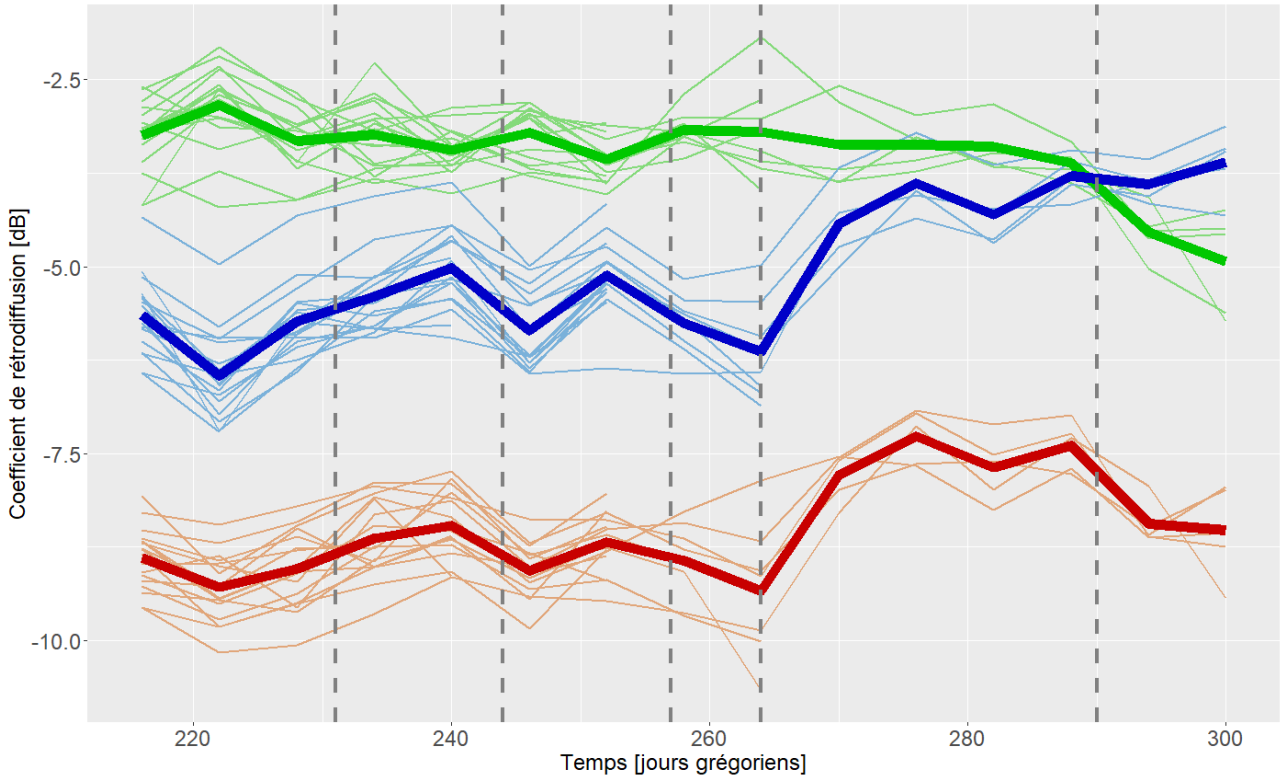



*Figure 33 – Evolution du signal de Sentinel-1 en mode ASC (VH en rouge, VV en bleu, CR en vert) entre août et octobre 2020.*

Le CR est constant tout au long de la saison de culture et diminue en fin de saison, au moment de la récolte. La stabilité de ce paramètre rend peu probable une quelconque corrélation avec les variables de terrain.

La pluie joue un rôle essentiel dans l'évolution du signal pour VV et VH. Le creux observé aux alentours du 262$^{\text{ème}}$ jour est en plein coeur d'une longue période de sécheresse et la remontée qui suit correspond au retour de la pluie.

Les figures 32 et 33 montrent une évolution relativement similaire du signal entre les deux modes. Les modes ASC et DSC ont cependant été séparés car leurs valeurs absolues sont très différentes. Dans les deux figures, VV et VH évoluent de la même manière, comme le montre la stabilité du CR.

Pour le mode DSC (figure 32), aucune donnée n'est disponible entre le 1$^{\text{er}}$ et le 18 septembre (soit entre les jours 245 et 262). Suite à un problème technique, les images n'ont pas pu être traitées par Sen4CAP à ces dates.

## 5.5 Relation entre données de terrain et mesures de Sentinel-1

Dans cette partie, les images de Sentinel-1 sont mises en relation avec les données de terrain en utilisant un modèle de régression linéaire. Les coefficients de détermination ($R^2$) sont recensés

dans les tableaux. Dans le cas d'une régression linéaire univariée (une seule variable prédictive), le coefficient de détermination est égal au carré du coefficient de corrélation linéaire (Bailly et Carrère, 2015).

Les coefficients de détermination sont calculés pour l'ensemble des champs et pour les champs les plus grands. Au total, 11 champs ont un nombre de pixels supérieur à 20.

Les $R^2$ avec une p-valeur inférieure à 0,05 ont été mis en gras.

Au vu des analyses préliminaires, les valeurs du champ "Vandenbergh5" sont considérées comme trop marginales (figure 20 et figure 23). Ce champ n'est donc pas repris dans les analyses suivantes. De fait, son exclusion améliore systématiquement $R^2$.

### 5.5.1 Relation "Matière sèche - Coefficient de rétrodiffusion"

Pour ces coefficients, le dernier passage n'a pas été pris en compte. En effet, son exclusion améliore la corrélation des résultats. La figure 34 montre à quel point les valeurs obtenues pour le dernier passage sont éloignées des autres. C'est l'eau présente dans le sol, et peut-être la rosée à cette période, qui est responsable de la singularité du 5$^{ème}$ passage. Le mode DSC, seul à pouvoir être sujet à la rosée, ne semble pas perturbé par cette dernière, en tout cas jusqu'au 4$^{ème}$ passage, puisque c'est ce mode qui présente les meilleurs coefficients de détermination.

*Tableau 9 – Coefficients de détermination pour la relation entre le signal et la MS en %.*

| | | ASC | DSC |
|---|---|---|---|
| Tous | CR | 0,00 | 0,03 |
| | VH | 0,15 | **0,63** |
| | VV | 0,24 | **0,65** |
| $>$ 20 pixels n = 11 | CR | 0,00 | 0,13 |
| | VH | **0,35** | **0,69** |
| | VV | **0,31** | **0,66** |

On constate que les polarisations VV et VH sont corrélées aux données de terrain en mode DSC. Le Root Mean Square Error (RMSE), un indicateur de l'écart entre la prédiction et les données, en polarisation VV vaut 4,88 % contre 5 % pour VH.

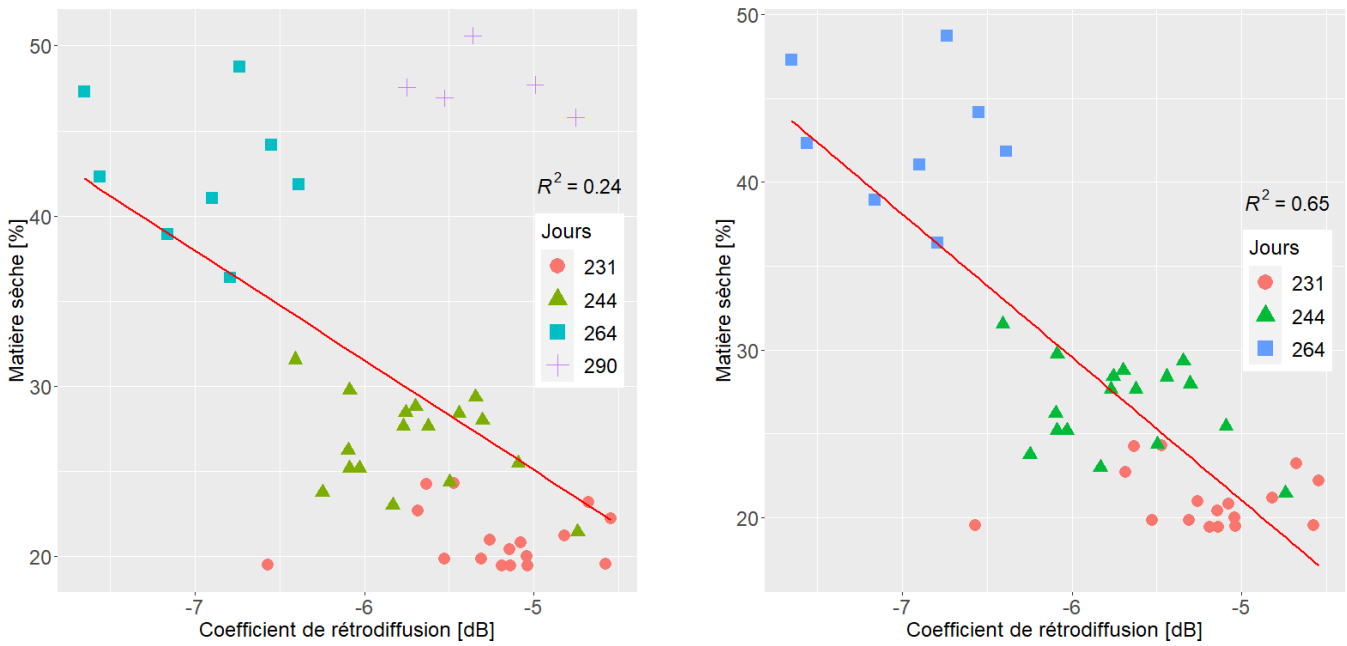



*Figure 34 – Augmentation du $R^2$ avec la suppression du cinquième passage pour la MS en % en mode DSC, polarisation VV.*

Les chiffres de 1 à 5 du tableau 10 représentent le numéro du passage. Les dates de passage *in situ* sont renseignées à la figure 12 et les dates associées de passage du satellite sont renseignées à la section 4.2.3.

