

---

## **Estimation de l'effet biophysique Albédo sur l'impact climatique de l'utilisation des cultures intermédiaires : Exemple de cas sur le site Icos de Lonzée**

**Auteur :** Djamko Ndiessidie, Rose Audrey

**Promoteur(s) :** Heinesch, Bernard

**Faculté :** Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

**Diplôme :** Master en bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement, à finalité spécialisée

**Année académique :** 2021-2022

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/15424>

---

### *Avertissement à l'attention des usagers :*

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---



# **ESTIMATION DE L'EFFET BIOPHYSIQUE ALBÉDO SUR L'IMPACT CLIMATIQUE DE L'UTILISATION DES CULTURES INTERMEDIAIRES : EXEMPLE DE CAS SUR LE SITE ICOS DE LONZÉE**

**AUDREY DJAMKO**

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME  
DE MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE  
L'ENVIRONNEMENT**

**ANNÉE ACADEMIQUE 2021 - 2022**

**PROMOTEUR : BERNARD HEINESCH**





© Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique<sup>1</sup> de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

© Any reproduction of this document, by any means whatsoever, may only be made with the authorization of the author and the academic authority of<sup>2</sup> Gembloux Agro-Bio Tech.

This document is the sole responsibility of its author

---

1. L'autorité académique est représentée par le promoteur, membre du personnel enseignant de GxABT (Bernard Heinesch)

2. The academic authority is represented by the thesis supervisor, a member of the GxABT teaching staff (Bernard Heinesch)



# **ESTIMATION DE L'EFFET BIOPHYSIQUE ALBÉDO SUR L'IMPACT CLIMATIQUE DE L'UTILISATION DES CULTURES INTERMEDIAIRES : EXEMPLE DE CAS SUR LE SITE ICOS DE LONZÉE**

**AUDREY DJAMKO**

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME  
DE MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE  
L'ENVIRONNEMENT**

**ANNÉE ACADEMIQUE 2021 - 2022**

**PROMOTEURS : BERNARD HEINESCH**



# Remerciements

Ce travail de fin d'études a été rendu possible grâce au soutien immuable de différentes personnes. À l'image de l'albédo, j'espère qu'il sera la réflexion de toutes les énergies positives que j'ai reçues tout au long de sa réalisation. Je profite des quelques lignes qui vont suivre pour transmettre mon immense gratitude en cinq «MERCI».

MERCI, suivie de beaucoup de reconnaissance, à mon promoteur **Bernard Heinesch**. Votre encadrement, vos relectures, vos conseils ont en continu orienté et nourri mes réflexions. Votre présence active a été un véritable jalon pour moi tout au long de ce travail.

MERCI, accompagné d'une profonde gratitude, à **Jean-François Bastin**. Votre perspicacité, votre aide et vos pistes de réflexion ont énormément contribué à la rédaction de ce travail. Je vous remercie de m'avoir initié à Google Earth Engine (GEE) et pour le soutien technique apporté chaque fois que le besoin se faisait ressentir.

MERCI, profond aux assistants et membres de l'axe Biodyne pour les moments passés ensemble, nos conversations ont toujours servi à éveiller mon intelligence. Plus particulièrement, **Laura Delhez**, j'ai toujours été fascinée par ta manière d'aborder les problèmes que je te posais à toi seule tu es un « Mood », merci pour la relecture de mon travail. **Jonathan Bitton**, nos nombreux échanges ont été un véritable moteur pour moi lors de ce travail, merci pour ta disponibilité. **François Boland**, comment te dire, sur la fin de ce travail tu as été comme une batterie en période d'intermittence, merci pour ta présence.

MERCI, amical et sincère à ma « DREAM TEAM » : **Matthieu Delespesse, Victor Herman, Yannis Govaerts, Nicolas Cavaillé et Lena Royen**. Vous avez contribué chacun à votre manière à rendre mes années à Gembloux Agro Bio Tech plus agréables. Merci pour votre sollicitude, votre soutien moral et intellectuel durant ce TFE. À ma chère partenaire des heures de dur labeur à l'axe Biodyne, **Kim Hoang**, je tenais à te remercier de m'avoir écouté et aidé chaque fois que tu en avais l'occasion.

MERCI, à mes sœurs Belges **Zoé Mahaut** et **Helene Moulin**, vous m'avez adopté depuis mon arrivée en Belgique et toujours encouragé dans mes études. Merci beaucoup à toi **Florence Moulin** pour ta gentillesse et le temps accordé à la relecture de mon travail.

Si pour sortir de l'ordinaire je décidais de ne pas remercier mes parents, sans qui je ne serai rien en faisant allusion à l'expression consacrée. Un "MERCI" ne saurait représenter leurs efforts et contributions à mon égard tout au long de ces années. En revanche à mes parents **Pierre et Marie Henji**, je dédicacerai la détermination dont je fais preuve dans mes études en particulier celle qui m'anime depuis mon arrivée en Belgique. À mes frères, **Ghislain, Guy et Wilfried**, je dédicacerai les cernes sur mon visage lors de la rédaction de ce travail. À ma famille, je suis ce que je suis grâce à vous.

À travers cette citation de fin, j'espère n'oublier personne et aimerais remercier ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

*« Soyons reconnaissants aux personnes qui nous donnent du bonheur; elles sont les charmants jardiniers par qui nos âmes sont fleuries ». Marcel Proust*



## Résumé

L'introduction de cultures intermédiaires (CI) permettant de couvrir les sols en période automnale/hivernale est une pratique qui présente de nombreux intérêts agronomiques et environnementaux, dont l'amélioration potentielle du bilan carbone de l'activité culturale. Au-delà de cet effet dit biogéochimique, la modification de l'état de la surface induit un effet dit biophysique, par la modification de sa réflectivité (albédo), ce qui peut provoquer un forçage radiatif et donc affecter le climat.

Ce travail a pour but d'évaluer le forçage radiatif induit par l'introduction de CI (moutarde en 2017 et avoine/féverole en 2019) dans la rotation culturelle sur le site de la tour à flux ICOS de Lonzée et de le comparer au bilan carbone du site.

En l'absence de dispositif expérimental pairé (sol nu/CI), une méthodologie a été développée pour déterminer l'albédo de référence (sol nu) nécessaire au calcul du forçage radiatif. Une approche de modélisation de l'albédo sol nu sur base des mesures *in situ* et une approche de mesure de l'albédo par outil satellitaire ont été testées. Pour la première approche (*in situ*), la teneur en eau du sol en surface et l'indice de clarté ont été identifiés comme les variables directrices principales de l'albédo sur sol nu. Une régression multilinéaire a été construite sur base de ces deux variables. La deuxième approche (satellite) a permis, sur base des données Sentinel-2 et d'une combinaison des indices NDVI et BSI, d'identifier des parcelles adjacentes avec sol nu et d'estimer leur albédo au moment où la parcelle ICOS avait une CI. L'approche est prometteuse mais souffre d'un manque de représentativité temporelle, la présence de nuages rendant beaucoup d'images inutilisables en période de CI (automne/hiver).

Pour l'obtention d'un forçage radiatif, la première approche (*in situ*) a été privilégiée. Ainsi, pour une variation moyenne d'albédo de 5%, un forçage radiatif de  $-5,4 \text{ W.m}^{-2}$  a été observée. De plus, pour une rotation de culture dans laquelle la CI serait introduite une année sur deux dans les mêmes conditions qu'en 2019 à Lonzée, le forçage radiatif, par unité de surface, sur une période de 100 ans pourrait entraîner une diminution des émissions de  $\text{CO}_2$  atmosphérique de  $2,8 \text{ kgCO}_2\text{-eq. m}^{-2}$  ( $7,6 \text{ tC.ha}^{-1}$ ). Cette information vient apporter plus d'intérêt à la CI qui était déjà valorisée pour ses nombreux services écosystémiques.

**Mots-clés :** Albédo – Forçage radiatif – Culture intermédiaire – Equivalent  $\text{CO}_2$  - Satellite Télédétection- Sentinel-2 - ICOS - Sol nu.

## Abstract

The introduction of intermediate crops (IC) to cover the soil in autumn/winter is a practice that has many agronomic and environmental benefits, including the potential improvement of the carbon balance of the crop. Beyond this so-called biogeochemical effect, the modification of the surface condition induces a so-called biophysical effect, through the modification of its reflectivity (albedo), which can cause a radiative forcing and thus affect the climate.

The purpose of this work is to assess the radiative forcing induced by the introduction of ICs (mustard in 2017 and oats/beans in 2019) into the crop rotation at the Lonzée ICOS flux tower site and to compare it to the carbon balance of the site.

In the absence of a paired experimental setup (bare soil/IC), a methodology was developed to determine the reference albedo (bare soil) necessary to calculate the radiative forcing. A modeling approach of the bare soil albedo based on (*in situ*) measurements and an approach of albedo measurement by satellite tool have been tested. For the first approach (*(in situ)*), the surface soil water content and the lightness index were identified as the main guiding variables of the albedo on bare soil. A multilinear regression was constructed based on these two variables. The second approach (satellite) allowed, based on Sentinel-2 data and a combination of NDVI and BSI indices, to identify adjacent plots with bare soil and to estimate their albedo at the time the ICOS plot had an IC. The approach is promising but suffers from a lack of temporal representativeness, as the presence of clouds makes many images unusable during the IC period (fall/winter).

To obtain a radiative forcing, the first approach (*in situ*) was preferred. Thus, for a mean albedo variation of 5%, a radiative forcing of  $-5.4 \text{ W.m}^{-2}$  was observed. Furthermore, for a crop rotation in which IC is introduced every other year under the same conditions as in 2019 at Lonzée, the radiative forcing, per unit area, over a period of 100 years could lead to a decrease in atmospheric  $\text{CO}_2$  emissions of  $2.8 \text{ kgCO}_2\text{-eq. m}^{-2}$  ( $7.6 \text{ tC.ha}^{-1}$ ). This information brings more interest to the IC that was already valued for its many ecosystem services.

**Keywords :** Albedo - Radiative forcing - Intermediate crops -  $\text{CO}_2$  equivalent - Satellite remote sensing - Sentinel-2 - ICOS - Bare soil.

# Table des matières

	Page
<b>Remerciements</b>	<b>i</b>
<b>Résumé</b>	<b>iv</b>
<b>Abstract</b>	<b>v</b>
<b>Table des matières</b>	<b>vi</b>
<b>Table des figures</b>	<b>ix</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>xi</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2 Objectifs et questions de recherche</b>	<b>3</b>
<b>3 État de l'art</b>	<b>5</b>
3.1 L'albédo . . . . .	5
3.1.1 Propriétés, définition et mesure . . . . .	5
3.1.2 Facteurs d'influence de l'albédo . . . . .	5
3.2 L'outil satellitaire . . . . .	8
3.2.1 La mission Sentinel-2 . . . . .	8
3.2.2 Albédo satellitaire . . . . .	9
3.3 La culture intermédiaire . . . . .	10
3.3.1 État de la situation en Wallonie . . . . .	11
3.3.2 Impacts climatiques de l'utilisation des Cultures Intermédiaires . . . . .	12
3.4 Les effets biophysiques . . . . .	13
3.4.1 L'effet albédo . . . . .	13
3.4.2 Conversion du forçage radiatif en équivalent CO <sub>2</sub> . . . . .	14
<b>4 Matériel et méthodes</b>	<b>19</b>

## TABLE DES MATIÈRES

4.1	Site expérimental . . . . .	19
4.1.1	Détermination des variables . . . . .	21
4.1.2	Calcul du forçage radiatif . . . . .	22
4.2	Méthodes de détermination de l'albédo de référence . . . . .	22
4.2.1	Approche 1 : Modélisation de l'albédo de référence . . . . .	24
4.2.2	Approche 2 : Calcul de l'albédo de référence par l'outil satellitaire . . . . .	28
4.3	Analyse statistique . . . . .	32
<b>5</b>	<b>Résultats</b>	<b>33</b>
5.1	Évolution temporelle des facteurs pédoclimatiques . . . . .	33
5.2	Évolution temporelle de l'albédo <i>In Situ</i> . . . . .	33
5.2.1	Données récentes . . . . .	33
5.2.2	Données historiques . . . . .	35
5.3	Modélisation de l'albédo de référence . . . . .	35
5.3.1	Relation entre l'albédo et ses variables explicatives . . . . .	35
5.3.2	Application du modèle aux scénarios . . . . .	38
5.4	Albédo satellitaire de référence . . . . .	39
5.4.1	Evolution temporelle des albédos satellitaires . . . . .	39
5.4.2	Indices de sols nus . . . . .	40
5.4.3	Albédo satellitaire des sols nus . . . . .	41
5.5	L'effet biophysique albédo . . . . .	42
5.5.1	Moutarde (scénario de 2017) . . . . .	42
5.5.2	Avoine/féverole (scénario de 2019) . . . . .	44
5.5.3	Approche satellitaire . . . . .	46
5.6	Conversion en équivalent $CO_2$ . . . . .	47
<b>6</b>	<b>Discussion</b>	<b>51</b>
6.1	Intégration de l'effet biophysique albédo au bilan carbone de Lonzée . . . . .	51
6.2	Forçage radiatif . . . . .	52
6.3	Détermination de $\alpha_{Ref}$ du modèle . . . . .	53
6.4	Validation de l'albédo satellitaire . . . . .	54
6.5	Détection des sols nus satellitaires . . . . .	55
6.6	Perspectives . . . . .	56
<b>7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>59</b>
<b>Bibliographie</b>		<b>61</b>
<b>Annexes</b>		<b>71</b>

.1	Relation entre l'albédo de la surface et le forçage radiatif au sommet de l'atmosphère . . . . .	72
.2	Corrections requises sur Sentinel-2 . . . . .	74
.3	Particularités des cultures intermédiaires . . . . .	77
.4	Incertitudes liées au forçage radiatif en équivalent $CO_2$ . . . . .	79
.5	Étude de l'hétérogénéité de la parcelle d'étude . . . . .	80
.6	Résultats des régressions entre l'albédo et ses variables explicatives . . . . .	82
.7	Cahier de terrain . . . . .	86
.8	Albédo îlot <i>vs.</i> albédo parcelle . . . . .	87
.9	Albédo Landsat <i>vs.</i> Sentinel-2 . . . . .	89
.10	Jours de neige . . . . .	90

# Table des figures

3.1	Représentation conceptuelle de la contribution des composantes biogéochimiques et biogéophysiques au forçage radiatif net appliqué à une culture d'hiver suivie d'un couvert intermédiaire . . . . .	12
3.2	Arbre de décision pour les métriques de conversions du $RF_{\Delta\alpha}$ en équivalent $CO_2$	15
4.1	Site expérimental ICOS, Observatoire terrestre de Lonzée (OTL). . . . .	20
4.2	Station ICOS de Lonzée avec au centre le dispositif pour les mesures. . . . .	21
4.3	Organigramme de la méthodologie d'étude. . . . .	24
4.4	Ligne du temps avec itinéraires des cultures pour les périodes d'intérêts sur la parcelle d'étude. . . . .	25
4.5	Sol nu sur la parcelle de Lonzée. (a) État du sol après déchaumage. (b) État du sol après labour . . . . .	26
4.6	Organigramme de la méthodologie suivie sur <i>Google Earth Engine</i> . . . . .	29
5.1	Évolution temporelle de (a) la teneur en eau du sol (SWC), (b) l'indice de clarté, (c) le rayonnement solaire incident (SWin) à Lonzée. . . . .	34
5.2	Évolution temporelle des valeurs moyennes journalières (entre 10h et 14h) de l'albédo <i>in situ</i> . . . . .	34
5.3	Évolution temporelle de l'albédo pour des années sans CI à Lonzée. . . . .	35
5.4	Relation après déchaumage entre l'albédo et la teneur en eau à 5 cm pour les données récentes (a) et historiques (c) et entre les résidus de la relation et l'indice de clarté pour les données récentes (b) et historiques (d). . . . .	36
5.5	Idem que la Figure 5.4, pour les périodes après labour. . . . .	37
5.6	Relation entre l'albédo <i>in situ</i> et les albédos satellitaires (GEE et Sols nus GEE) dans le temps. . . . .	39
5.7	Relation entre l'albédo <i>in situ</i> et albédo GEE. . . . .	40
5.8	Evolution temporelle des pixels de BSI (rouge) et NDVI (bleu) correspondant à la parcelle d'étude. . . . .	40
5.9	Carte des sols nus. . . . .	41

## TABLE DES FIGURES

5.10 Évolution de la variation d'albédo des données récentes (a) et des données historiques (c). Évolution du forçage radiatif obtenu avec des données récentes (b) et des données historiques (d). . . . .	<b>43</b>
5.11 Idem que la Figure 5.10, à la seule différence que la CI est de l'avoine/féverole. . . . .	<b>45</b>
5.12 Variation d'albédo satellitaire sur la zone d'étude. . . . .	<b>46</b>
5.13 Forçage radiatif satellitaire pendant les scénarios de 2017 et 2019. . . . .	<b>47</b>
5.14 Relation entre le forçage radiatif et la variation d'albédo. . . . .	<b>47</b>
5.15 Le changement interannuel de l'albédo moyen (a) et le forçage radiatif global instantané moyen annuel (b). . . . .	<b>48</b>
5.16 Variations annuelles des émissions équivalentes de $CO_2$ pour un horizon 100 ans.	<b>49</b>
 .1 Flux moyen global d'énergie d'ondes courtes en watts par mètre carré. . . . .	<b>72</b>
.2 Diagramme en "boîtes à moustaches" de l'albédo en fonction de la zone d'étude. . . . .	<b>80</b>
.3 Valeurs d'albédos de la parcelle d'études pendant deux situations d'albédos opposées. . . . .	<b>81</b>
.4 Dynamique de l'albédo moyen et médian obtenue avec Sentinel-2 à Lonzée. . . . .	<b>81</b>
.5 Relation albédo et teneur en eau, résidus de régression et Kt pour le sol après déchaumage des années récentes. . . . .	<b>82</b>
.6 Relation albédo et teneur en eau, résidus de régression et Kt pour le sol après labour des années récentes. . . . .	<b>83</b>
.7 Idem que la figure .5, pour les années historiques. . . . .	<b>84</b>
.8 Idem que la Figure .6, pour les années historiques. . . . .	<b>85</b>
.9 Évolution temporelle de l'albédo de l'îlot central et celui de la parcelle entre 2017 et 2020. . . . .	<b>87</b>
.10 Relation albédo parcelle Vs îlot pour (a) période de sol labouré; (b) période de culture de froment . . . . .	<b>88</b>
.11 Évolution temporelle de l'albédo Landsat et Sentinel-2. . . . .	<b>89</b>

# Liste des tableaux

3.1	Valeurs d'albédos approximatives de surfaces naturelles. . . . .	6
4.1	Scénarios de modélisation de l'albédo de référence. . . . .	27
4.2	Correspondance entre les bandes de Landsat 8 et Sentinel-2. . . . .	28
4.3	Bandes Sentinel-2 utilisées dans ce travail. . . . .	30
5.1	Modèle de régression linéaire multiple pour obtention de l'albedo sur sol nu, avec coefficients obtenus pour les stratégies 1 et 2. . . . .	38
5.2	Variations , écart maximal d'albédo et forçage radiatif des scénarios de 2017 et 2019. . . . .	44
.1	Résolution des bandes spectrales de l'instrument multi-spectral Sentinel-2. . .	74
.2	État de la parcelle de Lonzée entre 2017 et 2020. . . . .	86
.3	Jours de neige observés pour les stratégies 1 et 2. . . . .	90



# 1 | Introduction

Les activités agricoles modifient les stocks de carbone dans le sol et contribuent à l'émission de  $CO_2$ ,  $CH_4$  et  $N_2O$  qui sont les principaux gaz à effet de serre (GES) anthropiques ([Desjardins et al., 2020](#)). Le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) publié le 04 avril 2022, renseigne que l'agriculture est responsable de 22 % des émissions mondiales de GES ([IPCC, 2022](#)). De ce fait, il est important de mettre en place des solutions agricoles pour réduire les changements climatiques [Malhi et al. \(2021\)](#) et répondre aux accords de Paris sur le climat ([Lugato et al., 2020](#)).

Au cours d'une rotation de culture, les agriculteurs font face à de nombreux choix, tels que l'espèce de culture, l'utilisation ou non de culture de couverture en hiver, le type de travail de sol, qui peuvent améliorer le bilan GES de l'activité agricole. Mais au-delà de cet effet sur le bilan carbone, qualifié de biogéochimique, ces choix ont également des effets, qualifiés de biophysiques ([Ceschia et al., 2017](#)). Ces derniers regroupent le changement d'albédo ainsi que les modifications liées à la rugosité (du sol) et à l'évapotranspiration ([Liu et al., 2022](#)). L'albédo est la proportion de rayonnement solaire incident qui est réfléchie par une surface ([Yang et al., 2020](#)). Ces dernières années, l'effet biophysique de l'albédo sur l'impact climatique a été au cœur de nombreuses recherches [Davin et al. \(2014\)](#), [Zhao et Jackson \(2014\)](#), [Carrer et al. \(2018\)](#), [Roujean et al. \(2018\)](#), [Liu et al. \(2022\)](#) et sont de plus en plus combinés aux effets biogéochimiques pour comprendre le réel impact climatique d'un changement de pratique agricole ([Ceschia et al., 2017](#), [Kaye et Quemada, 2017](#), [Sieber et al., 2019](#)).

Un exemple connu peut être tiré de [Betts \(2000\)](#), qui a montré que, dans les hautes latitudes, la déforestation au profit de l'agriculture pouvait favoriser l'augmentation de l'albédo de surface car ces forêts ont des albédo inférieurs aux terres cultivées. Cette modification d'albédo concourt à un refroidissement du système terrestre et peut ainsi compenser partiellement un bilan GES défavorable pour la déforestation.