*Tableau 10 – Coefficients de détermination pour la relation entre le signal et la MS en % par passage.*

| | | ASC | | | | | DSC | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Tous | CR | 0,00 | 0,05 | 0,03 | 0,00 | 0,12 | 0,05 | 0,22 | / | 0,01 | 0,67 |
| | VH | 0,04 | 0,00 | 0,03 | 0,13 | 0,13 | 0,03 | 0,06 | / | 0,01 | 0,43 |
| | VV | 0,05 | 0,10 | 0,02 | **0,31** | 0,45 | 0,07 | 0,00 | / | 0,02 | 0,12 |
| $>$ 20 pixels n = 11 | CR | 0,08 | 0,09 | 0,07 | 0,07 | / | 0,12 | 0,01 | / | 0,11 | / |
| | VH | **0,32** | 0,21 | **0,66** | 0,01 | / | 0,00 | 0,00 | / | 0,01 | / |
| | VV | 0,06 | 0,24 | 0,21 | 0,01 | / | 0,07 | 0,05 | / | 0,10 | / |

Malgré les $R^2$ élevés (0,43, 0,45 et 0,67), les cinquièmes passages ne sont jamais significatifs. Le nombre d'échantillons (5) est trop faible et, souvent, au moins une valeur est très éloignée de la droite de régression. Sur les 11 champs les plus grands, il n'en reste que 2 au dernier passage et aucune analyse via une régression n'est donc possible.

### 5.5.2 Relation "Biomasse - Coefficient de rétrodiffusion"

Comme pour le pourcentage de matière sèche, les polarisations VV et VH en mode DSC ont les $R^2$ les plus élevés et seuls les quatre premiers passages sont pris en compte pour ce mode.

*Tableau 11 – Coefficients de détermination pour la relation entre le signal et la biomasse.*

| | | ASC | DSC |
|---|---|---|---|
| Tous | CR | 0,00 | 0,00 |
| | VH | 0,03 | **0,47** |
| | VV | 0,02 | **0,57** |
| > 20 pixels n = 11 | CR | 0,00 | 0,07 |
| | VH | 0,19 | **0,67** |
| | VV | 0,27 | **0,55** |

*Tableau 12 – Coefficients de détermination pour la relation entre le signal et la biomasse par passage.*

| | | ASC | | | | | DSC | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Tous | CR | 0,09 | 0,03 | 0,22 | 0,04 | 0,58 | 0,04 | 0,11 | / | 0,04 | 0,63 |
| | VH | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,09 | 0,02 | **0,41** | 0,00 | / | 0,00 | 0,56 |
| | VV | 0,03 | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,51 | **0,40** | **0,30** | / | 0,06 | 0,02 |
| > 20 pixels n = 11 | CR | 0,00 | 0,04 | **0,33** | **0,32** | / | 0,01 | 0,11 | / | 0,07 | / |
| | VH | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,02 | / | **0,30** | 0,00 | / | 0,00 | / |
| | VV | 0,00 | 0,00 | 0,24 | 0,20 | / | 0,28 | 0,16 | / | 0,08 | / |

Pour tous les passages en mode DSC et polarisation VV, le RMSE vaut 7,78 T/ha. Pour les champs supérieurs à 20 pixels en polarisation VH et toujours en DSC, le RMSE vaut 7,17 T/ha. Étonnamment, la corrélation observée sur l'ensemble des passages n'est plus observée lorsque les passages sont séparés.

### 5.5.3 Relation "CWC - Coefficient de rétrodiffusion"

Ce sont encore les polarisations VH et VV en mode DSC qui sont les mieux corrélées aux données de terrain. Seuls les 4 premiers passages ont été pris en compte. De tous les résultats, la meilleure corrélation est le mode DSC en polarisation VV. Son RMSE vaut 6,17 T/ha en polarisation VV et vaut 7,11 T/ha en polarisation VH. L'erreur moyenne absolue (EMA) vaut respectivement 4,99 et 5,42 T/ha

*Tableau 13 – Coefficients de détermination pour la relation entre le signal et le CWC.*

| | | ASC | DSC |
|---|---|---|---|
| Tous | CR | 0,00 | 0,05 |
| | VH | 0,01 | **0,62** |
| | VV | 0,12 | **0,71** |
| > 20 pixels n = 11 | CR | 0,00 | 0,04 |
| | VH | 0,29 | **0,54** |
| | VV | 0,18 | **0,68** |

La figure 35 montre la répartition du CWC en fonction du signal pour la meilleure corrélation (mode DSC, polarisation VV).

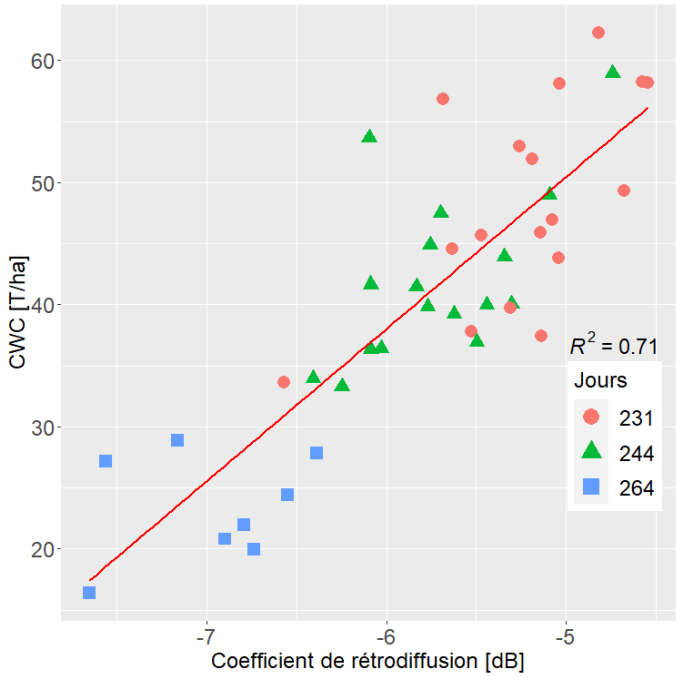



*Figure 35 – Corrélation entre le CWC et le signal en mode DSC polarisation VV.*

*Tableau 14 – Coefficients de détermination pour la relation entre le signal et le CWC par passage.*

| | | ASC | | | | | DSC | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Tous | CR | 0,09 | 0,01 | 0,23 | 0,04 | 0,53 | 0,05 | 0,15 | / | 0,03 | 0,68 |
| | VH | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | **0,39** | 0,01 | / | 0,03 | 0,58 |
| | VV | 0,03 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,54 | **0,41** | 0,35 | / | 0,05 | 0,04 |
| > 20 pixels n = 11 | CR | 0,00 | 0,01 | **0,30** | 0,08 | / | 0,07 | 0,11 | / | 0,10 | / |
| | VH | 0,01 | 0,03 | 0,06 | 0,00 | / | 0,29 | 0,00 | / | 0,00 | / |
| | VV | 0,00 | 0,00 | 0,26 | 0,09 | / | **0,33** | 0,15 | / | 0,09 | / |

La corrélation par passage entre CWC et biomasse est très forte ($R^2 > 0,99$) et pour tous les

passages $R^2$ est égal à 0,92 (figure 36). Le CWC est calculé grâce à la formule 4. Il n'est dès lors pas surprenant d'avoir des résultats similaires entre ces deux variables.

$$CWC_{T/ha} = Biomasse_{T/ha} * (1 - MS_{\%}) \tag{4}$$

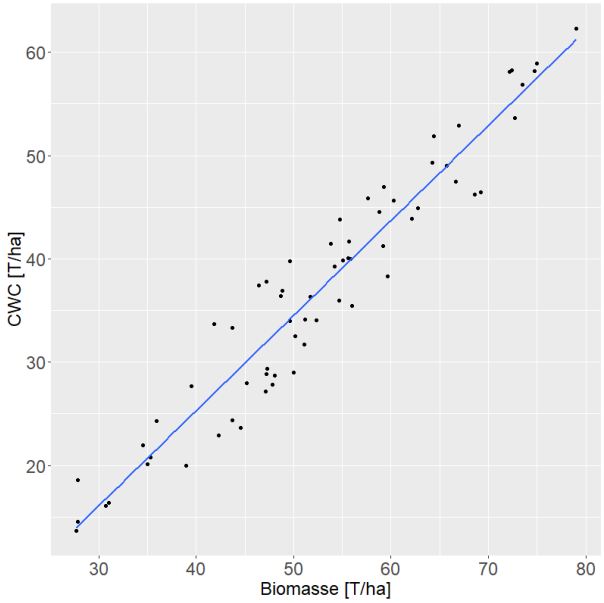



*Figure 36 – Corrélation entre les variables Biomasse et CWC.*

Le coefficient de détermination pour la relation entre la MS et la biomasse n'est égale qu'à 0,42 (figure 37). La relation entre MS et CWC présente un $R^2$ plus élevé valant 0,68 (figure 38). Le CWC étant la variable la plus liée au signal, ceci est encourageant pour la détection de la MS par Sentinel-1.

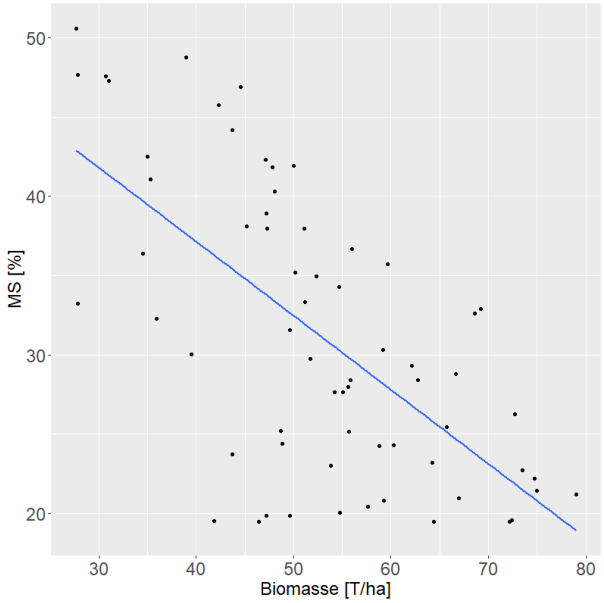



*Figure 37 – Corrélation entre les variables Biomasse et MS.*

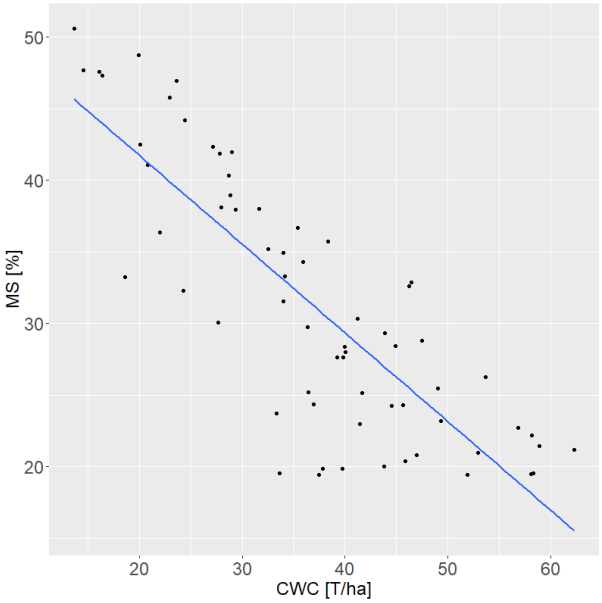



*Figure 38 – Corrélation entre les variables MS et CWC.*

### 5.5.4 Relation "LAI - Coefficient de rétrodiffusion"

Le LAI semble moins correlé en polarisation VH ($R^2$ = 0,36) qu'en polarisation VV ($R^2$ = 0,53). Encore une fois, le mode DSC est celui qui présente les $R^2$ les plus élevés.

*Tableau 15 – Coefficients de détermination pour la relation entre le signal et le LAI.*

| | | ASC | DSC |
|---|---|---|---|
| Tous | CR | 0,01 | 0,00 |
| | VH | 0,13 | **0,36** |
| | VV | 0,27 | **0,53** |
| > 20 pixels n = 11 | CR | 0,01 | 0,00 |
| | VH | **0,32** | **0,37** |
| | VV | **0,36** | **0,60** |

*Tableau 16 – Coefficients de détermination pour la relation entre le signal et le LAI par passage.*

| | | ASC | | | | | DSC | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Tous | CR | 0,04 | 0,03 | 0,04 | **0,43** | 0,04 | 0,28 | 0,15 | / | **0,34** | 0,83 |
| | VH | 0,00 | 0,04 | 0,09 | 0,01 | 0,22 | 0,00 | 0,09 | / | 0,08 | 0,36 |
| | VV | 0,11 | 0,07 | 0,14 | 0,25 | 0,49 | 0,27 | 0,00 | / | 0,20 | 0,33 |
| > 20 pixels n = 11 | CR | 0,01 | 0,07 | 0,00 | **0,40** | / | **0,37** | **0,45** | / | 0,24 | / |
| | VH | 0,52 | 0,14 | **0,45** | 0,01 | / | 0,03 | 0,24 | / | 0,01 | / |
| | VV | 0,11 | 0,17 | 0,12 | **0,43** | / | 0,15 | 0,07 | / | **0,30** | / |

Pour tous les tableaux présentés dans cette section 5.5, le retrait des données mesurées au cinquième passage augmente considérablement les corrélations entre les variables. Par exemple, en mode DSC et polarisation VV, $R^2$ pour la relation CWC-rétrodiffusion, passe de 0,29 à 0,71 en retirant ce dernier passage.

Différents phénomènes physiques peuvent expliquer la non-corrélation des données du dernier passage par rapport aux autres passages. D'une part, l'automne avançant, la rosée est plus marquée sur les plantes et comme Sentinel-1 passe en mode DSC vers 7h30 du matin, ce paramètre a pu influencer le coefficient de rétrodiffusion. D'autre part, ce dernier passage a été effectué après une longue période de pluie et à un moment où le maïs est très sec et donc où le sol prend une part importante du signal. En effet, plus la végétation est clairsemée, plus le signal radar entre en contact avec le sol sans traverser la végétation.

Ces résultats montrent que le mode DSC explique systématiquement une part plus importante de variabilité. Ceci est peut être du au "rebond" du signal en mode ASC le 9 septembre. Comme il n'y a pas d'image pour le mode DSC à cette période, la courbe DSC est lissée et est plus cohérente avec l'évolution des différentes variables. Pour vérifier cette hypothèse de décorrélation à cause du troisième passage, le tableau 17 reprend les coefficients de détermination pour le mode ASC sans le troisième passage. Les $R^2$ augmentent effectivement mais de manière très limitée. L'hypothèse de décorrélation à cause du troisième passage n'est donc peut-être pas valable, et le mode DSC semble donc effectivement plus sensible aux variables de terrain.

*Tableau 17 – Coefficients de détermination pour le mode ASC, sans le passage du 7 septembre et leur changement par rapport aux résultats avec ce passage (tableaux 9, 11, 13 et 15).*

| | | Tous | $\Delta$ Tous | $>$ 20 pixels | $\Delta >$ 20 pixels |
|---|---|---|---|---|---|
| MS | VH | 0,20 | +0,05 | **0,36** | +0,01 |
| | VV | **0,26** | +0,02 | **0,38** | +0,07 |
| LAI | VH | 0,15 | +0,02 | **0,31** | -0,01 |
| | VV | **0,28** | +0,01 | **0,47** | +0,11 |
| CWC | VH | 0,11 | +0,10 | **0,30** | -0,01 |
| | VV | 0,11 | +0,01 | **0,25** | +0,07 |
| Biomasse | VH | 0,05 | +0,02 | 0,21 | +0,02 |
| | VV | 0,04 | +0,02 | 0,14 | +0,13 |

## 5.6 Champs de l'année 2019

Cette section rassemble les résultats pour l'année 2019. Ils sont présentés de la même manière que pour 2020. La figure 39 reprend la légende pour les graphes de l'évolution par champ.

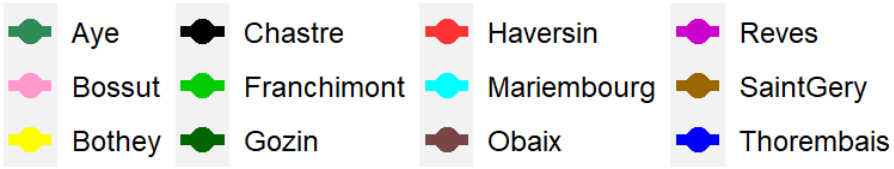



*Figure 39 – Légende des graphiques d'évolution des variables par champ pour l'année 2019.*

### 5.6.1 Analyse exploratoire de la MS et du LAI

La figure 40 montre l'évolution du pourcentage de matière sèche lors de la période d'observation et la figure 41 reprend ce résultat sous forme de moyenne.