Plus spécifiquement, selon [Carrer et al. \(2018\)](#), la culture de couverture introduite dans la rotation réfléchit plus de rayonnement de courtes longueurs d'onde qu'un sol nu. Puisque le rayonnement de courte longueur d'onde a très peu d'interactions avec les molécules qui

## CHAPITRE 1. INTRODUCTION

composent les GES de l'atmosphère, il n'en résulte pas de réchauffement de l'atmosphère au cours de leur retour vers l'espace ([Ceschia et al., 2017](#)). Par conséquent, cela cause une diminution de la quantité d'énergie présente à la surface de la terre, un forçage radiatif négatif ([Kaye et Quemada, 2017](#)) et donc un effet de refroidissement sur le climat local. Cet effet positif de l'utilisation de cultures intermédiaires s'ajoute à ses nombreux bienfaits pour les sols agricoles et l'environnement. Notamment la protection contre l'érosion, la fixation d'azote, la réduction du lessivage et l'amélioration de la santé des sols ([Lugato et al., 2020](#)).

Étudier l'effet qu'ont les CI sur l'albédo nécessite d'abord l'estimation de la modification d'albédo induite par l'introduction de la culture de couverture, ce qui peut se faire par des mesures *in situ* mais aussi à l'aide de mesures satellitaires. Cette méthode est possible grâce aux récentes avancées et la grande résolution des capteurs satellitaires à l'exemple de Modis [Carrer et al. \(2018\)](#), Landsat [Roujean et al. \(2019\)](#), [Liu et al. \(2022\)](#) et Sentinel-2 ([Bonafoni et Sekertekin, 2020](#)).

En résumé, l'adoption des CI en agriculture se fait depuis longtemps, mais son lien avec les changements climatiques restait encore méconnu. L'intérêt de la communauté scientifique pour ce sujet de recherches est assez récent. La présence des cultures de couvertures modifie l'albédo et, par conséquent, perturbe le bilan énergétique régional ou global ([Kaye et Quemada, 2017](#), [Pellerin et al., 2021](#)).

## 2 | Objectifs et questions de recherche

Partant de ces constats, ce travail vise à évaluer le forçage radiatif induit par l'utilisation d'une culture intermédiaire. Pour parvenir à ce but, quatre objectifs partiels sont fixés :

- 1. Analyser la dynamique temporelle de l'albédo en fonction de l'état de la surface.** *Quels sont les facteurs pédoclimatiques et atmosphériques qui influencent l'albédo sur notre zone d'étude ?*
- 2. Estimer l'évolution temporelle des modifications d'albédo induites par l'utilisation d'une culture intermédiaire.** *En l'absence de mesure d'albédo témoin *in situ*, l'outil satellitaire peut-il nous aider à approximer l'albédo témoin de parcelles avoisinantes en sols nus ?*
- 3. Étudier les métriques qui permettent de passer d'une variation d'amplitude de l'albédo au forçage radiatif et à l'équivalent CO<sub>2</sub>.** *Quelle est la métrique la plus adaptée à notre cas d'étude ?*
- 4. Apporter un regard complémentaire au bilan GES du site de Lonzée, en comparant les effets albédo au bilan CO<sub>2</sub>.** *Quel est la contribution des effets biophysiques au bilan carbone déjà établi à Lonzée ?*

Cette étude se déroule sur la parcelle agricole ICOS de Lonzée de 2017 à 2020. Les moyens utilisés pour obtenir l'albédo de référence nécessaire au calcul du forçage radiatif vont inclure non seulement la création d'un modèle au moyen de paramètres influençant l'albédo des sols nus présents dans la base de données mais aussi l'utilisation de l'outil satellitaire Sentinel-2.

La suite de ce travail se divisera en 4 grandes parties. Tout d'abord, un état de l'art sera dressé pour avoir une vision des avancées de la littérature sur la problématique étudiée (partie 1). Par la suite, les données utilisées ainsi que les méthodes employées pour obtenir le forçage radiatif seront décrites (partie 2). Par après, les résultats obtenus seront présentés et discutés (partie 3). Pour terminer, quelques perspectives d'utilisation de ce travail seront énoncées, les limites seront exposées et une conclusion proposée (partie 4).



## 3 | État de l'art

### 3.1 L'albédo

#### 3.1.1 Propriétés, définition et mesure

Le rayonnement réfléchi résulte d'un processus de réflectance au travers duquel l'énergie est réémise par les constituants chimiques de la couche de surface (Dobos, 2011). L'anisotropie est une propriété des surfaces naturelles qui les poussent à réagir différemment aux rayonnements provenant de diverses directions. Selon Dickinson (1983), la répartition angulaire du rayonnement qui arrive sur une surface impacte la quantité et la direction de la réflexion. Le spectre du rayonnement solaire s'étend entre (0.3 et 3  $\mu\text{m}$ ). L'albédo ( $\alpha$ ) détermine la portion d'énergie solaire de courte longueur d'onde comprise entre 400 et 2500 nm qui est réfléchie par la surface.

On appelle albédo à large bande, albédo à courte longueur d'onde ou encore albédo *in situ*, le rapport entre la densité de flux en ( $\text{W.m}^{-2}$ ) de rayonnement solaire réfléchi sur le rayonnement solaire incident. L'albédo est une valeur adimensionnelle comprise entre 0 et 1. Le 0 renvoie à un corps noir qui absorberait la totalité du rayonnement incident, contrairement à un corps blanc qui réfléchirait tout le rayonnement reçu ( $\alpha = 1$ ). L'albédo est susceptible d'influencer le forçage radiatif au sommet de l'atmosphère (cf. Annexe .1).

La mesure de l'albédo s'effectue au moyen d'un capteur de rayonnement appelé pyranomètre qui mesure le rayonnement courte longueur d'onde (300 -2800 nm) entrant et sortant (Dobos, 2011). L'installation des capteurs doit se faire au dessus de la culture à l'écart de surface réfléchissante pouvant perturber la mesure. La nuit, les densités de flux des rayonnements solaires incidents et réfléchis sont nulles.

#### 3.1.2 Facteurs d'influence de l'albédo

L'albédo est loin d'être une constante, de nombreux facteurs l'influencent. Selon Bright *et al.* (2015), l'albédo varie suivant des propriétés de surface induites par la physiologie de la végétation, les pratiques culturales, la géologie, l'humidité du sol, la neige et l'eau. De plus,

Dickinson (1983) parle de l'angle solaire qui impacte la dispersion spectrale et angulaire du rayonnement incident. La combinaison angle solaire, propriétés de surface et composition atmosphérique donne à l'albédo une variabilité spatio-temporelle (Sieber *et al.*, 2019). Des explications sur les facteurs d'influence de l'albédo autres que ceux qui sont repris ci-dessous, se trouvent dans l'Annexe .1.1).

### Facteurs pédoclimatiques

Suivant la zone d'étude, la dépendance de l'albédo à certains facteurs est susceptible de varier en absence de végétation et en milieu aride, l'albédo est très corrélé à la teneur en eau dans les premiers centimètres du sol (Guan *et al.*, 2009). En outre, pour des zones spatialement restreintes et à sol homogène, l'albédo sera moins impacté par la teneur en eau.

**Occupation du sol** L'occupation du sol est un paramètre important pour expliquer les variations d'albédo de surface (Dickinson, 1983, Dobos, 2011, Kaye et Quemada, 2017). Les différentes valeurs moyennes de l'albédo selon la couverture terrestre sont reprises dans la Table 3.1. Un sol cultivé présente une moyenne d'albédo de 0,25, contrairement à une forêt qui a un albédo plus bas. En effet, dans une forêt à plusieurs étages, le rayonnement incident qui pénètre dans les profondeurs de la canopée est plusieurs fois absorbé et réfléchi entre les branches et feuilles du peuplement avant de retourner vers l'atmosphère (Dobos, 2011). En outre les opérations culturales telles que le chaulage et le non labour augmentent l'albédo, tandis que le biochar et l'irrigation le diminuent (Meyer *et al.*, 2012, Ceschia *et al.*, 2017).

TABLE 3.1 – Valeurs approximatives d'albédos de surfaces naturelles (Dobos, 2011).

<i>Types de surfaces</i>	<i>Valeurs d'albédo</i>
<i>Corps noir</i>	0
<i>Forêt</i>	0.05-0.2
<i>Pâturages et cultures</i>	0.1-0.25
<i>Surfaces sombres</i>	0.1-0.2
<i>Sol sableux secs</i>	0.25-0.45
<i>Sol argileux secs</i>	0.15-0.35
<i>Sable</i>	0.2-0.4
<i>Granite</i>	0.3-0.35
<i>Glacier</i>	0.3-0.4
<i>Surface couleur claire</i>	0.4-0.5
<i>Couverture saline sèche</i>	0.5
<i>Neige fraîche</i>	0.9
<i>Eau</i>	0.1-1
<i>Surface complètement blanche</i>	1

## CHAPITRE 3. ÉTAT DE L'ART

**Humidité du sol** Le contenu en eau du sol influence ses propriétés optiques (Roxy et al., 2010). La quantité de rayonnement solaire incident absorbé par le sol augmente avec sa teneur en eau (Dobos, 2011). Cette relation est bien connue et renseignée dans de nombreux articles scientifiques (Gascoin et al., 2009, Roxy et al., 2010). Plus la teneur en eau d'un sol est élevée, plus il est sombre et par conséquent son albédo faible (Dobos, 2011). L'assombrissement du sol est dû au fait que l'eau remplaçant l'air dans le sol tend à augmenter la probabilité d'absorption de la lumière par la surface (Gascoin et al., 2009). Dobos (2011) précise que cette relation ne reste applicable que jusqu'à la capacité au champ. En effet, une fois la capacité au champ dépassée, le sol, au lieu de s'assombrir, commence à former une nappe d'eau en surface créant ainsi une surface brillante qui augmente la réflectance. Le statut hydrique d'un sol dépend également de sa structure et de sa texture (Yang et al., 2020).

### Facteurs atmosphériques

L'atténuation du rayonnement lors de sa traversée dans l'atmosphère cause la modification de la répartition spectrale de l'onde incidente qui arrive à la surface. Vu que la réflectivité de la surface dépend de la longueur d'onde, la valeur d'albédo se trouve impactée (Van Durme et Erpicum, 2005). De plus, l'énergie réfléchie par la surface terrestre est aussi fonction de la direction de l'énergie incidente et réfléchie (Pinty et al., 2005).

**Angle zénithal** L'angle zénithal (AZ) est l'angle que forment les rayons du soleil avec la verticale d'un lieu. La variation diurne de l'albédo est étroitement liée à la valeur de l'angle zénithal, la répartition spectrale changeant en fonction de l'angle solaire (Zheng et al., 2017). En présence de nuages, l'albédo augmente aux angles zénithaux faibles et diminue aux angles élevés (Nunez et al., 1972).

**Fraction diffuse** Sous certaines conditions, le type de rayonnement incident (direct ou diffus) est le facteur le plus significatif qui détermine l'albédo de la surface (Nunez et al., 1972). L'indice de clarté ( $K_t$ ), est le rapport entre le rayonnement direct et le rayonnement diffus. Il donne une estimation de la nébulosité de l'atmosphère à un moment donné. On parle de ciel clair lorsque la proportion de rayonnement direct est dominante. À ce moment le  $K_t$  à une valeur voisine de 0,7, contrairement à une valeur de 0,3 qui renvoie à un ciel couvert. Le temps de trajet dans l'atmosphère, l'angle solaire et la présence de nuages conditionnent la quantité de rayonnement diffus. Par temps couvert, l'albédo n'a pas de cycle diurne (Yang et al., 2008).

## 3.2 L'outil satellitaire

### 3.2.1 La mission Sentinel-2

L'Agence Spatiale Européenne, dans le cadre de son programme Copernicus, a mis sur pieds des produits multispectraux Sentinel-2 qui fournissent des données à haute résolution pour la surveillance de la surface de la Terre ([Phiri et al., 2020](#)). Sentinel-2 est une constellation de deux satellites identiques Sentinel-2A lancé le 23 juin 2015 et Sentinel-2B lancé le 7 mars 2017 ([Close et al., 2018](#)). Ils ont un champ de vision de 290 km, supérieur à celui de Landsat qui est de 185 km ([Rouquié et al., 2017](#)). L'heure locale de contournement de son orbite autour de l'équateur est de 10h30, le choix de cette heure a été fait pour non seulement minimiser la couverture nuageuse, mais aussi assurer une illumination solaire adéquate ([Phiri et al., 2020](#)).

Les principaux objectifs de cette mission sont, d'une part, de garantir des données à haute résolution pour la surveillance de l'occupation et l'utilisation des sols, du changement climatique et des catastrophes ([Malenovský et al., 2012](#)). Et, d'autre part, de compléter les informations sur le suivi de la dynamique de la surface de la Terre déjà apportées par d'autres satellites mondiaux tels que Landsat et le Satellite Pour l'Observation de la Terre (SPOT) ([Drusch et al., 2012](#), [Immitzer et al., 2016](#)). La politique de libre accès de cette constellation a favorisé l'utilisation croissante de ces données dans de nombreux articles au cours des récentes années ([Phiri et al., 2020](#)). Les deux satellites de Sentinel-2 mesurent avec une résolution temporelle de 5 jours les radiances spectrales solaires réfléchies dans 13 bandes avec des résolutions spatiales entre 10 et 60 m allant du visible à l'infrarouge à courtes ondes ([Segarra et al., 2020](#)). Les produits Sentinel-2 sont disponibles sous plusieurs niveaux (0,-1A,-1B,-1C et -2A). Le niveau -2A est le plus utilisé dans les études qui s'intéressent à la réflectance au bas de l'atmosphère comme le calcul d'albédo ([Li et al., 2018](#), [Bonafoni et Sekertekin, 2020](#), [Hofierka et Onačillová, 2021](#)).

Les principales étapes à prendre en compte pour une meilleure précision des données obtenues avec Sentinel-2 sont la phase de pré-traitement et la sélection des méthodes de classification appropriées. En outre, la correction atmosphérique est très importante dans l'analyse de séries temporelles obtenues avec Sentinel-2 ([Phiri et al., 2020](#)). Les nuages et ombres conduisent à des lacunes dans l'imagerie optique et une absence de données dans les séries temporelles ([Whitcraft et al., 2015](#)). Les différentes corrections pouvant être appliquées aux images Sentinel-2 sont détaillées dans l'Annexe [2](#).

**Plateforme de traitement des données** L'accessibilité aux données Sentinel-2 est centrale au vu de la forte demande. De nombreuses plateformes permettent de télécharger gratuitement et en libre accès les données, à l'instar du site web de l'Agence Spatiale Euro-

## CHAPITRE 3. ÉTAT DE L'ART

péenne, du « United States Geological Survey » (USGS) et également des plug-in sur Qgis ([Segarra et al., 2020](#)).

Google Earth Engine (GEE) est une plateforme très populaire actuellement, elle contient des données de nombreux satellites notamment Sentinel-2 ([Gorelick et al., 2017](#)). Python, Javascript et R sont des interfaces de programmations auxquelles il est possible d'accéder au moyen de GEE. De plus, cet outil possède des interfaces de scripts au travers desquelles les utilisateurs peuvent accéder pour le traitement en ligne de leurs données. Ainsi, GEE permet la manipulation, l'analyse et la visualisation de données géo-spatiales sans avoir besoin d'accéder à des superordinateurs ([Barboza Castillo et al., 2020](#)).

### 3.2.2 Albédo satellitaire

L'albédo est un paramètre important dans les modèles environnementaux, on appelle albédo à bande étroite celui obtenu sur une plage étroite de longueurs d'onde via les outils de télédétection ([Bonafoni et Sekertekin, 2020](#)). Grâce aux produits satellitaires compilés aux moyens de systèmes d'informations géographiques, il est possible d'obtenir une valeur d'albédo pour chaque pixel d'une image. La télédétection offre de nombreuses techniques permettant d'obtenir les valeurs d'albédo à l'échelle mondiale ([Liang, 2001](#)), avec diverses résolutions spatiales et temporelles ([Bonafoni et al., 2017](#)). La détermination de l'albédo pour différentes classes de couverture terrestre n'est cependant pas une tâche facile ([Hofierka et Onačillová, 2021](#)). Dans leur review, [Qu et al. \(2015\)](#) présentent les quatre principaux algorithmes utilisés pour passer de l'albédo bande étroite (pour rappel mesuré par télédétection) à l'albédo large bande. Il s'agit de : **(a)** la conversion bande étroite-bande large; **(b)** la modélisation angulaire de la fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle (BRDF); **(c)** l'algorithme d'estimation directe; et **(d)** l'algorithme pour les données satellitaires géostationnaires, qui par défaut n'est pas applicable pour Sentinel-2. Selon [Schaaf et al. \(2002\)](#), les catégories les plus utilisées dans la littérature sont :

**1. Les conversions bande étroite-bande large (a)** : elle est plus adaptée à des surfaces pour lesquelles la réflectance est considérée comme isotrope sous différents angles solaires à l'exemple des surfaces lambertiennes. L'avantage de cette méthode est son aisance d'utilisation pour estimer l'albédo à large bande au moyen de satellites n'ayant qu'une option de vue au nadir, qui peuvent estimer l'albédo à large bande de surface avec des fonctions linéaires simples. Cependant, sa limite vient du fait que les surfaces terrestres/océaniques ne sont pas lambertiennes dans la plupart des cas, ce qui occasionne des erreurs d'estimations non négligeables lorsque l'angle zénithal solaire est important ([Qu et al., 2015](#)).

**2. La modélisation angulaire de la fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle (BRDF) (b)** : c'est une correction qui est appliquée aux images quand il faut prendre

en compte la position du soleil par rapport aux satellites. Ce facteur harmonise les angles d'acquisition du satellite entre chaque date à travers toute la planète. Elle est adaptée pour décrire la réflectance sur des surfaces anisotropes. Son principal avantage est sa robustesse. Par contre [Qu et al. \(2015\)](#) rappellent qu'elle est sujette à de nombreux compromis sur le changement temporel de l'état de la surface.

À la suite des quatre méthodes de conversion présentées ci-dessus, c'est la conversion bande étroite vers bande large qui sera utilisée dans ce travail. Au regard d'études précédemment réalisées, cette formule a été développée à l'origine pour les données Landsat ([Brest et Goward, 1987](#)). Cependant, cette méthode a été appliquée à d'autres satellites, on peut citer comme exemples AVHRR et Météosat ([Valiente et al., 1995](#)). [Liang \(2001\)](#) a approfondi ces études en établissant des coefficients simples d'utilisations et adaptés à différents capteurs pour l'estimation de l'albédo. Il est aujourd'hui considéré comme l'un des pionniers dans ce domaine. Les coefficients de conversions bandes étroite à bande large proposé par [Liang \(2001\)](#) sont dérivés d'une régression à l'aide de simulations de transfert radiatif approfondies et de bibliothèques de réflectance spectrale. De nombreuses études dans la littérature utilisent ces coefficients ([Bonafoni et Sekertekin, 2020](#)). D'autres auteurs ont également proposé des moyens de conversion bande étroite à large bande pour les capteurs Landsat et MODIS ([Tasumi et al., 2008](#)). Par contre qu'il s'agisse de [Liang \(2001\)](#) ou [Tasumi et al. \(2008\)](#), aucune des deux méthodes proposées ne prend en compte la mission Sentinel-2 parce qu' elles ont été proposées bien avant le lancement de la constellation ([Bonafoni et Sekertekin, 2020](#)).

### 3.3 La culture intermédiaire

En Europe, entre la récolte de la culture d'hiver et le semis des cultures de printemps, les CI peuvent être semés pour éviter de laisser le sol nu ([Carrer et al., 2018, Kaye et Quemada, 2017](#)). Cette pratique culturale est à l'origine d'un forçage radiatif causé par une augmentation d'albédo de surface des terres cultivées. Les cultures intermédiaires (CI) ou cultures de couvertures sont des cultures introduites dans la rotation entre deux grandes cultures. Elles sont pour la plupart semées en automne et récoltées en hiver. De nombreux types de plantes peuvent être utilisés comme CI. Les plus utilisées sont les légumineuses (fève, trèfle) et les graminées, mais l'intérêt est de plus en plus porté aux brassicacées (comme le colza, la moutarde et le radis fourrager) ([Carrer et al., 2018](#)).

Cette pratique présente plusieurs bienfaits, à savoir : permettre un stockage important de carbone sous forme de matière organique dans le sol ([Buyssse et al., 2017](#)), réduire l'érosion des sols et le lessivage des nitrates et améliorer des propriétés des sols ([Austin et al., 2017, Kaye et Quemada, 2017](#)). Lorsque les cultures de couverture hivernale sont utilisées comme

## CHAPITRE 3. ÉTAT DE L'ART

engrais verts, elles sont susceptibles d'apporter jusqu'à 45 unités d'azote par hectare aux cultures qui vont suivre (Goffart *et al.*, 2021).

L'attention est portée sur les CI car elles offrent une diversité de services écosystémiques. Suivant leur nature et leur durée de présence sur la parcelle, elles sont considérées comme Cultures Intermédiaires Pièges A Nitrate (CIPAN) ou Couverts Intermédiaires à Valorisation Énergétique (CIVE). À une plus grande échelle, l'utilisation des CI est recommandée dans le cadre de l'initiative 4 pour 1000 qui a débuté après la COP21 et qui a pour objectif d'augmenter le stockage en carbone dans le sol (Ceschia *et al.*, 2017).

### 3.3.1 État de la situation en Wallonie

La moutarde (moins chère, facile à faire lever et à croissance rapide) est la CI la plus implantée par les agriculteurs de la région limoneuse où Gembloux se situe. Deux fois sur trois, c'est elle qui précède la culture de betterave dans les rotations (Destain *et al.*, 2010).

En Belgique, 8,9 % de la superficie du territoire était dédié aux cultures de couverture hivernales en 2008 (Carrer *et al.*, 2018). Nous n'avons pas trouvé de chiffres pour des années plus récentes. De manière générale, la CI est semée dans une rotation entre la céréale à paille et la culture de printemps, donc pour une rotation de type Betteraves – Blé – Pomme de terre – Blé – Orge, deux périodes de CI seront présentes sur les 5 années.

Dans un contexte réglementaire, *La Directive Nitrate* est appliquée en Wallonie au travers du Programme de Gestion Durable de l'Azote en agriculture (PGDA). À savoir : limiter la lixiviation en période d'inter-culture afin de réduire la pollution aux nitrates des eaux souterraines et de surface.

La réglementation impose notamment l'implantation de couverts végétaux d'inter-culture dans certaines situations. Par exemple, après tout apport d'azote organique entre le 1er juillet et le 15 septembre, une Culture Intermédiaire Piège à Nitrate (CIPAN) doit obligatoirement être semée. Les CIPAN doivent être implantées avant le 15/09 et maintenue jusqu'au 15/11. En zone vulnérable, 90 % des surfaces récoltées avant le 1er septembre et qui seront suivies l'année d'après d'une culture de printemps doivent être emblavées par un couvert pour le 15 septembre, ce dernier doit être maintenu jusqu'au 15 novembre.<sup>1</sup> C'est notamment le cas pour le site de Lonzée classé en zone vulnérable. Si plusieurs législations s'appliquent à la parcelle, il faut respecter les obligations les plus strictes. Les CI possèdent de nombreuses caractéristiques qui conditionnent le calendrier agronomique et ainsi que leur devenir (*cf.* Annexe .3).

---

1. (voir le site web : <https://protecteau.be/fr/nitrate/agriculteurs/couvert/cipan-sie>).

### 3.3.2 Impacts climatiques de l'utilisation des Cultures Intermédiaires

Les CI exercent une influence sur le climat via des effets biogéochimiques et biophysiques ([Ceschia et al., 2017](#)). Dans leur étude, [Liu et al. \(2022\)](#) ont montré que même si l'ampleur de la réduction de l'équivalent  $CO_2$  due au changement d'albédo est inférieure à celle causée par la séquestration du carbone dans le sol, il reste important de l'étudier.

La littérature regorge de récentes études qui ont nourri nos réflexions dans ce travail. Ces auteurs se sont particulièrement intéressés aux effets biophysiques induits sur le climat suite à l'introduction des CI. Premièrement, celle de [Kaye et Quemada \(2017\)](#) qui dans leur review utilisent les données de la littérature pour comparer l'impact de la modification d'albédo induit par la présence de CI au stockage de carbone occasionnée par les couverts et les émissions agricoles de GES.

Deuxièmement, celle de [Ceschia et al. \(2017\)](#) qui présente le potentiel d'atténuation des changements climatiques par les CI. Ils utilisent des données d'une série temporelle (2013-2014) du site ICOS de Lamasquère pour montrer les effets de l'ajout d'une CI sur les émissions de GES et le la modification du bilan énergétique Figure 3.1.

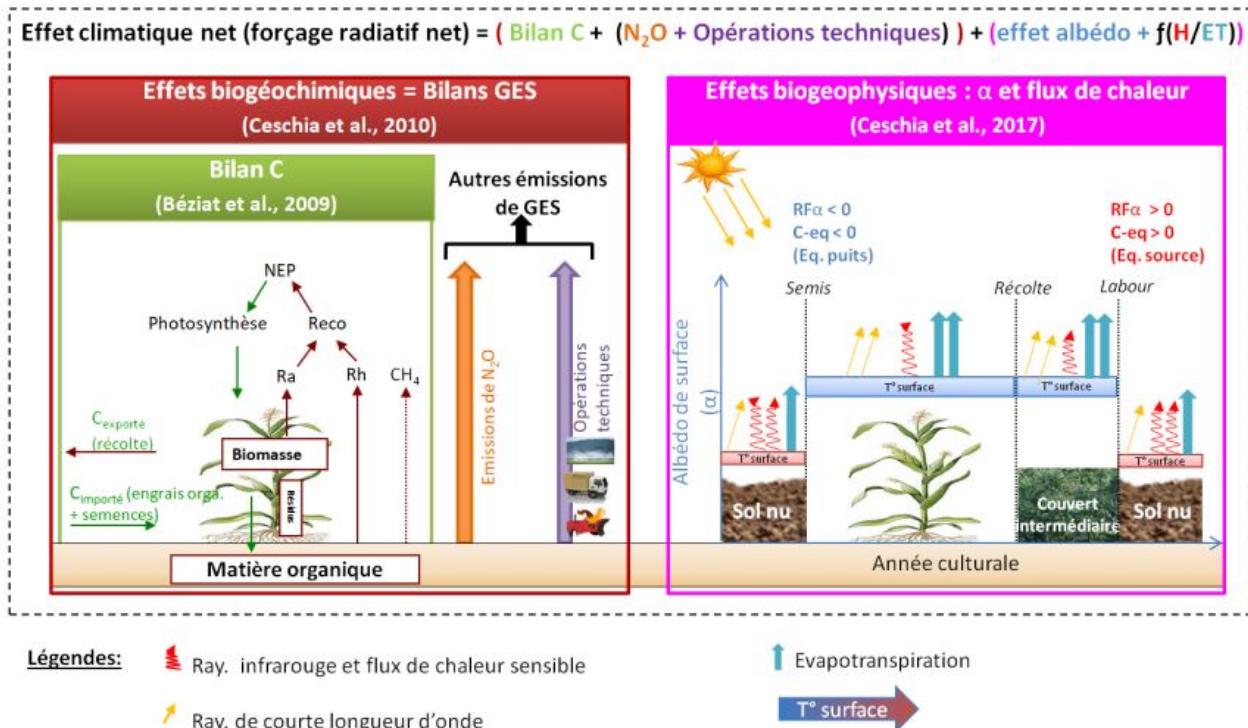


FIGURE 3.1 – Représentation conceptuelle de la contribution des composantes biogéochimiques et biogéophysiques au forçage radiatif net appliquée à une culture d'hiver suivie d'un couvert intermédiaire (CI) (ET : évapo-transpiration, H : chaleur sensible) figure provenant de l'article de ([Ceschia et al., 2017](#))

## CHAPITRE 3. ÉTAT DE L'ART

Enfin, Carrer *et al.* (2018) étudient à l'échelle européenne le potentiel de la gestion de l'albédo des terres cultivées au moyen des CI dans la lutte contre le réchauffement climatique. Pour cela, ils utilisent des cartes ECOCLIMAP et des albédos de surface des zones de grandes cultures issues de l'outil satellitaire MODIS (Carrer *et al.*, 2014). Ils en arrivent à conclure que l'introduction de cultures de couverture dans la rotation des cultures pendant une jachère de 3 mois contribuerait à l'accroissement de l'albédo sur 4,17 % de la surface en Europe. Ce qui correspond à 22 % de la surface des terres cultivées européennes. En outre, cette augmentation de l'albédo des terres cultivées serait équivalente à une diminution de 3,16 Mt CO<sub>2</sub>-eq.an<sup>-1</sup> sur un horizon de 100 ans. Cependant, le potentiel d'atténuation pourrait croître de 27 % si la CI est maintenue pendant une période supérieure à 3 mois et être réduite de 28 % en absence d'irrigation (Carrer *et al.*, 2018).

## 3.4 Les effets biophysiques

### 3.4.1 L'effet albédo

La modification d'albédo de surface ( $\Delta\alpha$ ) correspondant au passage d'un sol nu à un sol avec cultures intermédiaires se calcule au moyen de l'Equation 3.1.

$$\Delta\alpha = \alpha_{CI} - \alpha_{Ref} \quad (3.1)$$

Avec  $\alpha_{CI}$  correspondant à l'albédo au moment de la culture intermédiaire et  $\alpha_{Ref}$  celui du sol nu de référence.

Le changement d'albédo de surface conduit à un forçage radiatif en W.m<sup>-2</sup> comme le montre l'Equation 3.2. L'ampleur du changement( $Rf_{\Delta\alpha}$ ) dépend du rayonnement solaire incident ( $SW_{in}$ ) en W.m<sup>-2</sup>, de la transmittance atmosphérique ( $T_a$ ) et du changement d'albédo ( $\Delta\alpha$ ) comme décrit dans (Ceschia *et al.*, 2017). Lorsque la présence de CI augmente l'albédo, la quantité d'énergie de surface est réduite et  $Rf_{\Delta\alpha}$  devient négatif. Concrètement, il pourrait alors avoir un refroidissement du système (Ferlicoq *et al.*, 2013). Il est pratique d'utiliser une moyenne annuelle de  $RF_{\Delta\alpha}$  lorsque on souhaite calculer les équivalent CO<sub>2</sub> (Bright et Lund, 2021).

$$Rf_{\Delta\alpha} = -(SW_{in} \cdot T_a \cdot \Delta\alpha) \quad (3.2)$$

La transmittance atmosphérique est approximé au moyen de l'Equation 3.3

$$T_a = \frac{SW_{in}}{SW_{TOA}} \quad (3.3)$$

Il s'agit du rapport entre le rayonnement solaire incident à la surface de la Terre et celui au sommet de l'atmosphère. Cette grandeur correspond également à l'indice de clarté (Kt)

qui donne une idée de la nébulosité du ciel. De nombreux articles supposent la transmittance atmosphérique constante et égale à 0,85 ([Muñoz et al., 2010](#), [Carrer et al., 2018](#)). Cependant en cas de perturbation atmosphérique, cette valeur est susceptible de surestimer le forçage radiatif ([Lenton et Vaughan, 2009](#), [Sieber et al., 2019](#)).

### 3.4.2 Conversion du forçage radiatif en équivalent CO<sub>2</sub>

Le forçage radiatif est une mesure rétrospective qui ne met pas en lien la réponse réelle de la température à la perturbation, et par conséquent, elle est difficile à inclure dans les évaluations environnementales, la prise de décision et les cadres politiques ([Bright et Lund, 2021](#)). Dans le but de permettre aux utilisateurs ou aux décideurs d'effectuer rapidement des calculs de l'impact climatique des émissions de GES, et aussi de permettre une facile comparaison entre les effets biogéochimiques et biophysiques, le changement d'albédo ( $\Delta\alpha$ ) est converti en terme d'effet équivalent CO<sub>2</sub> ([Carrer et al., 2018](#)).

D'après [Bright et Lund \(2021\)](#), aucune méthodologie simple n'est disponible pour cette conversion, le principal problème réside dans l'absence d'une dépendance temporelle universelle selon la durée de vie de la perturbation. Par exemple, le Rf du CO<sub>2</sub> est à la fois étendu dans le temps et dans l'espace, la réponse climatique qui en découle étant indépendante du lieu d'émission. Par contre, les Rf du  $\Delta\alpha$  sont plus localisés et peuvent être totalement inversés sur de courtes échelles de temps. Pour les quelques méthodes qui s'efforcent à considérer cette dépendance, aucune ne prend en compte la disparité spatiale qu'il y a entre la réponse du climat aux émissions de CO<sub>2</sub> et le  $\Delta\alpha$  ([Jones et al., 2013](#)).

**Métriques climatiques** [Bright et Lund \(2021\)](#) Dans leur review proposent des méthodes de conversion en équivalent CO<sub>2</sub> dont certaines ont été utilisées dans ce travail. Ces méthodes diffèrent par la manière dont le temps est considéré par rapport aux perturbations occasionnées par le  $\Delta\alpha$  et le gaz de référence qui est le CO<sub>2</sub>. L'approche la plus courante qui est de faire un lien entre le Rf du  $\Delta\alpha$  et une émission de CO<sub>2</sub> imposée sur un fond de concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique n'est pas toujours applicable. En effet, le problème vient des puits terrestres et océaniques qui sont susceptibles de diminuer instantanément les émissions de CO<sub>2</sub> et par conséquent affecter la proportion disponible dans l'atmosphère.

L'horizon temporel (TH) correspond au temps d'intégration, il impacte les résultats obtenus par les variables climatiques. Dans leur article, [Bright et al. \(2015\)](#) insistent sur la difficulté de déterminer ce paramètre en biophysique environnementale. De plus, ils rajoutent que les temps d'intégration courts accentuent l'effet de l'albédo, tandis que les temps longs atténuent cet effet.

Suivant le cas d'étude, il faut choisir une ou plusieurs méthodes de conversion à appliquer. En effet, chaque choix implique des décisions subjectives de la part de l'utilisateur sur le

### CHAPITRE 3. ÉTAT DE L'ART

type de métrique et l'horizon temporel de l'évaluation d'impact. Ces décisions affectent la transparence et l'incertitude de la méthode.

Pour choisir les méthodes à appliquer, il est possible de se référer à la Figure 3.2. Nous commençons par faire l'hypothèse d'une dépendance temporelle de la modification d'albédo car le forçage radiatif est dépendant de la croissance de la CI dans le temps et aux décisions de son utilisation d'année en année. Vu que le Rf n'est pas constant, les méthodes qui utilisent une intégration dans le temps seront privilégiées, et celles qui seront utilisées dans ce travail sont : TDEE,  $\Sigma TDEE$  et GWP.

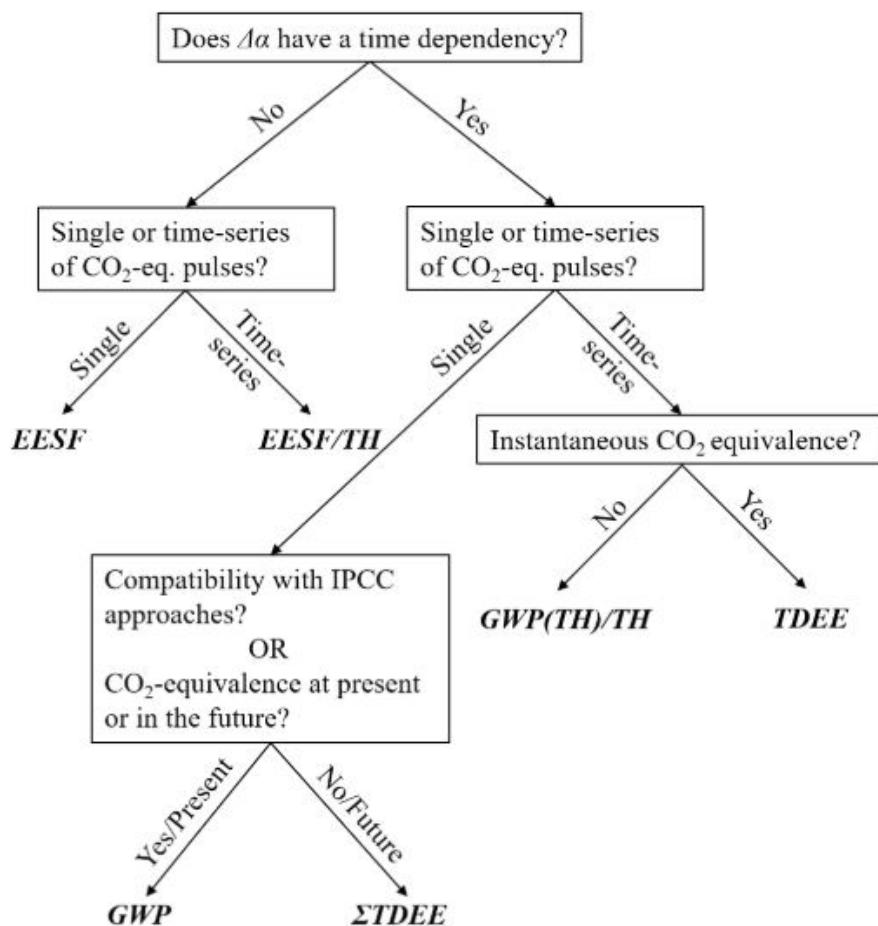


FIGURE 3.2 – Arbre de décision pour les métriques de conversions du  $RF_{\Delta\alpha}$  en équivalent CO<sub>2</sub> ([Bright et Lund, 2021](#))

**Méthode 1 - Équivalences des émissions dépendantes du temps (TDEE , pour « Time-Dependent Emissions Equivalent » en anglais)** Dans leur article, [Bright et al. \(2016\)](#) proposent une méthode pour refléter la modification continue de l'albédo dans le temps, qui prend en compte des processus d'élimination du CO<sub>2</sub>. Cette méthode permet d'éviter une possible

surestimation des émissions de  $CO_2$  rencontrée dans les méthodes ne prenant pas en compte la variation temporelle ([Bright et Lund, 2021](#)). Pour son application, elle nécessite non seulement une série temporelle d'émission pulsée de  $CO_2$ , mais aussi la définition par l'utilisateur du scénario à priori de dépendance temporelle inter annuelle de la variation d'albédo. TDEE est un vecteur colonne des impulsions d'émission ou d'absorption d'équivalent  $CO_2$ , dont la longueur est définie par le nombre de pas de temps choisi pour décrire l'évolution temporelle du  $\Delta\alpha$ .

La TDEE est obtenue en remplaçant le forçage radiatif instantané  $RfCO_2$  résultant d'une série continue d'émissions annuelles de  $CO_2$  par le forçage radiatif induit par le changement d'albédo  $RF_{\Delta\alpha}$ . Des explications plus précises sont données dans ([Bright et al., 2016](#)). Son calcul se fait en utilisant l'[Equation 3.4](#).

$$TDEE = A_E^{-1} k_{CO_2}^{-1} Y_{CO_2}^{-1} RF_{\Delta\alpha}^* \quad \text{en kg CO}_2\text{-eq. m}^{-2}\text{an}^{-1} \quad (3.4)$$

**Méthode 2 - Pouvoir de réchauffement global** Très connu pour comparer l'effet climatique du forçage radiatif de l'albédo de surface avec celui d'autres émissions de GES, le pouvoir de réchauffement global (PRG, ou « Global Warming Potential » GWP en anglais) est présenté dans [Bright et Lund \(2021\)](#) comme une méthode de conversion dépendante du temps. Elle représente l'accumulation du forçage radiatif ( $RF_{\Delta\alpha}$ ) à la suite d'une émission pulsée de  $CO_2$  au cours d'un horizon temporel (TH). L'utilisateur devra définir le scénario à priori de dépendance temporelle inter annuelle de la variation d'albédo qui doit être défini par l'utilisateur. Le GWP se calcule au moyen de l'[Equation 3.5](#).

$$GWP_{\Delta\alpha}(TH) = \frac{\sum_0^{t=TH} RF_{\Delta\alpha}(t)}{A_E k_{CO_2} \sum_0^{t=TH} y_{CO_2}(t)} \quad \text{en kg CO}_2\text{-eq. m}^{-2} \quad (3.5)$$

Avec :

$RF_{\Delta\alpha}^*$  le vecteur colonne de la moyenne annuelle instantanée en  $W.m^{-2}$ ,

$k_{CO_2}$  est l'efficacité du forçage radiatif de l'atmosphérique, selon [Joos et al. \(2013\)](#) pour les petits pulses d'émission à une concentration atmosphérique de 389 ppm, elle est considérée comme une constante égale à  $1,76 \times 10^{-15} W.m^{-2} kg^{-1}$ ,

$RF_{\Delta\alpha}$  le forçage radiatif causé par le changement d'albédo de surface,

$A_e$  est la surface de la terre  $5,1 \times 10^{14} m^2$ ,

$TH$  l'horizon temporel,

### CHAPITRE 3. ÉTAT DE L'ART

$\Upsilon_{CO_2}$  est la matrice triangulaire inférieure. Les éléments de colonne (ligne) représentent la fraction de CO<sub>2</sub> atmosphérique qui diminue (augmente) avec le temps. Elle décrit l'abondance de CO<sub>2</sub> atmosphérique à la suite d'un pulse d'émission. Elle est déterminée au moyen de  $y_{CO_2}$

$y_{CO_2}(t) = \text{IRF}_{CO_2}(t)$  est la décroissance dans le temps d'une impulsion de 1 kg de CO<sub>2</sub> émise à la même concentration de fond. Sa formule est donnée dans [Joos et al. \(2013\)](#). Il se calcule comme décrit dans l'Equation 3.6.

$$\text{IRF}_{CO_2}(t) = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i \exp\left(\frac{-t}{\tau_i}\right) \quad (3.6)$$

Avec :  $a_0 = 0.2173$ ,  $a_1 = 0.2240$ ,  $a_2 = 0.2824$ ,  $a_3 = 0.2763$ ,  $\tau_1 = 394.4$ ,  $\tau_2 = 36.54$ , et  $\tau_3 = 4.304$

Le calcul du forçage radiatif et sa conversion en équivalent CO<sub>2</sub> comprend des variables qui s'accompagnent d'incertitudes. Le moyen dont ces incertitudes peuvent être chiffrées est présenté dans l'annexe [.4](#)).



## 4 | Matériel et méthodes

### 4.1 Site expérimental

L'étude s'est déroulée sur l'Observatoire terrestre de Lonzée (OTL) ( $50^{\circ}33'53.94''N, 4^{\circ}42'32.97''E$ , commune de Gembloux, Belgique). Depuis 2017, la qualité et la continuité des données y sont garanties par la labélisation ICOS (Integrated Carbon Observation System). ICOS est une « European Research Infrastructure Consortium » (ERIC), il s'agit d'un réseau reconnu de stations de mesures de concentrations et flux de gaz à effet de serre (GES). Au travers d'observations effectuées sur le long terme dans les océans, l'atmosphère et les écosystèmes terrestres, cette infrastructure de recherche soutient une meilleure compréhension du cycle du carbone et de GES.

Située à 3,5 km de la faculté de Gembloux Agro-Bio-Tech (Figure 4.1), la station de Lonzée se trouve sur une parcelle agricole de 12 ha entretenue par un agriculteur local depuis plus de 80 ans (Lognoul *et al.*, 2017). Le climat à Gembloux est de type océanique tempéré avec une température annuelle de  $9,8^{\circ}C$  et en moyenne de 819 mm de pluies par an (Peel *et al.*, 2007). Le sol est un luvisol avec un drainage naturel favorable, présentant une texture limoneuse composée de limon : 70-80 %, argile : 18-22 %, sable : 5-10 % (Lognoul *et al.*, 2017).

Lonzée se trouve en Hesbaye, qui est l'une des plus grandes zones agricoles de Wallonie. Une gestion intensive y est pratiquée avec une haute productivité de 9t/ha pour le froment et 20t/ha de biomasse exportée pour la betterave. De nombreuses opérations culturales y sont aussi effectuées telles que le déchaumage et le labour (conventionnel à 30 cm ou superficiel entre 8 et 10 cm) avant chaque semis. De plus, suivant les législations, des insecticides, fongicides herbicides sont appliqués par l'agriculteur au cours de l'année (Buyssse *et al.*, 2017).