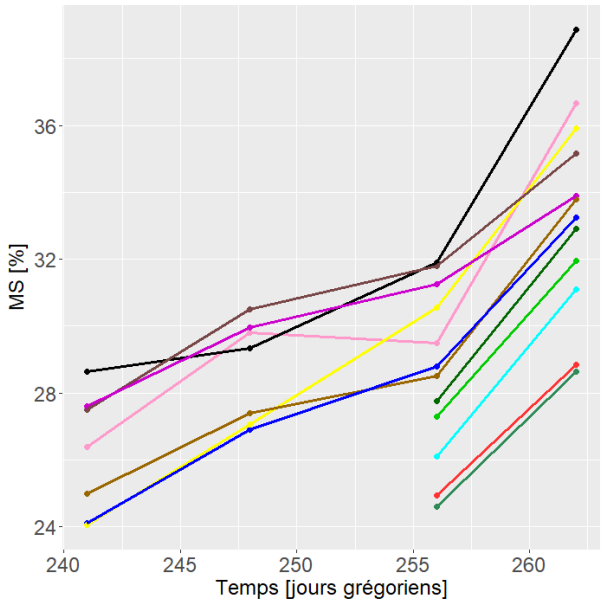



*Figure 40 – Evolution de la MS par champ entre le 29/08 et le 21/09 2019.*

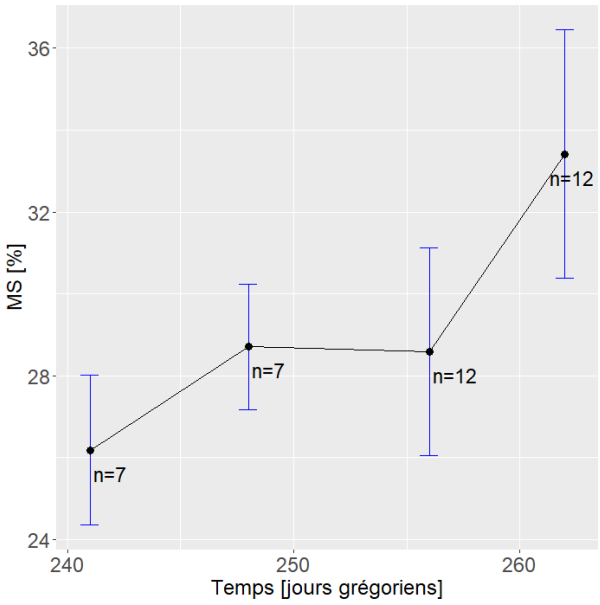



*Figure 41 – Evolution de la MS moyenne entre le 29/08 et le 21/09 2019.*

Comme attendu, la MS augmente pendant la saison. Sur la figure 41, le pourcentage de matière sèche moyen au 256$^{ème}$ jour est quasi identique à celui du passage précédent (248$^{ème}$ jour). Cela est sans doute justifié par l'ajout de cinq champs manifestement moins avancés que les autres. La matière sèche moyenne est de 26 % au 241$^{ème}$ jour, ce qui est similaire à la campagne de 2020 (27 % au 244$^{ème}$ jour). Le dernier passage, lui, est inférieur (33 % en 2019 contre 42 % en 2020). Une hypothèse pourrait être que les champs de 2019 sont dans des régions agricoles différentes. Ceci est confirmé par le fait que les 5 champs localisés en Famenne (et qui ne sont échantillonnés que deux fois) présentent les pourcentages de MS les plus faibles. En retirant ces cinq champs, le pourcentage de matière sèche moyen vaut 35%, ce qui reste nettement plus faible qu'en 2020.

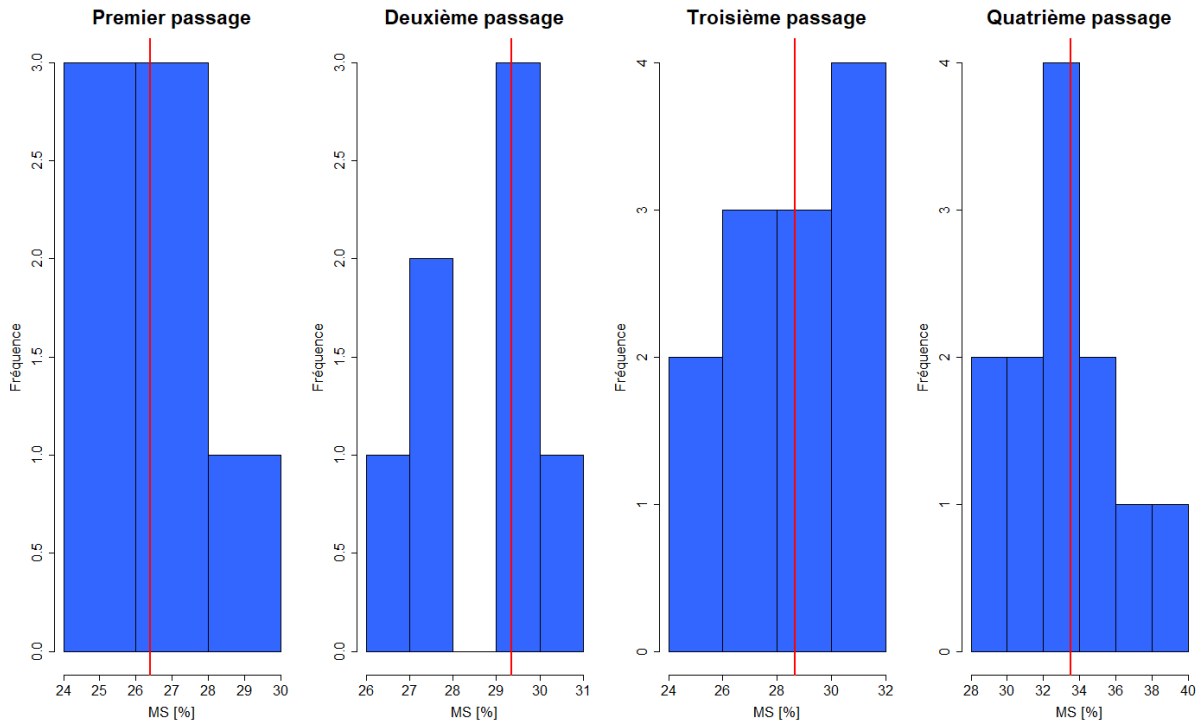



*Figure 42 – Histogrammes de répartition de la matière sèche en % par passage en 2019 (la médiane est en rouge).*

Le LAI décroît de manière constante. Les champs démarrent leur séchage à des stades différents mais suivent la même évolution. L'hétérogénéité de ces champs est importante comme le montre la figure 45. Il est à noter que deux champs ne sont pas repris dans les figures 43 et 44 car les mesures de LAI pour ces champs sont aberrantes, elles sont égales à 0.