Une variabilité spatiale intra-parcellaire qui évolue au cours du temps est présente à Lonzée, une étude de l'hétérogénéité y a été effectuée (*cf.* Annexe .5), elle serait non seulement causée par des effets de bords sur la culture liée à des cultures qui pousseraient de manière plus clairsemée en dehors de la parcelle, mais aussi à des zones sur sol nu qui sécheraient plus vite que d'autres après des épisodes de pluies. Cette variabilité est susceptible d'affecter la comparaison entre les images satellitaires et un capteur *in situ* qui n'ont pas la même

## CHAPITRE 4. MATÉRIEL ET MÉTHODES

empreinte de mesure. Pour résoudre ce problème, la zone d'étude a été réduite en une zone tampon afin d'essayer d'uniformiser les empreintes. De ce fait, la résolution de Sentinel-2 nous permet d'aller chercher une sous-zone dans la parcelle qui correspond le mieux possible à la zone d'influence du capteur *in situ*. Lors de la validation des albédos satellitaires à l'aide des mesures *in situ*, la zone d'étude satellitaire sera donc réduite à cette zone d'empreinte du CNR4 qui est une surface de 29 m de rayon (*cf.* Annexe .5).

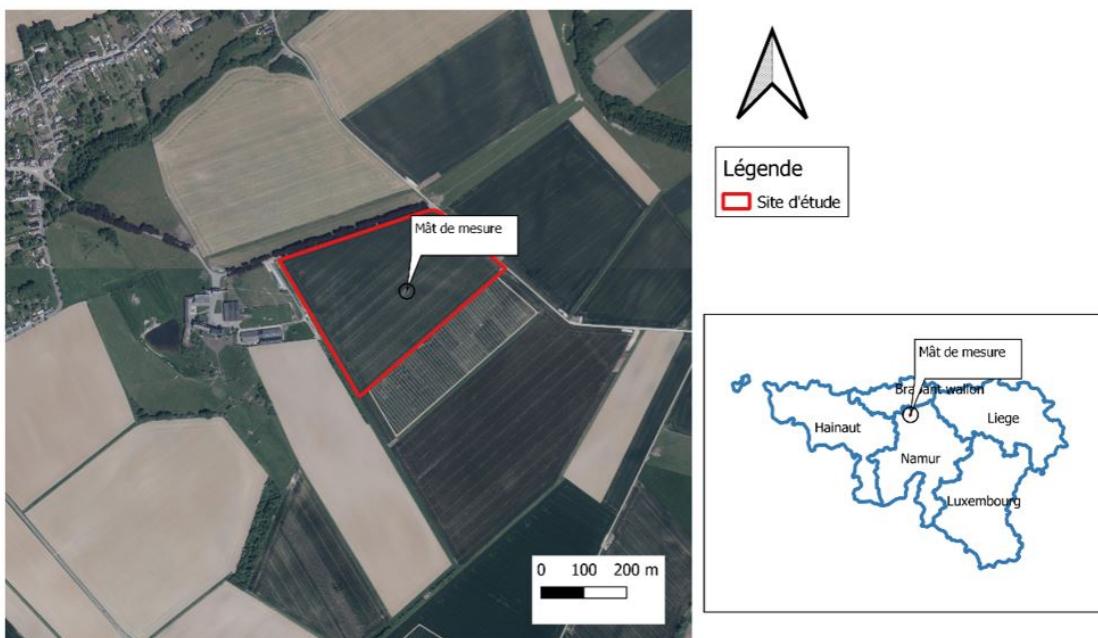


FIGURE 4.1 – Site expérimental ICOS, Observatoire terrestre de Lonzée (OTL).

Sur la parcelle de Lonzée, la rotation est quadriennale et les principales cultures sont la betterave sucrière (*Beta vulgaris L.*), le blé d'hiver (*Triticum aestivum L.*), la pomme de terre (*Solanum tuberosum L.*). Avec, entre les cultures, des périodes de repos pour lesquelles soit on laisse le sol nu, soit des cultures intermédiaires sont semées en automne pour être récoltées fin décembre. Bien que la labélisation ICOS a été faite en 2017, il faut savoir que des mesures sont réalisées à Lonzée depuis 2004. Par conséquent, un grand set de données est disponible permettant d'effectuer des analyses sur les années antérieures. L'historique des périodes d'intercultures de la parcelle est le suivant : sol nu (2005, 2007, 2011), moutarde (2009, 2013, 2015, 2017), avoine et féverole uniquement en 2019 ([Buyssse et al., 2017](#)).

Au centre de cette parcelle expérimentale se trouve un système d'Eddy covariance situé à 2,9 m de la surface du sol et une station météorologique sur laquelle est aussi présente une caméra phénologique qui, deux fois par jour, prend des photos de la parcelle (Figure 4.2). La présence de cette station météorologique permet d'avoir des données toutes les 30

## CHAPITRE 4. MATÉRIEL ET MÉTHODES

min. De plus, une station de secours est également installée proche de la station principale pour se prémunir d'un manque de données météorologiques en cas de panne sur la station principale. Un capteur de rayonnement (CNR4, Kipp and Zonen, Delft, NL) permet la mesure du rayonnement solaire incident et réfléchi. Une cellule photo réceptrice permet la mesure de la densité de flux de photons photosynthétiques actifs entrants directs (Sunshine sensor type BF3, Delta-T Devices Ltd, Cambridge, UK), diffuse et sortante. On y retrouve également un capteur qui mesure la hauteur de neige (SR50A-L, Campbell Scientific, Logan, UT, US), et un pluviomètre (TRwS415, MPS system sro, Bratislava, SK). Enfin, la teneur en eau est mesurée à une profondeur de 5 cm avec des sondes (Delta-T ML2x, UK). Outre les variables citées précédemment, d'autres mesures sont effectuées à Lonzée mais celles-ci n'interviennent pas dans le cadre de ce travail. Pour plus d'informations, le site Web de « l'Ecosystem Thematic Centre (ETC) » recense l'ensemble des données mesurées sur les stations ICOS classe 2<sup>1</sup>.



FIGURE 4.2 – Station ICOS de Lonzée avec au centre le dispositif pour les mesures. L'état de la parcelle correspond à un sol après une opération de labour réalisé en mai 2018.

### 4.1.1 Détermination des variables

**Calcul de l'albédo *in situ* :** l'albédo est calculé comme le rapport entre le rayonnement solaire entrant ( $SW_{in}$ ) et sortant ( $SW_{out}$ ) toutes les 30 min entre 10h et 14h. Cette condition horaire est appliquée pour garantir une quantité de rayonnement assez importante qui arrive jusqu'à la surface avant de pouvoir être réfléchie. Par la suite on a effectué une moyenne journalière

1. voir site Web de « l'Ecosystem Thematic Centre (ETC) » <https://www.icos-cp.eu/index.php/data-services>

## CHAPITRE 4. MATÉRIEL ET MÉTHODES

**Indice de clarté ( $K_t$ ) :** il a une valeur comprise entre 0 et 1 et est calculé avec l'Equation 4.1

$$K_t = \frac{SW_{in}}{SW_{TOA}} \quad \text{et} \quad SW_{TOA} = q \cdot \cos(z) \quad (4.1)$$

Avec :

$z$  l'angle zénithal en radian

$q$  la constante solaire ( $1367 \text{ W.m}^{-2}$ )

$SW_{TOA}$  rayonnement extraterrestre au sommet de l'atmosphère

La formule de calcul de l'indice de clarté est semblable à celle de la transmittance atmosphérique calculée dans la Section 3.4.1

**Teneur en eau :** la teneur en eau du sol (SWC) à 5 cm est mesurée toutes les 1 min et moyennée sur 30 min à Lonzée par les cannes Sentek, les capteurs ML3 et CS616. Après mesures, des équations de calibration fournies par le fabricant sont utilisées par ICOS pour fournir la teneur en eau volumétrique ( $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$ ).

Durant la période d'étude il y a eu des soucis de maintenance de capteurs qui ont causé l'absence de données de teneur en eau du 08/11/2017 au 22/05/2018, intervalle de temps qui englobe une période d'intérêt de ce travail (moutarde en 2017). Cette absence de données va avoir des répercussions dans la suite de nos résultats.

### 4.1.2 Calcul du forçage radiatif

Le calcul du forçage radiatif et sa conversion en équivalent  $CO_2$  a été effectué au moyen des équations proposées dans les Sections 3.4.1 et 3.4.2.

La conversion en équivalent  $CO_2$  va se faire sur un horizon temporel de 100 ans, pour être en harmonie avec la plupart des études sur les effets biogéochimiques. De plus, pour se rapprocher de la situation réelle, le scénario considéré sera celui d'une rotation de cultures de 4 ans, dans laquelle les CI sont introduites une année sur deux (comme c'est le cas à Lonzée).

## 4.2 Méthodes de détermination de l'albédo de référence

L'évaluation du forçage radiatif lié à l'introduction de cultures intermédiaires nécessite la détermination de la variation d'albédo introduite par la pratique ( $\Delta\alpha = \alpha_{CI} - \alpha_{Ref}$ ). Si

## CHAPITRE 4. MATÉRIEL ET MÉTHODES

l’albédo de la culture intermédiaire est mesuré *in situ* en temps réel, l’estimation de l’albédo de référence ( $\alpha_{Ref}$ ) peut s’avérer plus problématique. Idéalement, cet albédo de référence est mesuré *in situ* et de façon synchrone sur une parcelle témoin de sol nu se trouvant aux environs de la zone d’étude. Cette proximité dans l’espace et le temps assure les mêmes conditions pédoclimatiques, la seule différence avec la parcelle d’étude étant la couverture du sol. Dans notre étude, cette mesure de référence n’est cependant pas disponible. Deux alternatives sont alors possibles pour récupérer un albédo témoin. La première consiste à le modéliser sur base des données historiques de la parcelle *in situ* (approche 1, figure 4.3). La seconde consiste à utiliser l’outil satellitaire pour identifier des parcelles de sols nus avoisinantes à la zone d’intérêt durant la période d’étude et déterminer l’albédo de ces dernières (approche 2, figure 4.3).

Pour assurer la robustesse de la modélisation de l’approche 1, un set de données étoffé sur sol nu, couvrant la plus grande gamme de valeurs des variables directrices possibles de l’albédo (notamment d’humidité de sol) est nécessaire. Si les données fiables à partir de 2017 sont disponibles à cet effet, un biais technique, présent avant 2017, entraîne des doutes sur la qualité des mesures d’albédo mesuré avant 2017 car l’instrument de mesure d’albédo se trouvait sur l’îlot central de la zone d’étude. En 2017, sous les instructions de ICOS, un instrument supplémentaire a été placé sur une partie cultivée de la parcelle. Cette nouvelle mesure est plus représentative, mais son utilisation a aussi introduit une discontinuité dans la série temporelle. Dans ce travail ce biais sera estimé sur base d’une comparaison des deux systèmes (îlot et parcelle) sur la fenêtre temporelle de cette étude (2017 à 2020). Par la suite, l’impossibilité d’étendre ce biais sur les données historiques (avant 2017) sera discutée.

En raison de l’existence de ce biais, deux stratégies vont être envisagées. La première propose d’étudier les données les plus récentes de 2017 à 2020, avec un data set plus restreint mais sans biais technique (stratégie 1, figure 4.3). Dans la deuxième, pour étoffer le data set, nous irons chercher les données historiques (2005, 2007 et 2011) en prenant le risque d’inclure le biais technique évoqué (stratégie 2, figure 4.3).

Pour l’approche 2, des parcelles avoisinantes vont être sélectionnées aux alentours de la zone d’étude. Au moyen de Sentinel-2 et des indices de sol nu, des périodes de sol nu sur ces parcelles, synchrones avec les mesures *in situ* sur la parcelle principale, seront alors identifiées et leur albédo satellitaire constituera l’albédo de référence. Cette approche nécessite au préalable de valider les mesures d’albédo satellitaire. Ceci sera réalisé en comparant l’albédo satellitaire estimé sur la parcelle d’étude avec l’albédo *in situ* qui y est mesuré.

Enfin, les forçages radiatifs au moyen de ces différents albédos témoins seront calculés.

## CHAPITRE 4. MATÉRIEL ET MÉTHODES

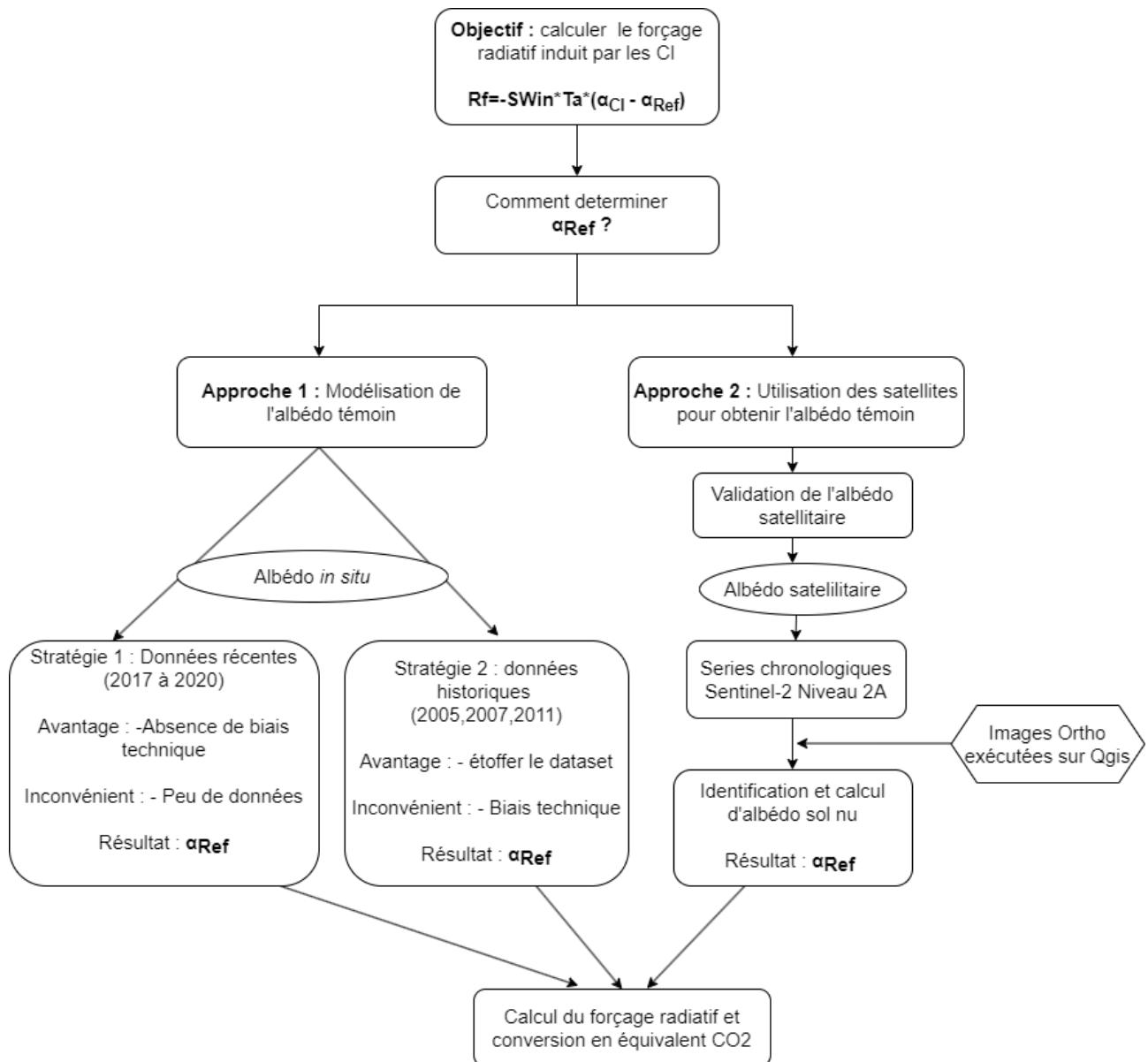


FIGURE 4.3 – Organigramme de la méthodologie d'étude.

### 4.2.1 Approche 1 : Modélisation de l'albédo de référence

La modélisation de l'albédo de référence commence par (A) une description de l'état de la parcelle afin d'identifier les occurrences de sols nus dans la série temporelle étudiée. Ensuite (B) l'identification des variables d'entrée du modèle et enfin (C) la création du modèle suivant les stratégies 1 et 2.

## CHAPITRE 4. MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Évolution de l'état de la parcelle

La période d'intérêt ici débute par la récolte du froment d'hiver et se termine lors du semis de la culture de printemps pomme de terre (2018) ou betterave (2020). Pendant celle-ci, les CI ont été introduites en automne 2017 (moutarde) et 2019 (avoine et féverole). Les deux années comprenant les cultures de couverture ont été mises en relation avec les années comprenant les absences de CI, suivant la ligne du temps présentée à la Figure 4.4. On y aperçoit également l'état de la parcelle expérimentale pour les années du data set historique sans cultures intermédiaires (2005, 2007 et 2011).

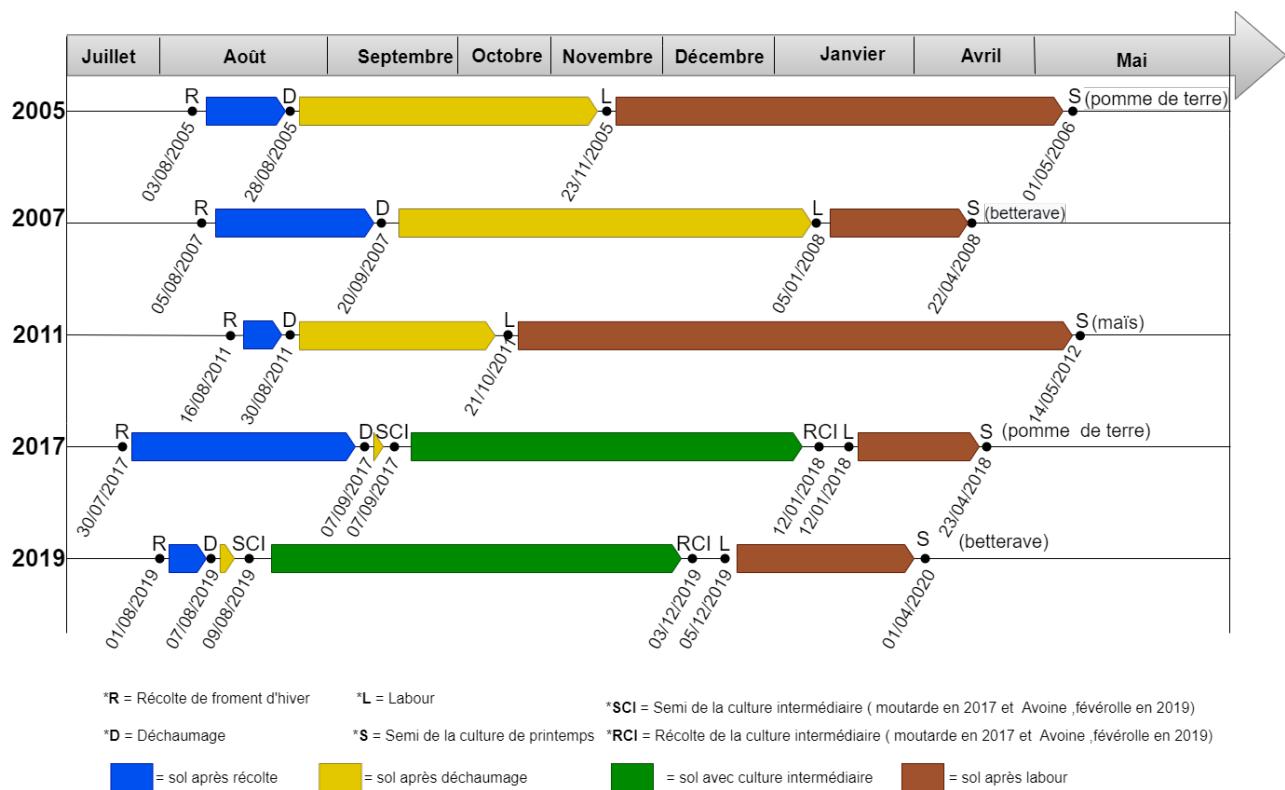


FIGURE 4.4 – Ligne du temps avec itinéraires des cultures pour les périodes d'intérêts sur la parcelle d'étude.

D'une année à l'autre, les dates de début des opérations culturales (semis, récoltes, déchaumage et labour) sont légèrement différentes. Elles sont dépendantes des disponibilités de l'agriculteur, des conditions météorologiques, et des raisons énumérées dans l'Annexe 3. Après une opération culturelle, l'état du sol est susceptible de changer et par conséquent faire varier les valeurs d'albédo. Les Figures 4.5 (a) et (b) proviennent de la caméra phénologique de Lonzée et montrent la parcelle après déchaumage et après labour. Pour faire l'analogie avec les années sans CI, le déroulé des activités est décrit ci-contre. Après le déchaumage, la CI est semée sur la parcelle d'intérêt. De son côté, la parcelle de référence reste en état de «

sol après déchaumage » (Figure 4.5 (a)). Quelques semaines après, la parcelle de référence est labourée et passe en état de « sol après labour » (voir Figure 4.5 (b)). La parcelle d'intérêt, quant à elle, porte toujours la CI et ne sera labourée que des semaines plus tard lors de la destruction de la CI suivant la législation décrite à la Section 3.3.1.



(a) État du sol après déchaumage.



(b) État du sol après labour.

**FIGURE 4.5 – Sol nu sur la parcelle de Lonzée.** (a) État du sol après déchaumage correspond à celui avant la culture de la CI. Juste après la récolte du froment, le sol est déchaumé et la CI est plantée. (b) État du sol après labour est celui qui représente le sol après enfouissement de la CI, un peu avant le semis de la culture de Printemps.

### Construction et application du modèle

L'approche 1 (Figure 4.3), consiste à déterminer l'albédo de référence au moyen d'une modélisation. Les variables d'entrées du modèle sont les facteurs d'influence de l'albédo présentés en Section 3.1.2. Le postulat qui a guidé nos réflexions est que la teneur en eau sur une parcelle couverte par les CI est la même que sur une parcelle de sol nu au même moment et sous conditions climatiques identiques. Cette hypothèse semble raisonnable dans la mesure où les CI semées en automne ne sont pas demandeuses d'eau.

Premièrement sur chaque période de sols nus (sol après déchaumage et sol après labour) identifiée à l'aide du cahier de terrain (*cf.* Annexe .7), nous avons commencé par explorer les variables environnementales directrices principales disponibles afin de mieux visualiser les relations. Pour y parvenir, une première régression a été réalisée entre l'albédo et la teneur en eau (SWC). Par la suite, les résidus de la première régression ont été mis en relation avec l'indice de clarté (*cf.* Annexe .6).

Deuxièmement, le biais technique mentionné à la Section 4.2 a été chiffré pendant l'intervalle de temps entre 2017 et 2020, en faisant la moyenne de la valeur absolue entre l'albédo du

## CHAPITRE 4. MATÉRIEL ET MÉTHODES

capteur sur la parcelle et l'albédo du capteur sur l'îlot central. Le modèle a donc été construit suivant deux stratégies distinctes à savoir la stratégie 1 (données récentes) et la stratégie 2 (données historiques). Les  $R^2$  ajustés ainsi que les paramètres de chaque équation de la forme  $Y = aX + b$  ont été déterminés et présentés dans la Section 5.3.1. Cependant, il est important de préciser que c'est le manque de données sur la période de sol nu entre 2017 et 2020 qui a motivé l'utilisation de deux stratégies dans ce travail.

L'objectif des étapes précédentes était de construire un modèle de régression linéaire multiple pour prédire l'albédo de sol nu (sol après déchaumage et sol après labour) en fonction des deux variables prédictives qui sont : la teneur en eau et l'indice de clarté. Cette prédiction sera calculé au moyen de l'Equation 4.2.

$$\alpha_{\text{Ref}} = \beta_0 + (\beta_1 \cdot \text{teneur en eau}) + (\beta_2 \cdot \text{indice de clarté}) \quad (4.2)$$

Avec :

$\beta_0$  : interception de la droite de régression

$\beta_1, \beta_2$  : pente de la droite de régression

Une fois le modèle ajusté pour les deux sous-périodes de sols nus des stratégies 1 et 2, il a été appliqué pour faire des prédictions d'albédo de référence dans le cas de la culture de moutarde (scénario 2017) et celui du mélange avoine/féverole (scénario 2019) comme repris dans la Table 4.1.

TABLE 4.1 – Scénarios de modélisation de l'albédo de référence.

	Date de semis de la CI sur la parcelle d'étude	Date de labour De la parcelle de référence	Date d'enfouissement de la CI sur parcelle d'étude
<b>Scénario 2017</b>	07-09-2017	23-11-2017	12-01-2018
<b>Scénario 2019</b>	09-08-2019	21-10-2019	05-12-2019

Les dates de labour des parcelles de référence des différents scénarios sont réalistes et correspondent aux dates de labour des années sans CI 2005 et 2011 (Figure 4.4). Le fait que ces dates diffèrent suivant les années permettra aussi de tester l'impact d'un labour tardif sur le forçage radiatif.

## 4.2.2 Approche 2 : Calcul de l’albédo de référence par l’outil satellitaire

L’outil satellitaire Sentinel-2 a été utilisé pour calculer l’albédo satellitaire et identifier les parcelles de sols nus adjacentes. Pour sa validation, l’albédo satellitaire a été calculé et calibré au moyen de l’albédo mesuré *in situ*. Et par après une méthodologie a été appliquée pour identifier les sols nus.

### Calcul de l’albédo satellitaire

La réflectance est une donnée relative qui représente le pourcentage d’énergie enregistré dans chaque fenêtre spectrale ([Smith, 2010](#)). Par conséquent, même si le changement de bande entre les différents produits satellitaires pourrait conduire à des modifications des proportions d’énergies émises, elles n’impactent pas réellement la réflectance. C’est l’hypothèse qui a guidé le calcul de l’albédo satellitaire. L’albédo satellitaire a été estimé aux moyens de données de réflectance dans différentes bandes spectrales. Au départ des calculs construits pour Landsat par [Liang \(2001\)](#), les bandes spectrales de Landsat ont été transposées à celle de Sentinel-2 au moyen de l’Equation 4.3. La correspondance entre les bandes de Landsat et Sentinel-2 est disponible dans la Table 4.2.

TABLE 4.2 – Correspondance entre les bandes de Landsat 8 et Sentinel-2.

Landsat 8	Sentinel-2	Type de bande
B4	B4	Rouge
B2	B2	Bleu
B5	B8	NIR
B6	B11	SWIR
B7	B12	SWIR2

$$\alpha_{\text{Ref}} = 0.356 \text{ B2} + 0.130 \text{ B4} + 0.373 \text{ B8} + 0.085 \text{ B11} + 0.072 \text{ B12} - 0.018 / 1.016 \quad (4.3)$$

Notons que B2, B4, B8, B11 et B12 représentent les bandes de Sentinel-2. Par ailleurs, aucune des corrections pour images Sentinel-2 énoncées dans l’Annexe [.2](#) n’a été faite sur l’albédo satellitaire, ce choix sera discuté dans la Section [6.4](#).

### Identifications des parcelles de sols nus

La méthodologie suivie pour estimation de l’albédo de référence par la méthode satellitaire est décrite dans la Figure [4.6](#). Elle s’appuie sur celle décrite par ([Mzid et al., 2021](#)).

## CHAPITRE 4. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les étapes suivies sont : (1) sélection des parcelles témoins agricole; (2) prétraitement des données satellitaires ; (3) détermination des seuils de filtrages des indices et sélections de sols nus ; (4) calcul de l'albédo satellitaire des parcelles sélectionnées.

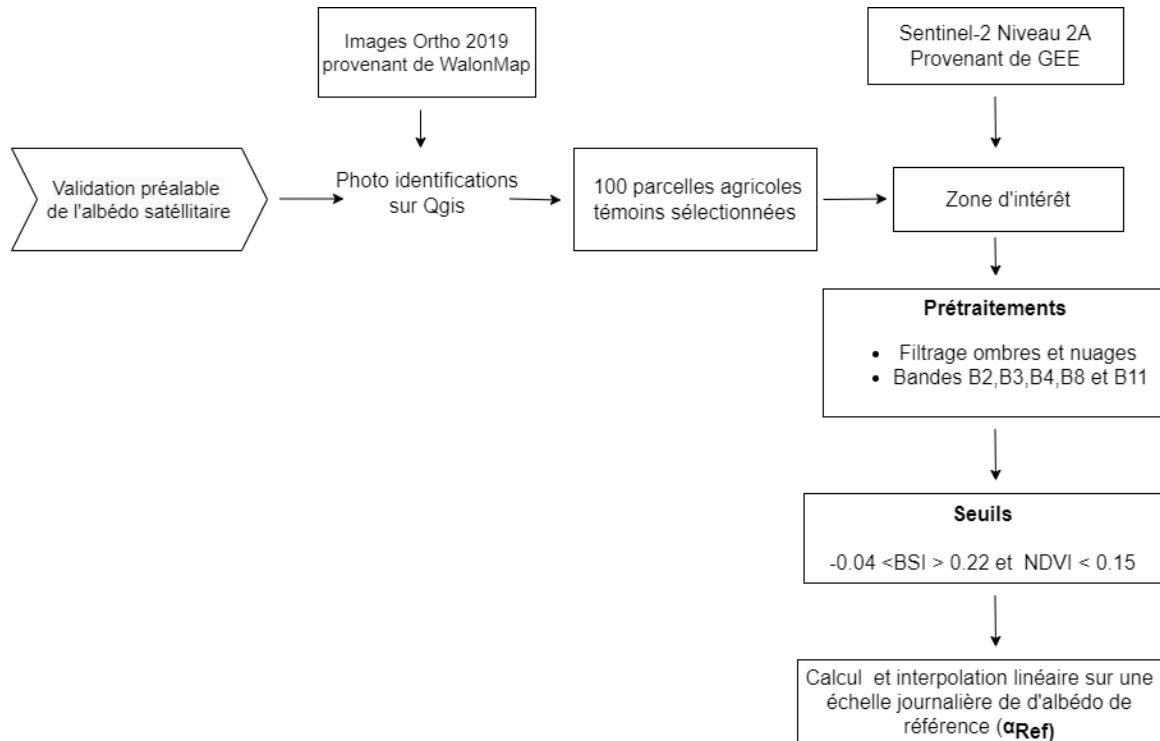


FIGURE 4.6 – Organigramme de la méthodologie suivie sur *Google Earth Engine*

**Sélection des parcelles agricoles témoins :** Pour s'assurer que l'albédo témoin soit issu de parcelles agricoles, les parcelles témoins ont été sélectionnées par photo-identification au moyen du logiciel Qgis. Pour cela, nous avons utilisé la couche ortho photo de 2019 en provenance du site web du Géo portail de Wallonie<sup>2</sup> pour tracer une zone d'empreinte de 5 km de rayon autour du site d'étude. Dans ce périmètre, 100 parcelles agricoles ont été digitalisées aléatoirement pour la suite de l'analyse.

**Prétraitement des données satellitaires sur GEE :** La plateforme GEE a été utilisée pour sélectionner toutes les images Sentinel-2 couvrant la zone d'étude pour la période allant du 01 janvier 2017 au 31 décembre 2020. Bien que les capteurs Sentinel-2 présentent plusieurs bandes s'étalant de 443 à 2190 nm, seules les bandes dans le domaine du visible, du proche infrarouge (NIR) et de l'infrarouge à ondes courtes (SWIR1 et SWIR2) ont été sélectionnées (Table 4.3). Ces bandes ont montré leur efficacité dans les études sur les caractéristiques du sol (Diek *et al.*, 2017).

2. (<https://geoportail.wallonie.be/cartes-et-donnees>)

## CHAPITRE 4. MATÉRIEL ET MÉTHODES

D'après la documentation de GEE, la collection Sentinel-2 niveau-2A utilisée dans ce travail est obtenue au départ de Sentinel niveau 1-C et après exécution de l'algorithme Sen2Cor. Durant la phase de prétraitement sur GEE, nous avons utilisé s2cloudless, l'algorithme de masquage des nuages et ombres de nuages des données de réflectance Sentinel-2. En effet, cet algorithme permet d'identifier les nuages à partir de l'ensemble de données de probabilité de nuages et des ombres. Ces données sont définies par l'intersection entre la projection des nuages et des pixels à faible réflectance dans le proche infrarouge.

TABLE 4.3 – Bandes Sentinel-2 utilisées dans ce travail.

	Sentinel-2		
Longueur d'onde (nm)	Résolution (m)	Numéro de bande	
<b>Blue</b>	490	10	2
<b>Vert</b>	560	10	3
<b>Rouge</b>	665	10	4
<b>NIR</b>	242	10	8
<b>SWIR1</b>	1610	20	11
<b>SWIR2</b>	2020	20	12

### Sélections des indices de sols nus

L'approche 2 (voir Figure 4.3) nécessite l'identification de sols nus dans des parcelles avoisinantes à celle de Lonzée, aux périodes où celle-ci est occupée par une CI. La méthodologie adoptée pour identifier les sols nus sur base d'images satellitaires est de développer un masque de sol nu combinant l'indice de végétation normalisé (NDVI) et l'indice de sol nu (Bare soil index, BSI). Malgré son appellation, le BSI à lui seul n'est pas suffisant pour identifier les sols nus car la réflexion du sol se produit le plus souvent dans l'infrarouge moyen. Le BSI utilise le SWIR tandis que le NDVI se calcule avec les bandes du visible et de l'infrarouge proche. Ces deux indicateurs sont donc construits avec des bandes spectrales différentes. En associant les deux indices, il est possible d'obtenir une information supplémentaire. La combinaison de ces deux indices s'est montrée performante dans de nombreux travaux de recherches pour identifier le sol nu ([Rikimaru et al., 2002](#), [Zha et al., 2003](#), [Mzid et al., 2021](#)).

**NDVI :** Il est calculé sur base des bandes rouges et proches infrarouges de Sentinel-2 au moyen de l'Equation 4.4.

$$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4} \quad (4.4)$$

Il est compris entre -1 et 1 et permet en théorie de différencier le statut végétal de la surface. Il a par exemple été utilisé dans de nombreux travaux pour distinguer la couverture végétale du sol nu ou encore l'association sol nu et végétation morte ([Shabou et al., 2015](#),

## CHAPITRE 4. MATÉRIEL ET MÉTHODES

da Silva Chagas *et al.*, 2016). Des valeurs de NDVI élevées renvoient à la présence de végétation verte, tandis que des valeurs faibles renvoient à une végétation sèche ou un sol nu.

**Bare Soil Index (BSI) :** Pour apporter une solution aux limitations du NDVI, l'indice de végétation de sol nu (BSI) a été rajouté dans le filtrage pour extraire les pixels de sol nu. (Rikimaru *et al.*, 2002) ont proposé une formule originale de BSI qui inclut le SWIR. Son calcul s'effectue avec l'Equation 4.5.

$$BSI = \frac{(SWIR1 + Red) - (NIR + Blue)}{(SWIR1 + Red) + (NIR + Blue)} \quad (4.5)$$

Les valeurs du BSI sont comprises entre -1 et 1, la valeur la plus positive renvoie au sol le plus nu. Le BSI est un indice spectral qui renforce la détection des surfaces de sol exposées en utilisant les caractéristiques du sol. En pratique, l'utilisation de cet indice requiert une bonne connaissance de la zone d'étude afin de définir le seuil optimum d'identification de sol nu (Mzid *et al.*, 2021).

**Sélection des périodes sols nus :** Sur l'ensemble des parcelles agricoles sélectionnées, les valeurs de BSI et de NDVI sans nuage ont donc été combinées pour identifier les périodes de sol nu dans la série temporelle de Sentinel-2. Le succès de la méthode dépend de la définition du seuil pertinent sur chacun des deux indices.

Pour identifier les seuils adéquats, une calibration préalablement été effectuée sur la parcelle de Lonzée, dont l'état du sol est connu en permanence grâce aux images de la caméra phénologique et au cahier de terrain. Dans la littérature, les sols nus sont supposés avoir des valeurs de NDVI faibles comprises entre 0.1 et 0.3 (Žížala *et al.*, 2019, Ibrahim et Gobin, 2021).

Les seuils de NDVI et de BSI ont été choisis en considérant les valeurs correspondantes à un sol nu sur la parcelle d'étude. Par la suite nous avons postulé que ces seuils étaient les mêmes pour tous les sols agricoles de la région.

## 4.3 Analyse statistique

**Les données *in situ* ont été traitées avec Python (version 3.8).**

L'importance des facteurs utilisés pour la modélisation de l'albédo de référence a été évaluée au moyen de la librairie (statsmodels) et les valeurs des coefficients et des R<sup>2</sup> analysés. Afin d'implémenter le modèle multilinéaire de détermination de l'albédo de référence sur Python, nous avons utilisé la fonction de régression linéaire importée de la librairie (sklearn). Pour le construire, nous avons créé une instance de la classe de régression linéaire et utilisé les valeurs connues de teneur en eau et des indices de clarté sur sol nu des stratégies 1 et 2 pour former le modèle grâce à la fonction d'ajustement de cette classe. Une fois le modèle ajusté, nous avons réalisé des prédictions à l'aide de la fonction de prédition. Par la suite, nous avons transmis les valeurs de teneurs en eau et des indices de clarté des cultures intermédiaires présentes dans le scénario 2017 et 2019 à ce modèle. Enfin, nous avons comparé les valeurs d'albédo des sols nus obtenues. Pour évaluer la pertinence du modèle, nous avons utilisé les modules de la librairie (sklearn) qui fournit plusieurs métriques d'évaluation des erreurs de prédictions entre autre (erreur standard, R<sup>2</sup> ajusté).

Pour évaluer le lien entre l'albédo calculé *in situ* et l'albédo satellitaire compilé sur GEE, le coefficient de corrélation de Pearson a été calculé en utilisant la librairie (Pingouin). De plus, la RMSE entre les valeurs prédites et les valeurs observées par régression linéaire a été calculée selon l'Equation 4.6.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (4.6)$$

**Les données satellitaires ont été traitées directement dans l'interface de Google Earth Engine.**

La méthode des réducteurs *ee.reducer()* sur GEE est utilisée pour agréger les données dans le temps, l'espace, les bandes, les tableaux et d'autres structures de données. Les réducteurs utilisent un ensemble de données d'entrées et fournissent une sortie unique suivant la spécification demandée sur la façon d'agréger les données.

Pour obtenir les statistiques sur les valeurs de pixels de Sentinel-2 sur la parcelle d'étude, nous avons utilisé *image.reduceRegion()*. La région est représentée par une géométrie qui est le polygone de la parcelle. La moyenne, la médiane et l'écart type des albédos satellitaires ont été obtenus en utilisant *ee.reducer(mean)*, *ee.reducer(median)* et *ee.reducer(stdDev)* respectivement.

# 5 | Résultats

## 5.1 Évolution temporelle des facteurs pédoclimatiques

Trois variables pédoclimatiques ont été étudiées à Lonzée (Figure 5.1). Durant ces 1464 jours, la teneur en eau à 5 cm par jour a varié en moyenne entre 0,1 et 0,47 m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup>. La valeur instantanée minimale de 0,1 m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup> a été observée en mai 2017. Durant la période de moutarde 2017, la teneur en eau était comprise entre 0,35 et 0,47 m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup>. Par contre, elle était plus faible pour l'avoine/féverole en 2019 (0,22 et 0,39 m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup>). Du 08/11/2017 au 22/05/2018, il a été remarqué une absence de données de teneur en eau qui inclut la période de sol nu. L'indice de clarté (Kt), quant à lui, était compris entre 0,1 et 0,75 sur l'ensemble de la période d'étude. Avec une période très couverte en janvier 2018 où les valeurs étaient comprises entre 0,1 et 0,4, le rayonnement solaire incident a évolué de manière semblable avec plus de 800 W.m<sup>-2</sup> pour les mois d'été et des valeurs descendantes jusqu'à 20 W.m<sup>-2</sup> en hiver.

## 5.2 Évolution temporelle de l'albédo *In Situ*

### 5.2.1 Données récentes

Au cours des 4 années étudiées, l'albédo hors périodes de couverture neigeuse sur la parcelle d'étude a varié de 0,03 à 0,3 (Figure 5.2). Sur sol nu, l'albédo est faible et se situe entre 0,05 et 0,15. Par contre, en présence de culture, il est plus important et est compris entre 0,1 et 0,3. Pour les cultures, la dynamique de l'albédo suit la croissance progressive de la végétation provoquant une couverture évolutive du sol initialement nu. Le mélange avoine/féverole a un albédo compris entre 0,14 et 0,26. C'est-à-dire une moyenne de 0,19 ± 0,02. Bien que la moyenne de celui de la moutarde qui est compris entre 0,11 et 0,24 (moyenne 0,17 ± 0,03) soit plus élevée, la variabilité est trop grande pour établir une quelconque différence. Pour ce qui est des sols nus, le sol déchaumé présente des valeurs d'albédos supérieures à celles du sol labouré.

## CHAPITRE 5. RÉSULTATS

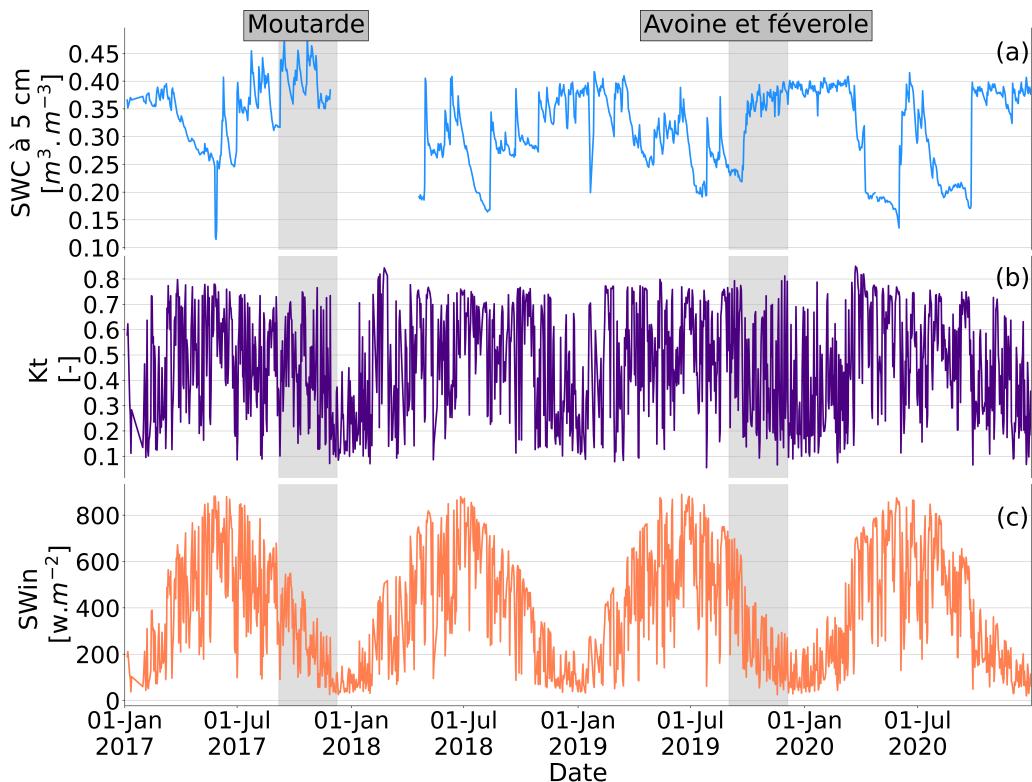


FIGURE 5.1 – Évolution temporelle de (a) la teneur en eau du sol (SWC), (b) l'indice de clarté,(c) le rayonnement solaire incident ( $SW_{in}$ ) à Lonzée . Le SWC,  $K_t$  et  $SW_{in}$  sont des moyennes journalières de 10h à 14h entre le 1 janvier 2017 et le 31 décembre 2020. Les périodes en gris correspondent aux CI.