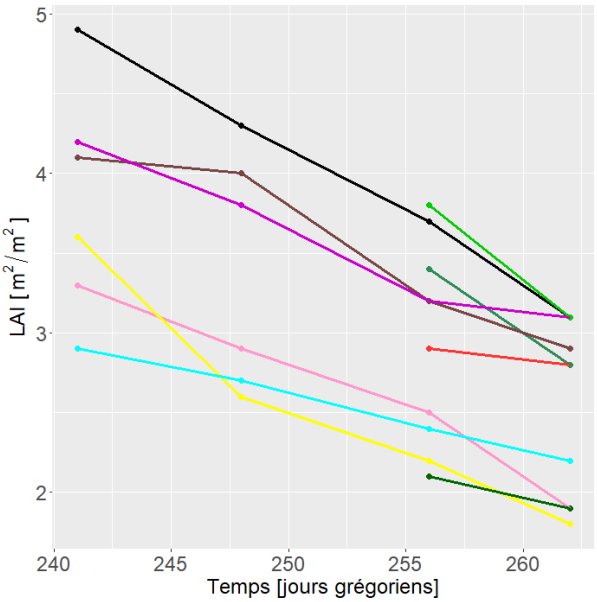



*Figure 43 – Evolution du LAI par champ entre le 29/08 et le 21/09 2019.*

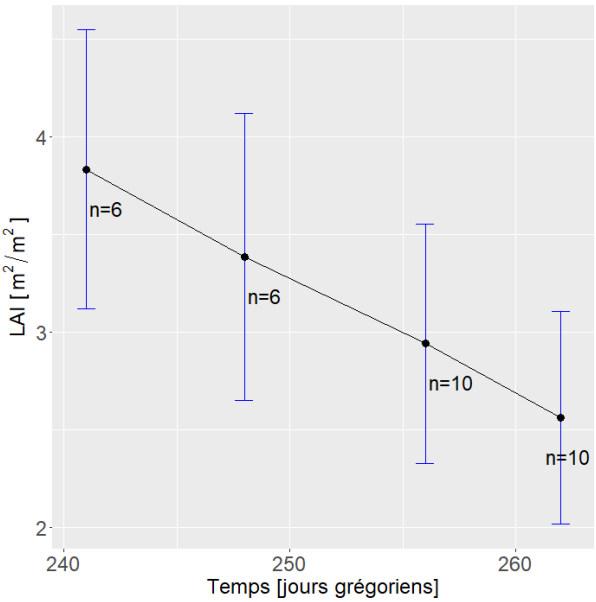



*Figure 44 – Evolution du LAI moyenne entre le 29/08 et le 21/09 2019.*

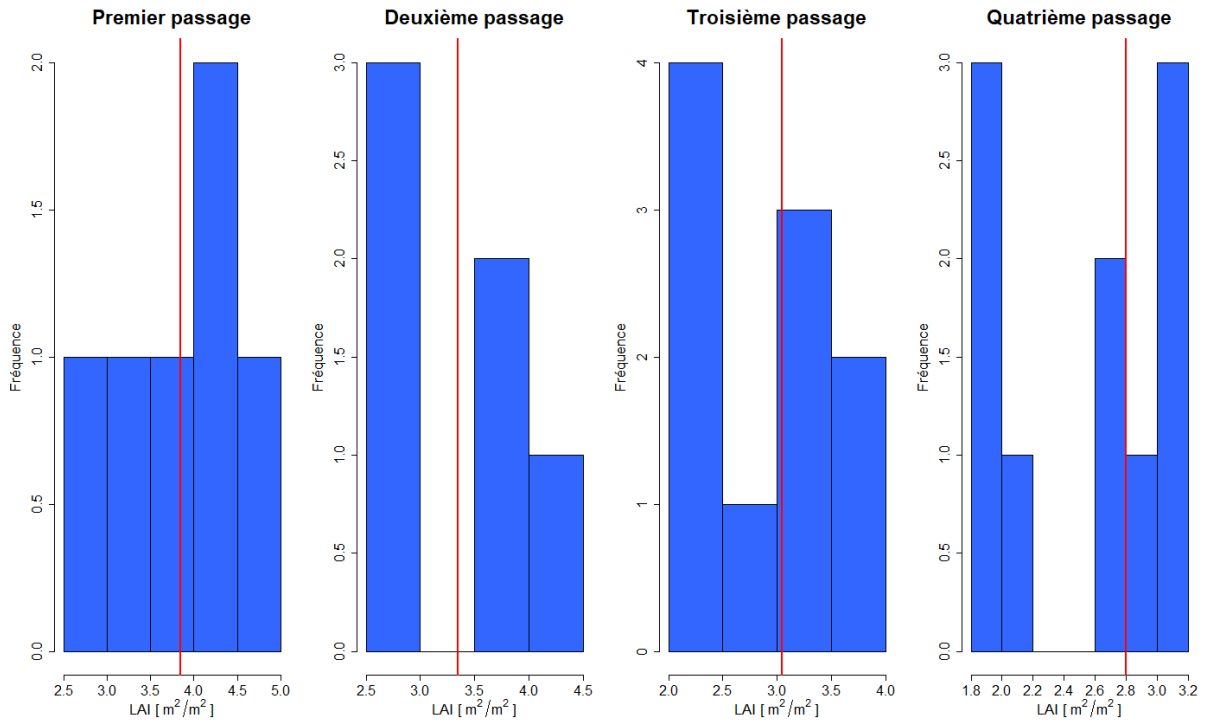



*Figure 45 – Histogrammes de répartition du LAI par passage en 2019 (la médiane est en rouge).*

### 5.6.2 Évolution du signal

Les figures 46 et 47 montrent l'évolution des coefficients de rétrodiffusion de Sentinel-1 en août et septembre 2019. Les lignes pointillées référencent les dates de collectes *in situ*.

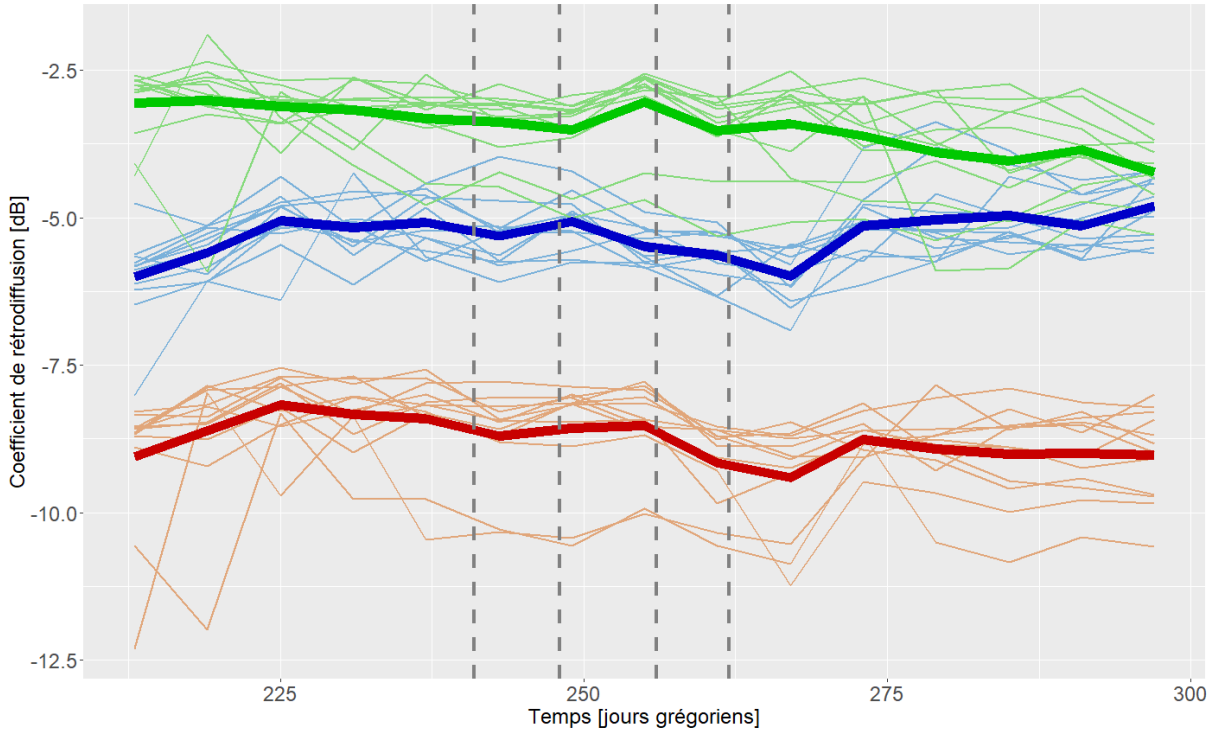



*Figure 46 – Evolution du signal de Sentinel-1 pour le mode DSC (VH en rouge, VV en bleu, CR en vert) entre août et septembre 2019.*

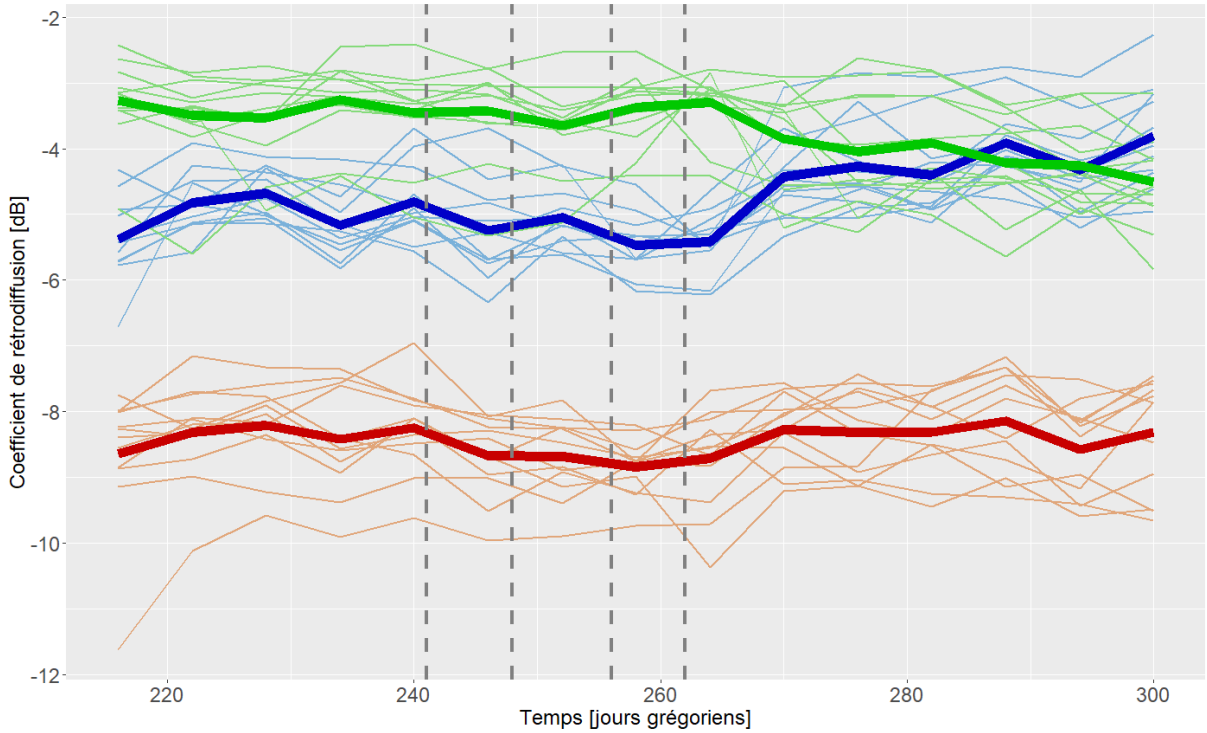



*Figure 47 – Evolution du signal de Sentinel-1 pour le mode ASC (VH en rouge, VV en bleu, CR en vert) entre août et septembre 2019.*

### 5.6.3 Lien entre les variables et le signal

La présentation des résultats ne reprend pas une séparation par passage car il a été constaté dans la section 5.5 que cette séparation n'améliore pas significativement les résultats.

*Tableau 18 – Coefficients de détermination pour la MS et le LAI en 2019.*

| | | ASC | DSC |
|---|---|---|---|
| MS | CR | 0,00 | 0,09 |
| | VH | 0,02 | 0,15 |
| | VV | 0,02 | 0,05 |
| LAI | CR | 0,04 | 0,00 |
| | VH | 0,08 | 0,17 |
| | VV | 0,19 | 0,16 |

Le lien entre le LAI et le signal en mode ASC et polarisation VV est représenté à la figure 48, ce sont ces paramètres qui présentent le meilleur coefficient de détermination.

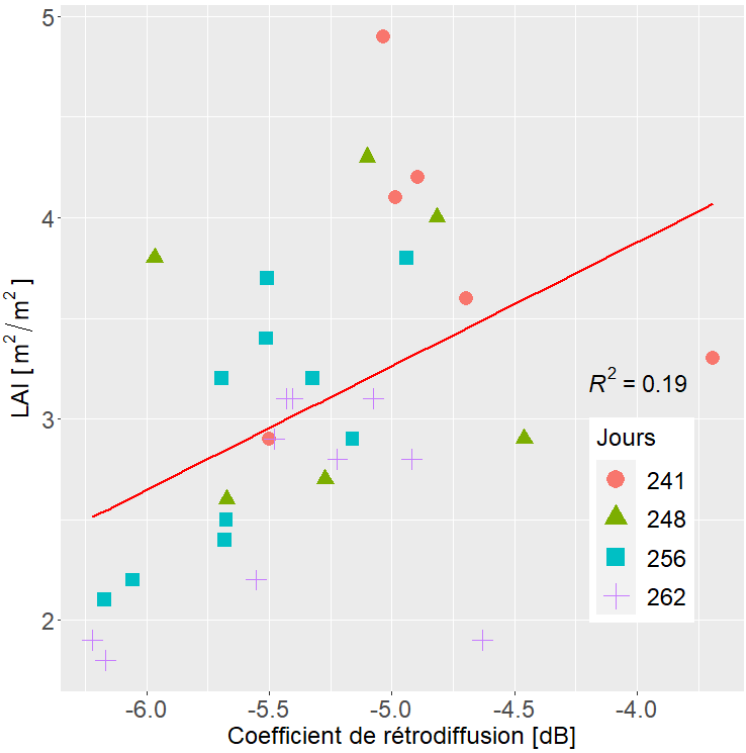



*Figure 48 – Nuage de points pour le LAI en mode ASC et polarisation VV.*

On peut voir que les coefficients sont beaucoup moins explicatifs qu'en 2020. Cela est peut-être dû à la dispersion des champs en Wallonie et donc aux conditions hydriques, de température et à des régions agricoles différentes. La figure 49 montre la meilleur corrélation pour la MS.

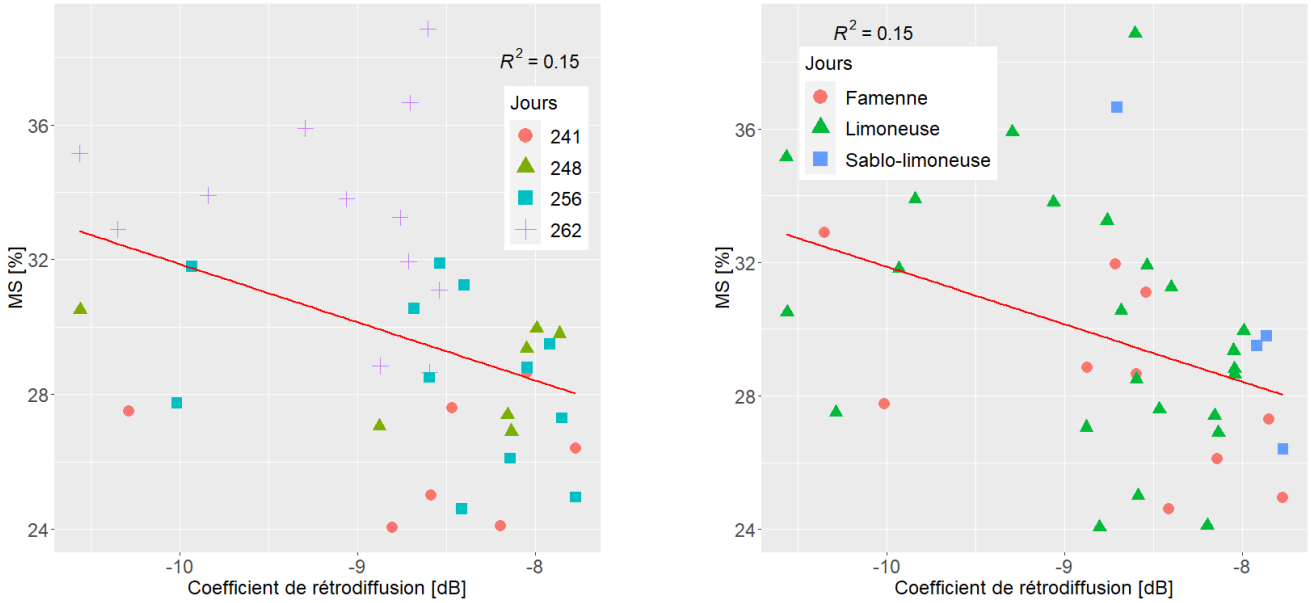



*Figure 49 – Nuage de points pour la MS en mode DSC, polarisation VH en fonction de la date de passage (gauche) et des régions agricoles (droite).*

# Chapitre 6 - Discussion

Comme attendu, le CWC est la variable la plus fortement corrélée au signal de Sentinel-1. Pour cette variable, le mode DSC est celui qui donne le meilleur résultat, avec un $R^2$ de 0,71 en polarisation VV et 0,62 en polarisation VH. Cela s'explique par le fait que le satellite détecte l'eau sur le champ et que le CWC est l'expression de cette eau sur le champ. Dès lors, en toute logique, il existe un lien entre ces deux variables. Néanmoins, le mode ASC n'explique qu'une partie minime de la variabilité du CWC. Au mieux, le mode ASC explique 12 % de la variabilité en regardant tous les champs et 29 % en ne considérant que les champs de plus de 20 pixels ($>$ 80 ares). Pour le mode DSC, le RMSE vaut 6,17 T/ha en polarisation VV et 7,11 T/ha en polarisation VH. Leurs EMA valent respectivement 4,99 et 5,42 T/ha. La valeur moyenne des CWC observée au quatrième passage (le dernier représentatif) vaut 23,4 T/ha. L'erreur relative (RRMSE), pour la meilleure corrélation (DSC et VV), est de 26 % avec le RMSE et de 21 % avec l'EMA. Cette erreur est conséquente, elle ne permet pas de donner, de manière fiable, la quantité de CWC en fin de saison. Cette variable peut toutefois être utile pour donner une idée de l'état d'avancement des champs entre eux.

Le lien entre la biomasse et le CWC est très fort ($R^2 = 0{,}92$). Cependant, la part de variabilité de la biomasse expliquée par le signal est plus faible que pour le CWC. Au mieux, en polarisation VV, cette part vaut 57 %. En polarisation VH, elle vaut 47 %. Il est mis en évidence que lorsque seuls les champs de plus de 20 pixels sont utilisés, ce dernier résultat monte à 67 %. Le mode ASC est celui qui bénéficie le plus d'une amélioration des résultats lorsque seuls les champs les plus grands sont utilisés. Par exemple, en polarisation VH, le $R^2$ augmente de 0,17 et de 0,25 en polarisation VV. Aucune de ces deux nouvelles valeurs n'est significative. Le RMSE vaut 7,17 T/ha dans le meilleur des cas (DSC, VH, pour champs les plus grands) et la biomasse moyenne, au moment de la récolte, est de 45,5 T/ha. Cela représente une erreur de 16 %, c'est élevé mais meilleur que pour le CWC.

Comme une relation avec le signal a été montrée pour la biomasse et le CWC, il est intéressant de voir si cette relation existe aussi pour le pourcentage de MS. On le sait, la MS peut être retrouvée avec la biomasse et CWC en utilisant l'équation 4. C'est à nouveau le mode DSC qui fournit les coefficients de détermination les plus élevés ($R^2$ VH = 0,63 et $R^2$ VV = 0,65). Pour la première fois, la suppression des champs trop petits améliore nettement les $R^2$ pour le mode ASC. En mode VH et VV, ils passent respectivement de 0,15 et 0,24 à 0,35 et 0,31, les rendant significatifs (p-valeur $<$ 0,05). Le RMSE de cette variable en mode DSC polarisation VV vaut 4,88 %. A cause de la pluie, les champs du 5$^{\text{ème}}$ passage ont été récoltés beaucoup plus tard que les autres champs. Le pourcentage de matière sèche au moment de cette dernière récolte est donc nettement plus élevé que le reste des parcelles. Si ce 5$^{\text{ème}}$ passage n'est pas pris en compte, le pourcentage de matière sèche moyen au moment de la récolte vaut 37,7 %. L'erreur relative de cette méthode pour le pourcentage de matière sèche est donc de l'ordre de 13 %. C'est le pourcentage d'erreur le plus petit obtenu jusqu'à présent. C'est encourageant et

le signal radar en bande C de Sentinel-1 peut être considéré comme un potentiel indicateur de suivi du pourcentage de matière sèche des champs.

Cette variable a aussi été étudiée en 2019 grâce à des données d'observation fournies par le CIPF. Les résultats sont moins probants que pour la campagne de 2020. Aucun $R^2$ n'a de p-valeur significative et le $R^2$ le plus élevé vaut 0,15 pour le mode DSC en polarisation VH. De nombreux facteurs peuvent expliquer ces moins bons résultats. D'abord, la méthode de prélèvement dans les champs du CIPF n'a pas été construite pour répondre aux objectifs de ce mémoire. Ensuite, les champs sont mieux répartis sur la Wallonie, par conséquent ils ne se trouvent pas dans les mêmes régions agricoles. De ce fait, les conditions de pluviométrie, les températures cumulées, le relief et les types de sol sont différents, ce qui peut engendrer de la variabilité dans le signal. Enfin, aucune indication sur l'hétérogénéité de ces champs n'était disponible. Il est donc possible que des plants de maïs très différents aient été regroupés dans la même parcelle. Une seule valeur de MS est disponible par champ, mais il est impossible de savoir quel type de maïs elle représente alors que le signal prend en compte l'entièreté du champ. Ceci peut expliquer les faibles coefficients de détermination pour l'année 2019.