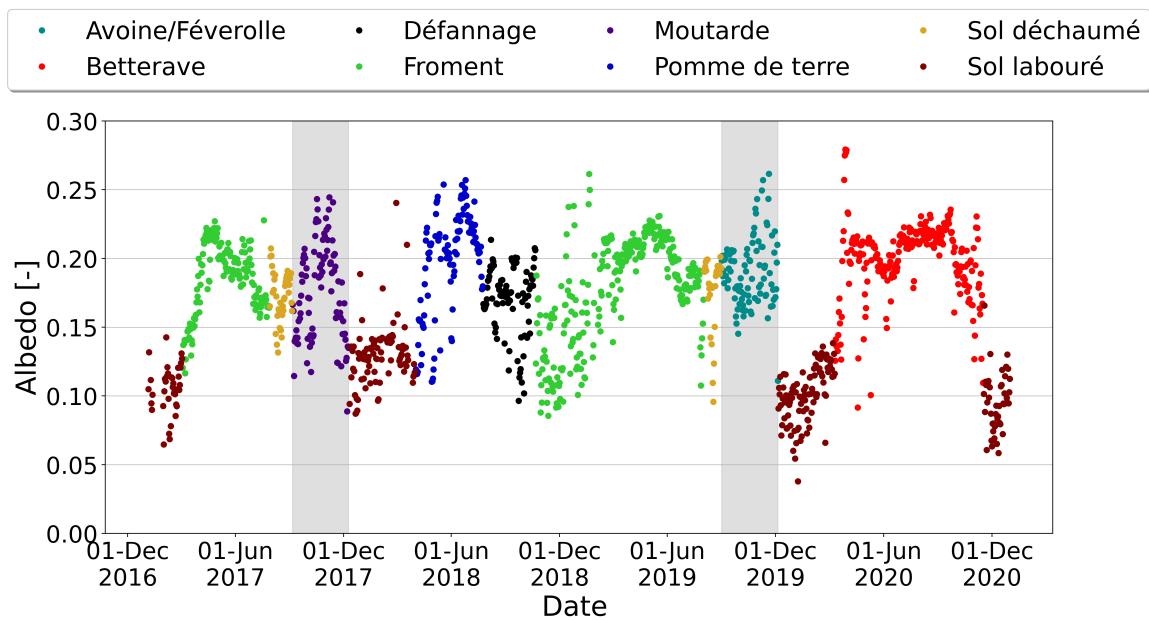


FIGURE 5.2 – Évolution temporelle des valeurs moyennes journalières (entre 10h et 14h) de l'albédo *in situ*. Les périodes en gris correspondent aux CI.

## CHAPITRE 5. RÉSULTATS

### 5.2.2 Données historiques

Durant les trois années (2005, 2007 et 2011) sans CI à Lonzée, les valeurs d'albédo sont comprises entre 0,05 et 0,25 (Figure 5.3). L'albédo du sol après labour de l'année 2005 sur l'étendue de la parcelle d'étude est caractérisé par une forte variabilité spatio-temporelle contrairement aux années 2007 et 2011. En 2011, la période entre le déchaumage et le labour a commencé plus tôt et n'a duré que 2 mois.

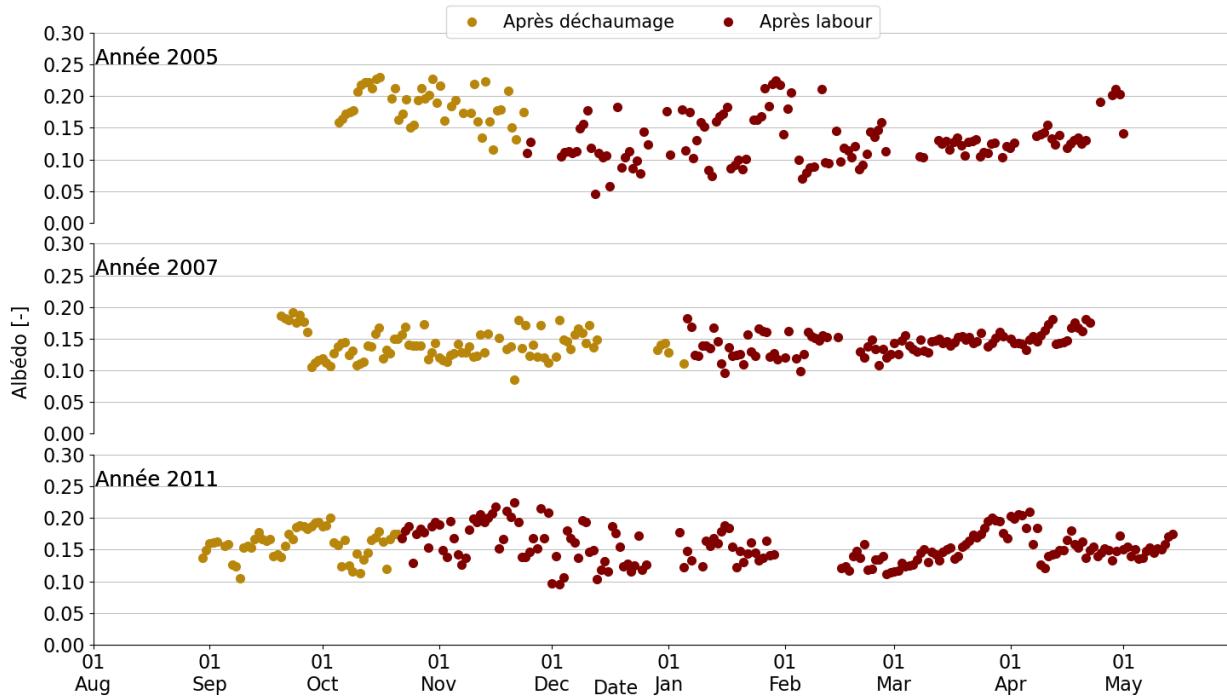


FIGURE 5.3 – Évolution temporelle de l'albédo pour des années sans CI à Lonzée. Les données représentées ici correspondent aux valeurs moyennes journalières entre 10h et 14h, hors couverture neigeuse.

## 5.3 Modélisation de l'albédo de référence

### 5.3.1 Relation entre l'albédo et ses variables explicatives

Dans le cadre de l'approche 1 (4.2.1), l'albédo de référence (sol nu) a été modélisé en fonction des variables environnementales directrices identifiées, pour les deux états de surface (après déchaumage et après labour). Les paramètres expliquant la variabilité de l'albédo sont : (1) La teneur en eau du sol à 5cm (SWC); (2) l'indice de clarté. La teneur en eau du sol à 5cm (SWC) ("données non présentées") était la variable qui expliquait le mieux l'albédo de la stratégie 1. Une corrélation a été réalisée avec la première variable explicative (SWC à

5cm) et les résidus de cette régression ont été corrélés à la 2ème variable explicative qui est l'indice de clarté. Durant les périodes après déchaumage (voir Figure 5.4) et après labour (voir Figure 5.5).

**Construction du modèle pour l'état du sol après déchaumage** La période après déchaumage fait référence aux données en jaune sur la Figure 5.2 (pour les années récentes) et Figure 5.3 (pour les années historiques). Les relations obtenues pour la stratégie 1 ont été établies (Figure 5.4 a et b). Pour les données 2017-2020, la plage de SWC couverte est trop restreinte pour permettre d'établir une régression robuste ( $R^2 = 0,01$ ). La stratégie 2 (paramétrisation spécifique au moyen de données avant 2017) donne des résultats plus convaincants grâce à une plus large gamme de SWC couverte (Figure 5.4 c, coefficients de détermination de 0,48). Une décroissance de l'albédo avec l'augmentation de la teneur en eau à 5 cm est alors observée. Enfin, pour les deux stratégies, les relations entre les résidus de l'albédo vs SWC et l'indice de clarté sont assez bien établies (Figure 5.4 b et d avec  $R^2 = 0,32$  et 0,31).

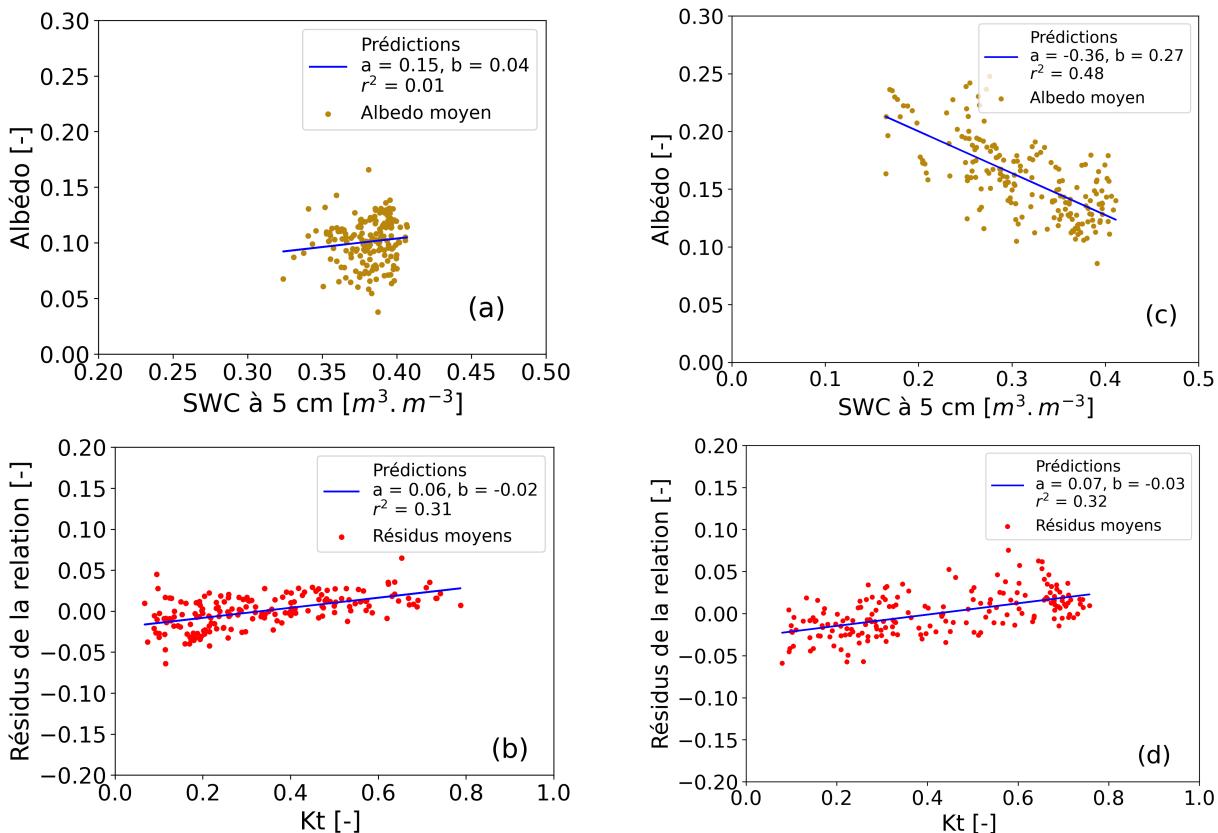


FIGURE 5.4 – Relation après déchaumage entre l'albédo et la teneur en eau à 5 cm pour les données récentes (a) et historiques (c) et entre les résidus de la relation et l'indice de clarté pour les données récentes(b) et historiques (d). Les données historiques correspondent à la moyenne des années (2005, 2007 et 2011), tandis que les données récentes renvoient à la moyenne des années de 2017 à 2020.

## CHAPITRE 5. RÉSULTATS

**Construction du modèle pour l'état du sol après labour** La gamme de teneurs en eau de la stratégie 1 ( $0,25 \text{ à } 0,45 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ) est réduite par rapport à celle de la stratégie 2 ( $0,25 \text{ à } 0,45 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ) (Figure 5.5 a et c). Par contre, le meilleur  $R^2$  (0,13) est obtenu pour la stratégie 1. En outre, la relation entre les résidus et l'indice de clarté était quasiment identique avec des  $R^2$  de 0,22 et 0,24 pour les deux stratégies.

De plus, la valeur du biais entre les données d'albédos provenant du data set historique et celles récentes a été chiffré à 0,018. Il s'agit ainsi de la différence entre les valeurs d'albédos issus des deux data sets.

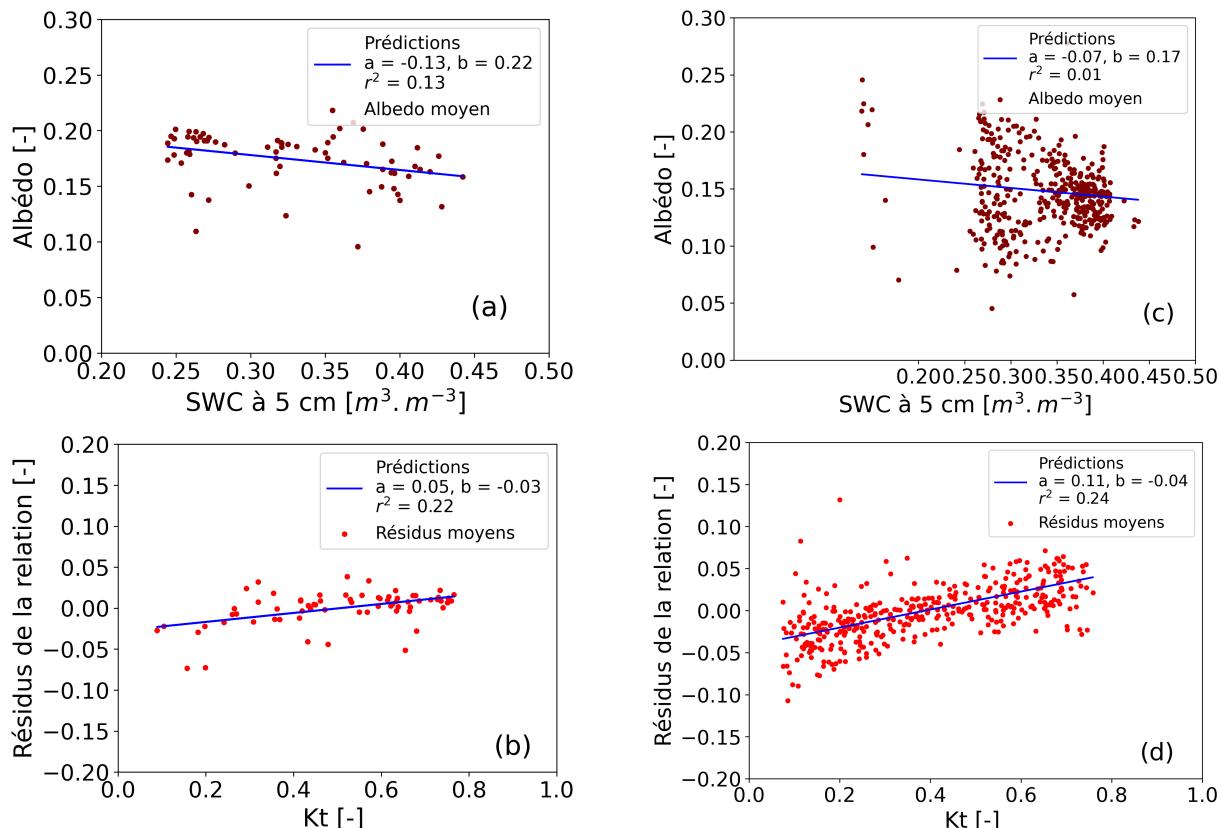


FIGURE 5.5 – Idem que la Figure 5.4, pour les périodes après labour.

### 5.3.2 Application du modèle aux scénarios

Au vu des résultats confirmant l'influence prépondérante de SWC ainsi que l'indice de clarté sur l'albédo du sol nu, un modèle de régression linéaire multiple pour prédire l'albédo des deux états de sols nus des scénarios de 2017 et de 2019 a été réalisé. Les résultats sont repris dans la Table 5.1.

La dépendance à la teneur en eau à une pente négative pour tous les états du sol nu sauf pour le sol après déchaumage du scénario de 2017. Autrement dit, au plus un sol est humide, au plus l'albedo est faible. A contrario, la dépendance à l'indice de clarté est positive, donc au plus le ciel est clair, au plus l'albédo est important pour ces mêmes modalités.

**TABLE 5.1 – Modèle de régression linéaire multiple pour obtention de l'albedo sur sol nu, avec coefficients obtenus pour les stratégies 1 et 2.**  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  et  $\beta_2$  correspondent à l'interception de la droite de régression et les pentes des variables directrices respectivement. De plus l'abréviation D= déchaumage et L=labour.

	Équations de la forme			Paramètres de performance de la régression						
	$\alpha_{Ref} = \beta_0 + (\beta_1 * SWC) + (\beta_2 * Kt)$	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	État de la parcelle	R <sup>2</sup>	RMSE	Erreur Absolue		
<b>Stratégie 1</b>	-0.0487	0.0033	0.0653	0.0603	D <sub>2017</sub>	0.3343	0.0741	0.0667		
	0.1698	-0.0007			D <sub>2019</sub>	0.3343	0.074	0.1006		
	0.2217	-0.0029	0.0729	0.1084	L <sub>2017</sub>	0.3351	0.0101	0.0065		
	0.1164	-0.0003			L <sub>2019</sub>	0.3351	0.0422	0.0367		
<b>Stratégie 2</b>	0.2217	-0.0029			D <sub>2017</sub>	0.6569	0.0561	0.0485		
					D <sub>2019</sub>	0.6569	0.0561	0.0189		
	0.1164	-0.0003			L <sub>2017</sub>	0.2510	0.0129	0.0109		
					L <sub>2019</sub>	0.2510	0.0531	0.0502		

Le modèle a été évalué à l'aide de trois paramètres statistiques à savoir : le coefficient de détermination (R<sup>2</sup>), l'erreur absolue et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) (Table 5.1). La stratégie 2 sur sol après déchaumage est celle avec le meilleur R<sup>2</sup>. Qui plus est, c'est celle avec l'erreur absolue la plus petite (0,0065). Le scénario de 2017 sur sol après labour de la stratégie 1 est celui avec la plus petite valeur de RMSE (0,0101), nous pouvons penser que c'est donc le modèle le plus performant.

Pour la suite du travail, les résultats obtenus pour les deux stratégies vont être retenus et comparés dans la Section 6.2.

## CHAPITRE 5. RÉSULTATS

### 5.4 Albédo satellitaire de référence

#### 5.4.1 Evolution temporelle des albédos satellitaires

La moyenne d’albédo GEE ( $0,19 \pm 0,05$ ) est légèrement supérieure à celle de l’albédo *in situ* ( $0,17 \pm 0,04$ ). La variabilité temporelle a montré des tendances de saisonnalités similaires entre les deux albédos (Figure 5.6). La fréquence d’albédo GEE est très faible, sur les 484 images obtenues avec Sentinel-2 sur la zone d’étude, seulement 100 étaient exploitables après filtrage des nuages et des ombres. L’albédo GEE et l’albédo *in situ* se comparent assez bien, même s’il faut noter un décalage important en septembre 2019, après l’implantation du mélange avoine/féverole. Le même décalage était présent lorsque l’évolution temporelle a été établie avec le satellite Landsat pour comparaison dans l’Annexe .9.

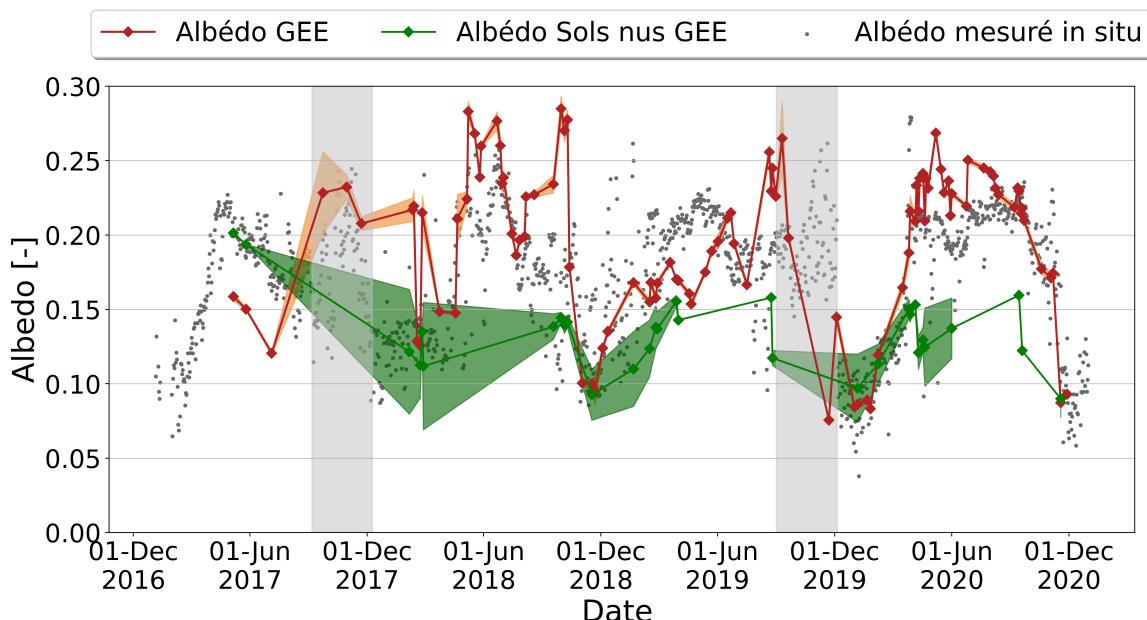


FIGURE 5.6 – Relation entre l’albédo *in situ* et les albédos satellitaires (GEE et Sols nus GEE) dans le temps. L’évolution temporelle calculée sur GEE des albédos satellitaires sur la zone d’étude (rouge), sur les sols nus environnants (vert), comparée à l’albédo mesuré *in situ* (gris). Les lignes et les aires colorées représentent respectivement l’albédo moyen et l’erreur standard qui y est associée. Les périodes en gris correspondent aux CI.

Une comparaison directe de l’albédo GEE et *in situ* montre une assez bonne relation (Figure 5.7), avec un RMSE de 0,04 et un coefficient de corrélation de 0,66. Une surestimation de l’albédo satellitaire est malgré tout visible au-delà de 0.2.

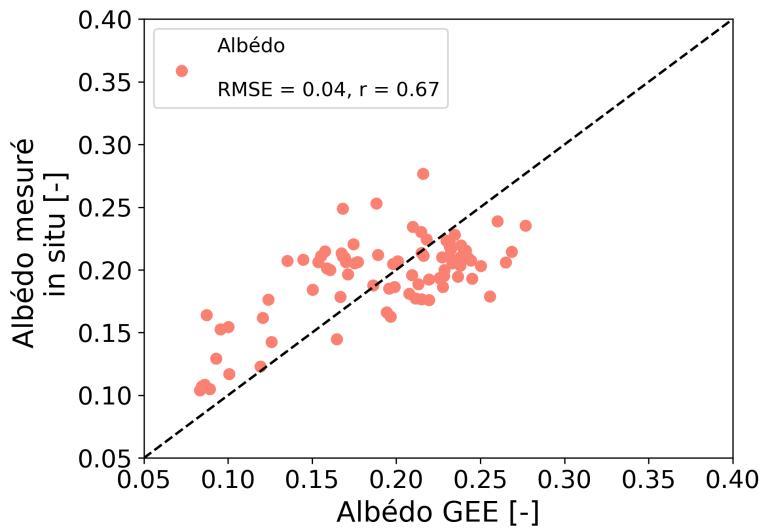
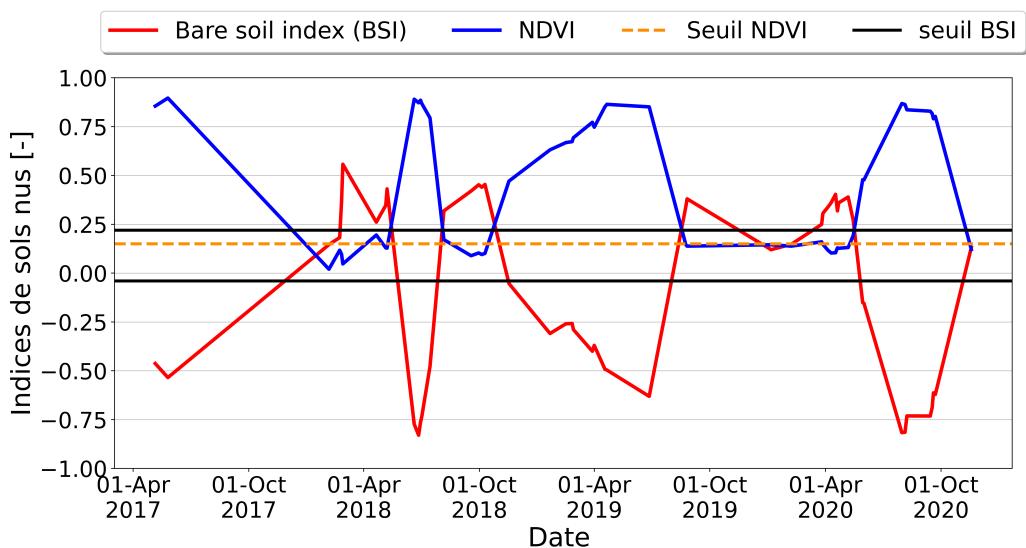


FIGURE 5.7 – Relation entre l’albédo in situ et albédo GEE.

#### 5.4.2 Indices de sols nus

Pour déterminer les parcelles de sol nu environnantes sur lesquelles l’albédo de référence a été calculé, les indices de sols nus BSI et du NDVI ont été utilisés. Avec ces deux variables inversement corrélées, il est possible de savoir à quel moment le sol est dénudé, à quelle fréquence et pendant quelle durée. Le BSI et le NDVI ont préalablement été calibrés sur la zone d’étude afin de déterminer les seuils utiles à la sélection des parcelles adjacentes (Figure 5.8).

FIGURE 5.8 – Evolution temporelle des pixels de BSI (rouge) et NDVI (bleu) correspondant à la parcelle d’étude. Les lignes noires correspondent au seuil de  $-0.04 < \text{BSI} > 0.22$  et la ligne orange le seuil de  $\text{NDVI} < 0.15$ . Les images ont été enregistrées entre le 01 jan. 2017 et le 31 déc. 2020.

## CHAPITRE 5. RÉSULTATS

En se référant à la dynamique temporelle des indices de sol nu sur la figure 5.8, nous avons défini deux seuils :  $-0,04 < \text{BSI} > 0,22$  et pour le NDVI  $< 0,15$ . Les pixels Sentinel-2 respectant ces seuils seront considérés comme appartenant aux sols nus. La validation de ces indices s'est fait au moyen du cahier de terrain de la zone d'étude de Lonzée (*cf.* Annexe .7). En faisant l'analogie entre les seuils d'indices de sol nu et cahier de terrain, on obtient les mêmes informations : la zone d'étude est toujours couverte d'avril à octobre (culture de betterave) ou de septembre à août (culture de froment) et est en état de sol nu généralement les mois de janvier et août.

### 5.4.3 Albédo satellitaire des sols nus

La dynamique temporelle des albédos GEE obtenus sur les sols nus environnants varie entre 0,07 et 0,2 avec une moyenne de  $0,13 \pm 0,02$ . Elle est observable sur la courbe en vert de la Figure 5.6. L'albédo GEE sols nus, correspond à la moyenne des valeurs d'albédo des 100 parcelles agricoles témoins sélectionnées qu'il est possible d'observer sur la figure 5.9. Pour le calcul du forçage radiatif satellitaire, les albédos GEE et GEE sols nus seront préalablement interpolés à l'échelle journalière avant d'être utilisés.

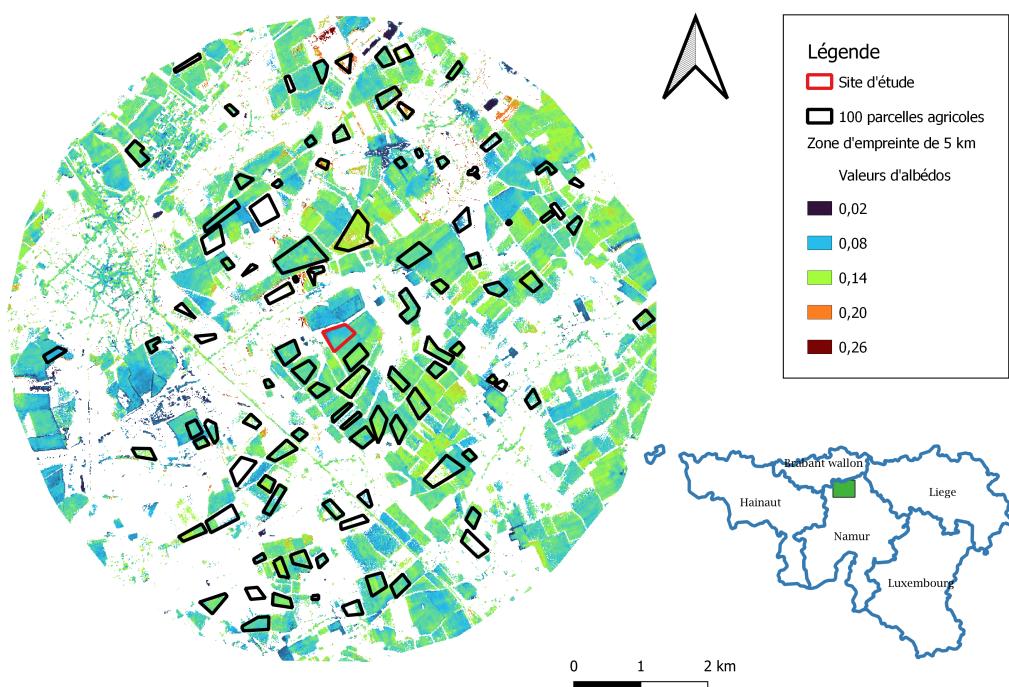


FIGURE 5.9 – Carte des sols nus. Il est possible d'apercevoir sur la figure les sols nus obtenus dans la zone d'empreinte de 5 km autour de la zone d'étude et les parcelles agricoles témoins sélectionnées pour le calcul de l'albédo de référence.

## 5.5 L'effet biophysique albédo

La modélisation de l'albédo sur sol nu au moyen de la teneur en eau à 5 cm et de l'indice de clarté a permis, pendant la période de croissance de la CI, de chiffrer la différence d'albédo qu'il y aurait eu si un sol nu était présent à ce moment. L'évolution journalière du changement d'albédo, ainsi que le  $Rf_{\Delta\alpha}$  sur la parcelle ICOS de Lonzée pour les années 2017 et 2019, sont observables sur les Figures 5.10 et 5.11.

### 5.5.1 Moutarde (scénario de 2017)

En 2017, la moutarde est restée pendant 128 jours sur la parcelle d'étude. Quant à la parcelle de référence, une période de 78 jours s'est écoulée entre le déchaumage et le labour. La période après labour n'a pu être simulée que sur 6 jours suite au défaut technique des sondes de teneur en eau mentionnées à la Section 4.1.1. Par conséquent, très peu de valeurs de forçage radiatif sont disponibles pour cette période-là (Figure 5.10 b et d). Cette absence rend ainsi difficile la détermination de l'impact d'un labour tardif sur le forçage radiatif dans ce travail.

Quelques jours après le semis, une différence très marquée d'albédo a commencé à s'établir entre la moutarde et le sol nu et celle-ci a continué tout au long de la période visible de développement de la moutarde (Figure 5.10 a et c). La différence moyenne d'albédo (l'écart maximal) entre le sol nu et la CI pour la stratégie 1 et 2 après déchaumage étaient de 0,06 et 0,04 (0,13 et 0,09). Les écarts après labour sont logiquement plus faibles, -0,006 et 0,01 (0,001 et 0,02) respectivement (Table 5.2). On notera aussi l'arrivée des pluies qui assombrissent le sol et font périodiquement chuter l'albédo.

L'écart d'albédo engendre un forçage radiatif moyen négatif et important (-9.86,-7.05  $\text{W.m}^{-2}$ ) pour les périodes de déchaumage (stratégie 1 et 2). Pour le labour, le forçage radiatif moyen est faible (0,2 et -0,4  $\text{W.m}^{-2}$ . respectivement pour les stratégies 1 et 2), les surfaces ayant un état proche. En dehors des périodes de développement de la moutarde, il n'y a pas de Rf. (Figure 5.10 b et d).

## CHAPITRE 5. RÉSULTATS

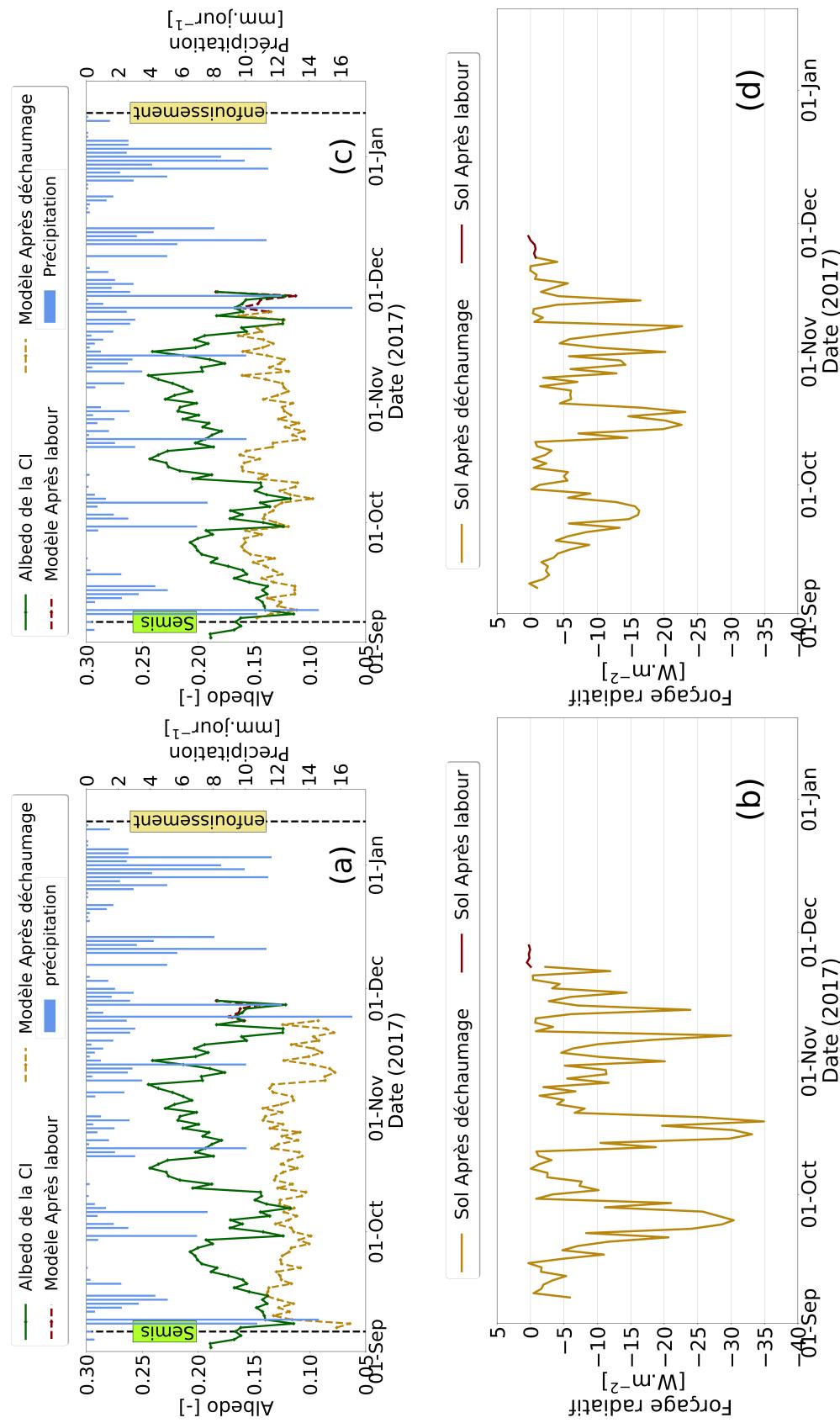


FIGURE 5.10 – Évolution de la variation d’albédo des données récentes (a) et des données historiques (c). La courbe d’albédo de couleur verte est celle correspondante à la moutarde sur la parcelle d’étude de Lonzée; la courbe en jaune celle d’un sol nu après déchaumage; et en marron celle d’un sol nu après labour sur la parcelle de référence; Évolution du forçage radiatif obtenu avec des données récentes (b) et des données historiques (d). Il s’agit du Rf induit par le couvert de moutarde par rapport au sol nu.

## CHAPITRE 5. RÉSULTATS

TABLE 5.2 – Variations, écart maximal d’albédo et forçage radiatif des scénarios de 2017 et 2019.  
Avec (D) correspondant à l’état de sol après déchaumage et (L) l’état de sol après labour.

	Scénario de 2017				Scénario de 2019			
	Stratégie 1		Stratégie 2		Stratégie 1		Stratégie 2	
	D <sub>2017</sub>	L <sub>2017</sub>	D <sub>2017</sub>	L <sub>2017</sub>	D <sub>2019</sub>	L <sub>2019</sub>	D <sub>2019</sub>	L <sub>2019</sub>
R <sub>f</sub> moyen W.m <sup>-2</sup>	-9.86 ±9.7	0.2 ±0.2	-7.05 ±6.52	-0.4 ±0.44	-25.71 ±21.44	-4.71 ±5.4	-0.011 ±4.61	-5.4 ±5.42
Δαmoyen	0.06 ±0.03	-0.006 ±0.008	0.04 ±0.02	0.01 ±0.01	0.1 ±0.02	0.03 ±0.02	0.01 ±0.02	0.05 ±0.02
Δαmax	0.13	0.001	0.09	0.02	0.15	0.12	0.07	0.12

### 5.5.2 Avoine/féverole (scénario de 2019)

En 2019, le mélange avoine/féverole est resté durant 119 jours sur la parcelle d’étude. Cependant, la parcelle de référence est restée 74 jours en état de sol nu après déchaumage et 45 jours en état de sol après labour.

Le mélange avoine/féverole a montré de faibles valeurs d’albédos plusieurs semaines après son semis. Par la suite les valeurs ont augmenté en fonction du stade de développement (voir Figure 5.11 a et c). De plus, avant le semis, l’albédo de la CI était assez élevé car le sol déchaumé contenait des résidus de paille qui tendent à augmenter l’albédo. Par contre, après destruction et enfouissement de la CI, on a observé une chute brusque de l’albédo provoqué par le labour et l’enfouissement de la CI. La différence moyenne d’albédo (l’écart maximal) entre le sol nu et la CI pour la stratégie 1 et 2 après déchaumage étaient de 0,1 et 0,01 (0,15 et 0,07). Les écarts après labour sont de 0,03 et 0,05 (0,12 pour les deux stratégies) respectivement (Table 5.2). Entre le 15 août et le 20 septembre, la diminution des pluies a contribué à l’augmentation de l’albédo de la CI pendant la période après déchaumage. Une différence d’albédo très importante a été constatée pour l’état du sol après déchaumage de la stratégie 1 (voir Figure 5.11 a). Par contre, dans les mêmes conditions, cette différence était absente pour la stratégie 2, bien que l’on se situe dans une période où la CI n’est pas encore bien développée et donc plus sensible (voir Figure 5.11 c).

L’écart d’albédo engendre un forçage radiatif moyen négatif et important (-25,75 et -0,011 W.m<sup>-2</sup>) pour les périodes de déchaumage (stratégie 1 et 2). Pour le labour, le forçage radiatif moyen est faible (-4,71 et -5,4 W.m<sup>-2</sup>). Respectivement pour les stratégies 1 et 2), avec un état proche des surfaces. En dehors des périodes de développement du mélange avoine/féverole, le R<sub>f</sub> est nul (Figure 5.11 b et d).

## CHAPITRE 5. RÉSULTATS

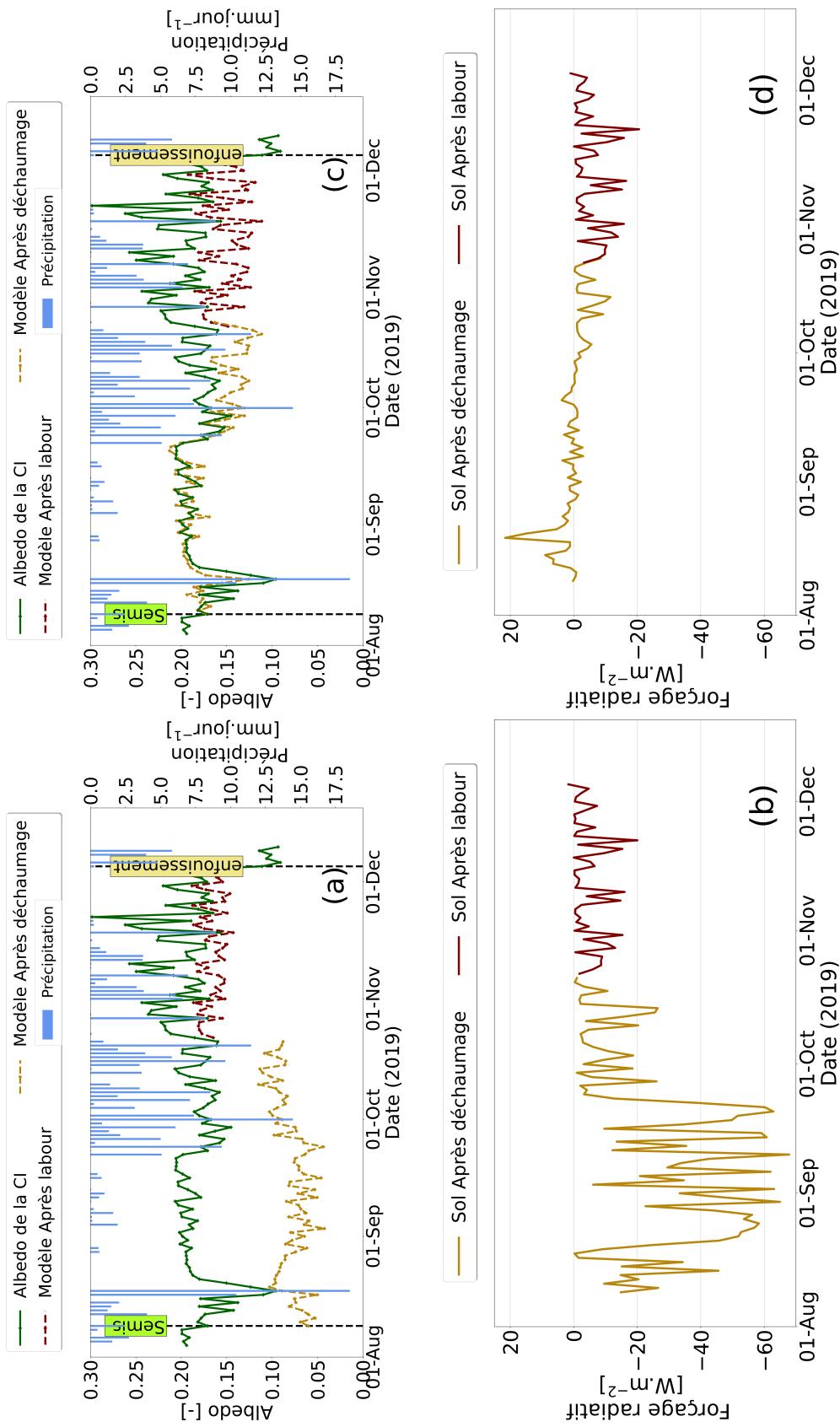
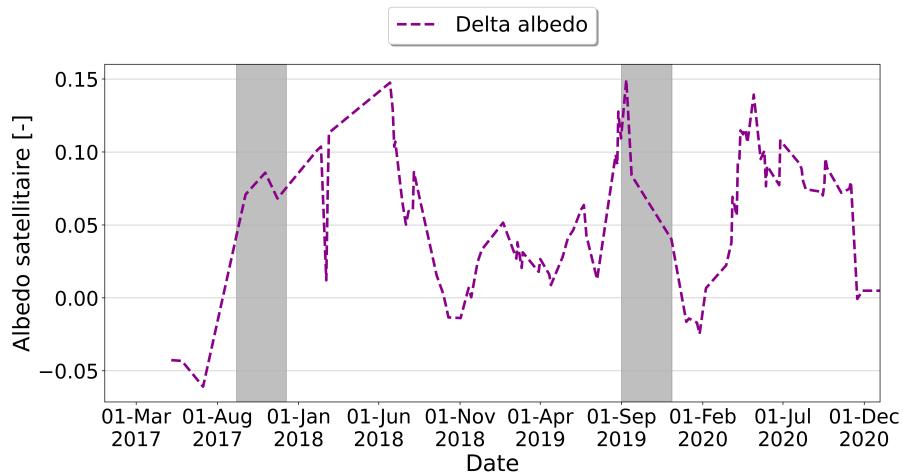


FIGURE 5.11 – Idem que la Figure 5.10, à la seule différence que la CI est de l'avoine/féverole.