Le LAI est la dernière variable analysée. Elle a été trouvée indirectement via la plateforme Belcam et n'a donc pas été prélevée sur le terrain. Sa corrélation avec le signal est faible, au mieux 53 % de la variabilité est expliquée par le signal (mode DSC et polarisation VV). Le RMSE, pour cette corrélation, est de 0,57 $m^2/m^2$ soit une erreur relative de 40 % au moment de la récolte. Le LAI, estimé de cette manière, n'est donc pas un indicateur fiable de l'état de la végétation au moment de la récolte. Ce résultat décevant peut être dû au fait que le LAI présenté sur Belcam est lui-même une estimation via Sentinel-2 et possède déjà une marge d'erreur. Duveiller et al. (2011) indiquent que pour le blé d'hiver, l'erreur sur le LAI avec cette méthode est de l'ordre de 30 %. En 2019, la combinaison avec le meilleur coefficient de détermination est le mode ASC VV ($R^2$ = 0,19), suivi de près par DSC VH ($R^2$ = 0,17) et DSC VV ($R^2$ = 0,16). Comme pour 2020, aucun des coefficients n'a de p-valeur inférieure à 0,05. Ceci peut être expliqué par les mêmes raisons que celle exposées pour 2020 et parce que les résultats de 2019 sont globalement moins significatifs, comme expliqué au paragraphe précédent.

Contrairement à ce dont on s'attendait, le découpage par passage n'apporte aucune amélioration aux résultats. Ce résultat peut être du au fait que cette décomposition diminue la gamme de valeurs et augmente donc la variabilité.

Le mode DSC de Sentinel-1 est le mieux corrélé aux variables physiques, particulièrement à la matière sèche (0,69) et au CWC (0,71). La courbe DSC est plus constante, il n'y a pas de "rebond" du signal le 9 septembre comme on peut le voir sur le graphe ASC. Le "rebond" est certainement la conséquence des 3 jours de pluie les 3, 4 et 5 septembre. C'est le manque de données début septembre, suite à une erreur de Sen4CAP, qui lisse la courbe DSC. Ce lissage de la courbe peut expliquer pourquoi ce mode est mieux corrélé (tableaux 9, 11, 13 et 15) aux

observations de terrain qui croissent (MS) ou décroissent (Biomasse, CWC, LAI) de manière constante. Néanmoins, supprimer le passage du 7 septembre sur le mode ASC ne permet d'augmenter le $R^2$ que de 0,28 à 0,47 dans le meilleur des cas (LAI en polarisation VV). Bien que supprimer ce passage permette d'augmenter systématiquement la corrélation, les coefficients de détermination atteints avec cette méthode ne sont pas aussi bons que ceux en mode DSC.

Eliminer le $5^{ème}$ passage dans l'analyse des données de 2020 augmente systématiquement le $R^2$. Ce passage suit un long épisode pluvieux. Supprimer les jours où il a plu permet donc de mieux estimer les variables physiques. Ce point doit être pris en compte pour la potentielle création d'un outil de calcul de la matière sèche via Sentinel-1 dans Belcam.

Il faudrait ne pas tenir compte des jours où il pleut et des jours où il a plu endéans les 2 jours. En Belgique, tenir compte de cette contrainte est difficile, particulièrement en fin de saison de culture du maïs, correspondant au début de l'automne. De nombreuses années risquent de ne pas réunir les conditions pour avoir des résultats. En 2020 par exemple, 187 jours sur 366 ne sont pas précédés d'une pluie d'au moins 3 mm endéans les deux jours. Cela veut dire qu'en moyenne 50% des images de Sentinel-1 ne sont pas utilisables.

L'idéal serait de développer un modèle calibré sur une période sèche ayant lieu pendant la saison de culture. Par exemple, une bonne période d'essai débuterait après que le maïs ait commencé à sécher et durerait minimum deux semaines. Le modèle pourrait calculer les variables physiques du champ de maïs sur base des coefficients de rétrodiffusion VV et VH à ce moment-là. Le modèle créerait ensuite une courbe d'évolution attendue de la culture en vue d'estimer les valeurs de ces paramètres en fin de saison. Et ainsi donner aux agriculteurs un outil utile pour définir leur date optimale de récolte. La matière sèche est la variable d'intérêt pour définir la date de récolte. Les résultats montrent que la matière sèche peut être directement déduite des valeurs du signal. C'est même le deuxième paramètre le mieux corrélé au signal.

Une autre idée pour s'affranchir de l'eau résiduelle dans le sol serait de déduire du signal la part d'eau non contenue dans le maïs. Encore une fois, cela nécessite la création d'un modèle qui rendrait possible l'estimation du pourcentage de matière sèche avec les valeurs de Sentinel-1 même les jours où le sol est gorgé d'eau.

Il peut y avoir différentes limites à l'utilisation des données. La pluie en est une et l'effet de speckle, particulièrement gênant sur les petits champs, peut aussi être une limite. L'analyse des tableaux 9, 11, 13, 15 établi l'amélioration entre les champs supérieurs à 20 pixels et les autres en mode ASC. Ces valeurs ne sont jamais significatives mais cela montre que la taille des champs peut être une limite à l'analyse des données.

# Chapitre 7 - Conclusion

Le travail effectué dans ce mémoire a permis de montrer que l'utilisation de Sentinel-1 pour le suivi de la matière sèche des cultures de maïs, dans l'objectif de donner aux agriculteurs des informations pour définir une date optimale de récolte, présente un réel potentiel. D'une part, la matière sèche révèle un coefficient de détermination de 0,69 dans les meilleures conditions, d'autre part, les données récoltées par Sentinel-1 sont aussi corrélées avec d'autres variables physiques mesurées sur le terrain (LAI = 0,60 - CWC = 0,71 - Biomasse = 0,67).

L'eau sous forme de pluie ou sous forme d'humidité résiduelle dans le sol ou sur les plantes, joue un rôle majeur dans la détermination de la matière sèche via les coefficients de rétrodiffusion de Sentinel-1. Une recommandation est de supprimer les jours sous l'influence de la pluie, c'est-à-dire les jours où il pleut et ceux où il a plu endéans les 3 jours. Mais cette soustraction est difficile à implémenter si les champs sont répartis sur le territoire wallon et donc soumis à des conditions hydriques différentes. Pour l'entièreté de la Wallonie et pour chaque champ, il est difficile de savoir quels jours sont à supprimer. Parfois il a plu sur l'un et pas sur l'autre, cela rend la tâche fastidieuse. De plus, il pleut régulièrement sur la Wallonie, particulièrement en fin de saison, supprimer tous les jours influencés par la pluie réduit de 50 % l'échantillon de données. Calibrer un modèle sur une portion de la saison de culture représentative (suffisamment tardive et suffisamment sèche) peut être une piste d'exploration. Cela permettrait, ensuite, de prédire l'état du maïs en fin de saison si jamais celle-ci est trop pluvieuse.

La taille des champs est une autre contrainte. Bien que l'exclusion des champs trop petits n'ait pas montré d'amélioration significative des résultats en mode DSC, le mode ASC, en revanche, est nettement mieux corrélé aux variables de terrain après la suppression des champs de moins de 20 pixels. Il y a donc deux contraintes : l'eau et la taille des champs. Ces deux variables sont les principales limites à l'utilisation de cette méthode.

Ce mémoire met en évidence que la création d'un outil pour le suivi de la matière sèche, avec une faible résolution temporelle, est réaliste. Le mode DSC est pressenti pour donner les meilleurs résultats et l'affranchissement des deux contraintes citées permettrait l'élaboration de cet outil en vue de son incorporation, par exemple, à la plateforme Belcam.

# Références

Attema, E. P. W. & Ulaby, F. T. (1978). Vegetation modeled as a water cloud. *Radio Science*, *13*(2), 357-364. https://doi.org/https://doi.org/10.1029/RS013i002p00357

Augier, A. (2011). *Etude de l'éruption d'avril 2007 du Piton de la Fournaise (île de la Réunion) à partir de données d'interférométrie RADAR et GPS, développement et application de procédures de modélisation* (thèse de doct.). Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00997945

Augier, A. (2020). Interférométrie radar : principes et utilisation dans la surveillance de la déformation du sol. *Planet Terre*. https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/interferometrie-radar.xml

Aydin, K. & Giridhar, V. (1992). C-Band Dual-Polarization Radar Observables in Rain. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, *9*(4), 383-390. https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0426(1992)009<0383:CBDPRO>2.0.CO;2

Bailly, P. & Carrère, C. (2015). *Statistiques descriptives : Théorie et applications*. Presses universitaires de Grenoble.

Bériaux, E., Waldner, F., Colienne, F., Bogaert, P. & Defourny, P. (2015). Maize Leaf Area Index Retrieval from Synthetic Quad Pol SAR Time Series Using the Water Cloud Model. *Remote Sensing*, *7*(12), 16204-16225. https://doi.org/10.3390/rs71215818

Bériaux, E., Lambot, S. & Defourny, P. (2011). Estimating surface-soil moisture for retrieving maize leaf-area index from SAR data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, *37*(1), 136-150. https://doi.org/10.5589/m11-021

Beriaux, E., Lucau-Danila, C., Auquiere, E. & Defourny, P. (2013). Multiyear independent validation of the water cloud model for retrieving maize leaf area index from SAR time series. *International Journal of Remote Sensing*, *34*(12), 4156-4181. https://doi.org/10.1080/01431161.2013.772676

Carnec, C. (1993). Interférométrie radar différentielle - Application à la détection des mouvements de terrain. *BRGM*.

Chen, Z., He, Y., Zhang, B. & Ma, Y. (2017). A Method to Correct the Influence of Rain on X-Band Marine Radar Image. *IEEE Access*, *5*, 25576-25583. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2772784

Conseil européen. (2020). *L'avenir de la PAC après 2020*. Récupérée 3 décembre 2020, à partir de https://www.consilium.europa.eu/fr/policies/cap-future-2020/#

Copernicus. (2020). *Copernicus*. Récupérée 20 janvier 2021, à partir de https://www.copernicus.eu/fr/propos-de-copernicus

Duveiller, G., Weiss, M., Baret, F. & Defourny, P. (2011). Retrieving wheat Green Area Index during the growing season from optical time series measurements based on neural network radiative transfer inversion. *Remote Sensing of Environment*, *115*(3), 887-896. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.11.016

Earth Observing System. (2014). *Sentinel 1 Characteristics*. Récupérée 2 octobre 2020, à partir de https://eos.com/sentinel-1/

ESA. (2020). *Sen4CAP - Sentinels for Common Agriculture Policy*. Récupérée 3 décembre 2020, à partir de http://esa-sen4cap.org/

Ferro, A., Brunner, D., Bruzzone, L. & Lemoine, G. (2011). On the Relationship Between Double Bounce and the Orientation of Buildings in VHR SAR Images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, *8*(4), 612-616. https://doi.org/10.1109/LGRS.2010.2097580

Filagri. (2018). *Caractéristiques générales de la production laitière en Wallonie*. Récupérée 4 novembre 2020, à partir de https://filagri.be/bovins-laitiers/chiffres-cles-bovins-laitiers/

Filagri. (2020). *Chiffres clés*. Récupérée 5 décembre 2020, à partir de https://filagri.be/viande-bovine/chiffres-cles-viande-bovine/

Filipponi, F. (2019). Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow. *Proceedings*, *18*(1). https://doi.org/10.3390/ECRS-3-06201

Goualan, N. (2014). *Utiliser les sommes de températures*. Récupérée 7 novembre 2020, à partir de https://www.paysan-breton.fr/2014/05/utiliser-les-sommes-de-temperatures/

Hachemi, K., Abdellaoui, A., Ozer, A., Grecu, F. & Visan, G. (2009). Apport de l'imagerie radar SAR (Images d'Amplitude) pour l'analyse des aléas et du changement dans la région de Buzău (Roumanie). *Revista de Geomorfologie*, *11*, 63-72. https://doi.org/http://hdl.handle.net/2268/249774

IEEE. (2013). *A tutorial on synthetic aperture radar*.

Irwin, D., Flores-Anderson, A. I., Herndorn, K. E., E.Cherrington, Thapa, R. B., Kucera, L., Quyen, N. H., Oduor, P., Wahome, A., Tenneson, K., Mamane, B., Saah, D., Chrishtie, F., Limaye, A., F.Meyer, Kellndorfer, J. & Siqueira, P. (2019). The SAR Handbook. *SERVIR Global Science Coordination Office*. https://doi.org/10.25966/nr2c-s697

Jong-Sen Lee, Grunes, M. R. & Pottier, E. (2001). Quantitative comparison of classification capability : fully polarimetric versus dual and single-polarization SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *39*(11), 2343-2351. https://doi.org/10.1109/36.964970

Lafont, Lafont, J., Mousset, S. & Frayssinet, C. (1980). Étude de la contamination du lait de vache lors de l'ingestion de faibles quantités d'aflatoxine. *Annales de la nutrition et de l'alimentation*, *34*(4), 699-707. http://www.jstor.org/stable/45123663

Lambert, R., Amerlynck, D., Foucart, G., Mary, M., Oost, J., Renard, F., Crémer, S., Knoden, D. & Widar, J. (2014). *La culture du maïs en Ardenne ; Le cas du Parc Naturel Haute-Sûre Forêt d'Anlier*. https://www.researchgate.net/publication/275030546

Mandal, D., Hosseini, M., McNairn, H., Kumar, V., Bhattacharya, A., Rao, Y., Mitchell, S., Robertson, L. D., Davidson, A. & Dabrowska-Zielinska, K. (2019). An investigation of inversion methodologies to retrieve the leaf area index of corn from C-band SAR data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *82*, 101893. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.06.003

McNairn, H., Champagne, C., Shang, J., Holmstrom, D. & Reichert, G. (2009). Integration of optical and Synthetic Aperture Radar (SAR) imagery for delivering operational annual crop inventories [Theme Issue : Mapping with SAR : Techniques and Applications].

*ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *64*(5), 434-449. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2008.07.006

Moquet, M. & Ferard, A. (2018). *Maïs Fourrage récoltés trop sec : quelles conséquences ?* Récupérée 8 novembre 2020, à partir de https://www.arvalis-infos.fr/ma-s-fourrage-recoltes-trop-secs-quelles-consequences--@/view-28325-arvarticle.html

Olivier, C. & Quegan, S. (2014). Understanding SAR images.

Omafra. (2016). *Utilisation du maïs endommagé par la sécheresse comme ensilage*. Récupérée 8 novembre 2020, à partir de http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/facts/drought.htm

Pandžić, M., Ljubičić, N., Mimić, G., Pandžić, J. & Pejak, B. (2020). A case study of monitoring maize dynamics in Serbia by utilizing Sentinel-1 data and growing degree days. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *3*, 117-124. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-3-2020-117-2020

Petel, T., Antier, C. & Baret, P. (2018). Etat Des Lieux et Scénarios à Horizon 2050 de La Filière Viande Bovine En Région Wallonne. *Earth and Life Institute-Université catholique de Louvain (UCL)*.

Statbel. (2019). Récupérée 7 novembre 2020, à partir de https://statbel.fgov.be/sites/default/files/files/documents/landbouw/8.1%5C%20Land-%5C%20en%5C%20tuinbouwbedrijven/L06-2019-PROV-WEB-BE-FR.xlsx

Tamm, T., Zalite, K., Voormansik, K. & Talgre, L. (2016). Relating Sentinel-1 Interferometric Coherence to Mowing Events on Grasslands. *Remote Sensing*, *8*(10), 802. https://doi.org/10.3390/rs8100802

Tre Altamira. (2020). *SAR imagery*. Récupérée 28 novembre 2020, à partir de https://site.tre-altamira.com/insar/

UCLouvain. (2020). *Sen4CAP : Sentinels for the Common Agricultural Policy*. Récupérée 3 décembre 2020, à partir de https://eo4society.esa.int/projects/sen4cap-sentinels-for-the-common-agricultural-policy/

Xu, J., Meng, J. & Quackenbush, L. J. (2019). Use of remote sensing to predict the optimal harvest date of corn. *Field Crops Research*, *236*, 1-13. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.03.003

# Suivi par télédétection du pourcentage de matière sèche des cultures de maïs en Wallonie grâce aux images SAR en bande C de Sentinel-1

Thibault Castin

En Wallonie, les productions de viande et de lait par les bovins représentent une part importante de la production agricole. Une des principales sources de nourriture pour ces bovins est le maïs. Le maïs est semé fin avril et le choix de la date de récolte, souvent entre septembre et octobre, est un enjeu important pour l'agriculteur. Il doit récolter à une date qui maximise le rendement et les qualités nutritives du maïs. L'élément clé qui détermine ces deux variables est la teneur en matière sèche des plants.

Ce mémoire a pour objectif de mettre au point une méthode permettant de connaître l'état d'avancement d'une parcelle de maïs grâce aux images de Sentinel-1 et d'évaluer les performances de cette méthode. Pour y parvenir, le pourcentage de matière sèche et la quantité de biomasse, relevés lors d'une campagne de terrain, sont mis en relation avec les coefficients de rétrodiffusion captés par Sentinel-1.

Le travail effectué dans ce mémoire a permis de montrer que l'utilisation de Sentinel-1 pour le suivi de la matière sèche des cultures de maïs, dans l'objectif de donner aux agriculteurs des informations pour définir une date optimale de récolte, présente un réel potentiel. D'une part, la matière sèche révèle un coefficient de détermination de 0,69 dans les meilleures conditions, d'autre part, les données récoltées par Sentinel-1 sont aussi corrélées avec d'autres variables physiques mesurées sur le terrain (LAI = 0,60 - CWC = 0,71 - Biomasse = 0,67).

Ce mémoire met en évidence que la création d'un outil pour le suivi de la matière sèche, avec une faible résolution temporelle grâce aux images SAR en bande C de Sentinel-1, est réaliste. Le mode DSC est pressenti pour donner les meilleurs résultats et l'affranchissement des contraintes d'humidité et de taille des champs permettrait l'élaboration de cet outil en vue de son incorporation à la plateforme Belcam.

**UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN**
**Faculté des bioingénieurs**
Croix du Sud, 2 bte L7.05.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | **www.uclouvain.be/agro**