### 5.5.3 Approche satellitaire

Les albédos GEE et sols nus GEE (Figure 5.6) ont permis de calculer la variation d’albédo ( $\Delta\alpha$ ) satellitaire durant toute la période d’étude. Pour combler l’absence de données très marquées dans la série temporelle d’albédos satellitaires, une interpolation linéaire a été faite. Le changement d’albédo était compris dans l’intervalle -0,048 et 0,15) avec une valeur moyenne de  $0,05 \pm 0,04$  (Figure 5.12).



**FIGURE 5.12 – Variation d’albédo satellitaire sur la zone d’étude.** Les périodes en gris correspondent aux CI.

Le forçage radiatif induit par le changement d’albédo obtenu au moyen de Sentinel-2 pendant les périodes d’interculturels de 2017 et 2019 est visible sur la Figure 5.13. En 2017, pour la CI moutarde, le forçage radiatif induit par la moutarde a varié entre  $-29,92 \text{ W.m}^{-2}$  et  $-0,12 \text{ W.m}^{-2}$  avec une valeur moyenne de  $-7,34 \pm 7,65 \text{ W.m}^{-2}$ . Par contre, lors du mélange avoine / féverole en 2019, il était situé entre  $-82,82$  et  $-0,08 \text{ W.m}^{-2}$  avec une valeur moyenne de  $-17,55 \pm 19,72 \text{ W.m}^{-2}$ . La présence de nuages a contribué à cette absence de données entre le 08 et le 12 décembre 2017.

## CHAPITRE 5. RÉSULTATS

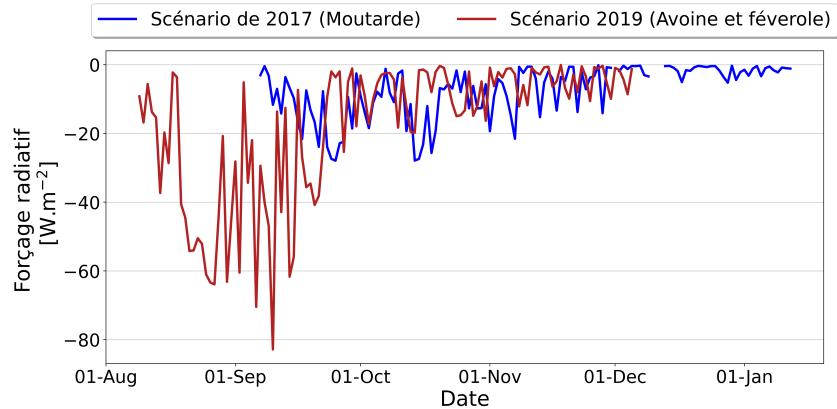


FIGURE 5.13 – Forçage radiatif satellitaire pendant les scénarios de 2017 et 2019.

## 5.6 Conversion en équivalent $CO_2$

Seuls les forçages radiatifs obtenus avec l’albédo de référence issu de la modélisation des données historiques (scénario de 2019) ont été convertis en équivalent  $CO_2$ . Ce choix sera discuté dans la Section 6.2. Les méthodes de conversion utilisées sont décrites dans la Section 3.4.2 et le scénario envisagé est celui détaillé dans la Section 4.1.2.

### Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité a été réalisée entre le forçage radiatif de la stratégie 2 du scénario de 2019 et la variation d’albédo associée (Figure 5.14). Pour des valeurs de  $\Delta\alpha$  négatives, le forçage radiatif prend des valeurs positives, c’est-à-dire que le système se réchauffe au lieu de refroidir. La majeure partie des  $Rf$  ( $0$  à  $-20 \text{ W.m}^{-2}$ ) sont obtenus pour des variations d’albédos situées entre  $0$  et  $0,06$ . Aucune valeur de forçage radiatif n’a été observée au delà d’une variation d’albédo de  $0,1$ .

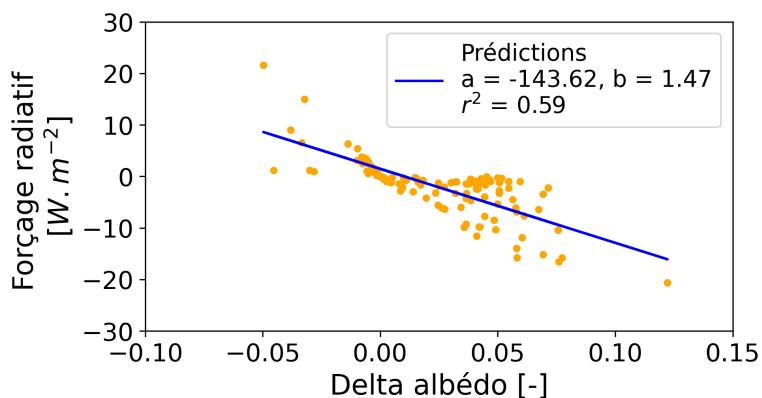


FIGURE 5.14 – Relation entre le forçage radiatif et la variation d’albédo.

## Conversion au moyen de TDEE et GWP

Pour évaluer les effets climatiques à long terme des changements d’albédos (Figure 5.15 a), le forçage radiatif induit a été converti en équivalent  $CO_2$  aux moyens de deux métriques (TDEE et GWP) dépendantes du temps, en considérant que l’introduction de la culture intermédiaire se faisait une année sur deux. Sur un horizon temporel de 100 ans, le TDEE et le GWP ont été déterminés au moyen du forçage radiatif global (voir Figure 5.15 b) d’une unité de surface ( $1\text{ m}^2$ ).

La variation annuelle du TDEE en équivalent  $CO_2$  est visible sur la Figure 5.16 a. Sa dynamique est similaire à celle d’une émission pulsée de  $CO_2$ . Lors de la première année elle est de  $-0,75\text{ kgCO}_2\text{-eq. m}^{-2}\text{an}^{-1}$ , puis chute à  $-0,09\text{ kgCO}_2\text{-eq. m}^{-2}\text{an}^{-1}$  l’année suivante avant de diminuer progressivement pour se rapprocher de la valeur de 0. La grande chute du TDEE de la première à la deuxième année et la lente diminution par la suite sont liées aux variations annuelles du  $CO_2$  restant dans l’atmosphère pour une émission pulsée de  $CO_2$ .

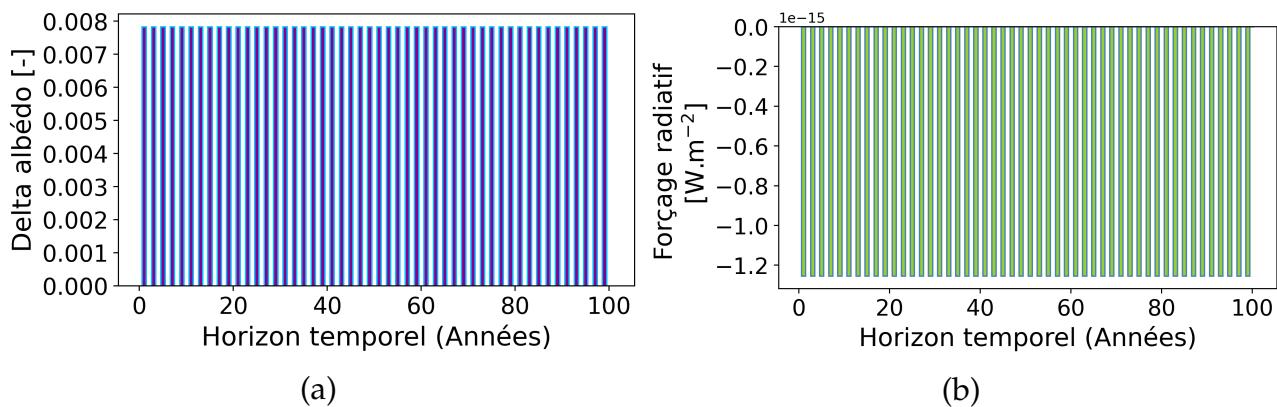


FIGURE 5.15 – Le changement interannuel de l’albédo moyen (a) et le forçage radiatif global instantané moyen annuel (b).

Dans le cas d’un changement d’occupation du sol sur une unité de surface, la variation d’albédo provoquera un forçage radiatif qui s’accumule au fil du temps dans la même direction que la première année. Pour évaluer l’effet intégré, et donc l’ampleur relative des impacts potentiels sur les changements climatiques dans le temps, les valeurs de TDEE ont été cumulées de la première à la 100 ème année (Figure 5.16). L’ampleur de l’équivalent  $CO_2$  cumulée sur une période de 100 ans serait environ 4 fois celle de la première année. Les Figures 5.11 d et 5.16 a sont donc similaires du point de vue de l’information, elles diffèrent cependant au niveau des unités et des horizons temporels. Le remplacement du sol nu par un mélange avoine/féverole sur une unité de surface pendant une période d’inter-culture à Lonzée induit un prélèvement d’équivalent  $CO_2$  cumulatif d’environ  $2.8\text{ kgCO}_2\text{-eq. m}^{-2}$  en 100 ans.

## CHAPITRE 5. RÉSULTATS

La  $\sum$  TDEE a été comparé au GWP (Figure 5.16). Au cours de la première année suivant le changement, la valeur de GWP était identique à celle de la  $\sum$  TDEE. Mais à partir de la dixième année, des différences ont commencé à être constatées entre les deux valeurs. Au bout de la 100e année, la valeur de TDEE cumulée ( $-2.8 \text{ kgCO}_2\text{-eq.m}^{-2}$ ) était 55 % plus grande que celle de GWP ( $-1.8 \text{ kgCO}_2\text{-eq. m}^{-2}$ ).

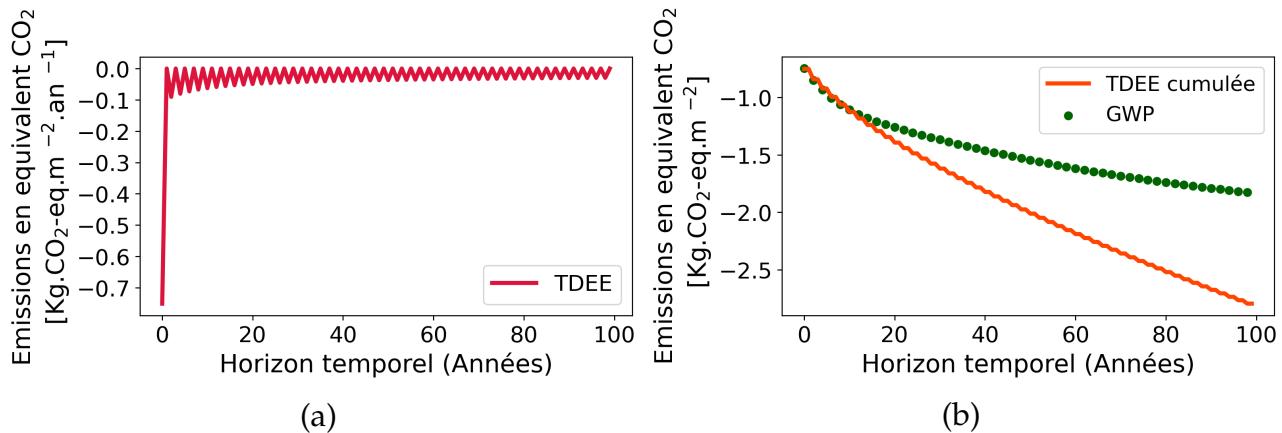


FIGURE 5.16 – TDEE : Time Dependent Equivalent Emission (a) ; GWP : Global Warming Potentiel (b).  $\sum$ TDEE : Somme cumulée de TDEE.

Dans un souci de conformité, il peut être pratique de convertir cette dernière unité ( $\text{kgCO}_2\text{-eq.m}^{-2}$ ) en  $\text{tC eq.ha}^{-1}$ , couramment utilisée pour chiffrer des séquestrations/sources. Pour cela :  $1 \text{ kgCO}_2\text{-eq.m}^{-2} = 12/44 \text{ kgCO}_2\text{-eq.m}^{-2} = (10000/1000)*(12/44) \text{ t C.ha}^{-1} = 2.7 \text{ t C.eq.ha}^{-1}$ .

Au final, sur 100 ans en utilisant la TDEE, Lonzée pourrait permettre la séquestration de  $0.76 \text{ kg CO}_2\text{-eq.m}^{-2}$  donc  $7.6 \text{ t C.ha}^{-1}$ .



# 6 | Discussion

## 6.1 Intégration de l'effet biophysique albédo au bilan carbone de Lonzée

Dans un scénario où le mélange avoine/féverole serait introduit à Lonzée comme culture intermédiaire une année sur deux pendant 100 ans, on peut observer que la somme cumulée de TDEE induit un prélèvement de  $CO_2$  équivalent supérieur à celle de GWP, respectivement de (-2,8 kg $CO_2$ -eq.m $^{-2}$  et de -1,8 kg $CO_2$ -eq.m $^{-2}$ ). Selon [Bright et al. \(2016\)](#), ces deux grandeurs accumulées ont des définitions et des interprétations différentes, il reste difficile de conclure qu'une est plus correcte que l'autre. En effet, GWP compare le forçage radiatif d'une émission unique de  $CO_2$  au temps initial, par contre avec la TDEE, le forçage radiatif est assimilé à un ensemble cumulé d'émissions de  $CO_2$ . Toutefois, entre les deux mesures, la TDEE reste la plus significative et la plus facile à comparer en termes de stockage de carbone dans le sol sous forme d'équivalent de  $CO_2$  de carbone. À Lonzée, [Buyssse et al. \(2017\)](#) ont établi le bilan carbone de la parcelle de culture pour la période comprise entre 2004 à 2016. L'échelle temporelle considérée correspondait à trois rotations de quatre ans avec chaque fois des cultures intermédiaires. En considérant les facteurs climatiques et les pratiques de gestion agricoles, des mesures continues par covariance de turbulence et des échantillonnages réguliers de la biomasse ont été effectués. Au terme de ces 12 années, le bilan de la parcelle était une perte de 1 tC.ha $^{-1}$ . Si sur une échelle de 100 ans où on fait l'hypothèse que rien ne change, cela correspondrait à 8,3 tC.ha $^{-1}$ .

En considérant que les rotations à Lonzée restent raisonnablement stables dans le temps, on pourrait apporter un regard complémentaire au bilan carbone déjà établi sur la parcelle. En comparant la valeur obtenue par [Buyssse et al. \(2017\)](#) au 7.6 tC.ha $^{-1}$  obtenu dans notre étude, on pourrait penser qu'au terme de la 100 ème année, les effets radiatifs de l'albédo auront presque neutralisé le bilan carbone à Lonzée. Si on convertit également en tC.ha $^{-1}$  les chiffres avancés par [Liu et al. \(2022\)](#), on obtient une valeur assez proche (9,7 tC.ha $^{-1}$ ) de la nôtre. Il semblerait que le changement d'albédo améliore significativement le bilan carbone de la rotation.

Les points de discussions qui suivent permettent de nuancer ce résultat, de discuter de la méthodologie appliquée pour le calcul du forçage radiatif (choix de formule, présence de biais) et de critiquer le ( $\alpha_{\text{Ref}}$ ) obtenu au moyen de l'approche 1 et 2 (modélisation et satellitaire).

## 6.2 Forçage radiatif

Les forçages radiatifs de la moutarde et de l'avoine/féverole ont été calculés au moyen des stratégies 1 et 2, les résultats sont disponibles dans la Table 5.2. Les valeurs sont dans le même ordre de grandeur que celles obtenues en présence d'un dispositif expérimental pairé (sol nu/CI) sur les sites ICOS de Lamasquère et Auradé par (Ceschia *et al.*, 2017). Les dynamiques des albédos de CI et de référence se suivent assez bien. Les albédos de références modélisés sont dans l'ensemble inférieurs à ceux des CI. Ceci serait dû non seulement au fait que la culture apporte une surface plus claire à la parcelle (Carrer *et al.*, 2018), mais également la preuve que les deux variables principales introduite dans le modèle de régression multilinéaire ont bien été choisies pour notre site. La différence de valeur du  $\Delta\alpha$  s'est répercutee sur la dynamique de Rf. Le problème technique rencontré avec les sondes de teneurs en eau a causé l'absence de données pour l'état de sol après labour, et donc l'impossibilité de tester l'impact d'un labour précoce ou tardif sur le Rf. Les fortes incertitudes rencontrées sur les données satellitaires (Section 5.5.3) ont conduit au calcul d'un Rf satellitaire non exploitable pour notre cas d'étude.

En 2017, pour les stratégies 1 et 2, l'écart maximal entre la moutarde et l'état de sol après déchaumage (0.06 et -0.006) était plus grand que celui pour le sol après labour (0.04 et 0.01). L'existence du biais technique lié à la position des instruments de mesure au fil des années pourrait en être la cause. La moutarde a montré un développement plus rapide et, dès les premières semaines, des différences claires étaient visibles (Figure 5.10 a et c). Effectivement, la moutarde lève aisément et montre une croissance rapide (Destain *et al.*, 2010).

En 2019, le mélange avoine /féverole a commencé à montrer une différence avec le sol nu deux mois après le semis (Figure 5.11 c) provoquant ainsi des valeurs positives de Rf. Lorsque l'albédo du sol nu est supérieur à celui de la CI, il est possible d'avoir un forçage radiatif positif comme c'était le cas lors du scénario de 2019 pour une partie de l'état du sol après déchaumage de la stratégie 2. Cette situation qui ne se présente que dans des cas extrêmes (absence de précipitations ici) induit un réchauffement et pourrait compenser ou dépasser l'effet séquestration de carbone de cette même culture (Ceschia *et al.*, 2017).

## CHAPITRE 6. DISCUSSION

Lorsque les stratégies 1 et 2 ont été appliquées au mélange avoine féverole, la variation temporelle d’albédo s’est montrée très différente sur les sols déchaumés (Figure 5.11 a etc.). Une piste d’explication serait que l’absence de précipitations, ce qui a entraîné une dispersion de l’albédo. En effet, les données récentes de la stratégie 1, lors de la construction du modèle après déchaumage, ont montré une forte variabilité de l’albédo pour des faibles teneurs en eau ne permettant pas ainsi d’établir une régression robuste (Figure 5.4 a).

Le forçage radiatif présenté dans ce travail est calculé comme décrit dans la Section 3.4.1. Cette formule a été utilisée pour des études qui se sont déroulées dans des conditions semblables aux nôtres (étude au niveau local sur un site ICOS) ([Ceschia et al., 2017](#)). L’avantage de son utilisation est qu’elle permet la comparaison avec d’autres valeurs de la littérature. Cependant, un article très récent de [Bright et Lund \(2021\)](#) présente une formule de forçage radiatif proportionnelle à la racine carrée de la transmittance atmosphérique. Le facteur qui vient de la racine va se rajouter et aura comme effet de doubler la valeur du Rf et l’effet supposé sur la TDEE sera en faveur du changement d’albedo induit par la CI. Dans notre étude, nous ne l’avons pas appliqué par manque de temps et de compréhension de cet ajout. Il serait intéressant d’investiguer cette piste dans le futur en comprenant mieux l’origine conceptuelle et les mécanismes considérés.

### 6.3 Détermination de $\alpha_{\text{Ref}}$ du modèle

Le sol nu considéré dans la construction du modèle de l’albédo de référence se distinguait en état de sol après déchaumage et en état de sol après labour. En effet, la principale contrainte vient du fait que les terres cultivées ne sont nues que pendant la période qui suit la récolte ou le travail primaire du sol peu de temps après le semis ([Mzid et al., 2021](#)). Deux lots de données (récentes et historiques) sont utilisés indépendamment pour la création du modèle de détermination d’albédo de référence. En effet, le modèle a au préalable été établi pour les données récentes et la grande variabilité d’albédo sur une faible gamme de teneurs en eau (Figure 5.4 a) a conditionné le retour dans les années historiques pour augmenter le set de données et améliorer la qualité des statistiques ( $R^2$  de 0,01 à 0,48). La stratégie 2 de l’année 2019 s’est avérée plus performante ( $R^2=0,65$ ) que la stratégie 1, c’est elle qui a été considérée pour la détermination des équivalents  $CO_2$ .

Les données des deux stratégies n’ont pas été combinées pour modéliser l’albédo de référence. Cela est dû à la présence d’un biais technique de 0,018 sur les mesures d’albédo effectuées avant 2017. En effet, ce biais est la résultante d’une estimation ponctuelle sur une fenêtre temporelle bien précise (2017 et 2020). Il reste donc difficile de l’extrapoler pour les années historiques (2005, 2007 et 2011). Les incertitudes résultent de l’absence d’information

dans le cahier de terrain et de photos phénologiques sur l'état de l'îlot central pour toutes les années historiques.

La teneur en eau et l'indice de clarté étaient les variables directrices du modèle multilinéaire créé pour estimer l'albédo de sol nu à Lonzée. En effet, l'albédo diminue avec la teneur en eau à 5 cm et montre une dépendance linéaire avec l'albédo (Zheng *et al.*, 2017). Bien que l'angle zénithal soit un important facteur d'influence de l'albédo, il n'a pas été choisi dans notre modèle car la sélection horaire (10h – 14h) effectuée pour le calcul de l'albédo réduit déjà suffisamment la plage angulaire. C'est d'ailleurs le même constat qu'ont fait Gascoin *et al.* (2009) lorsqu'ils ont travaillé entre 9h et 16h30, heure locale. Les résidus (valeurs vraies – valeurs prédictes) ont été testés en fonction de la deuxième variable directrice (indice de clarté). La dispersion résiduelle était continue et suivait une relation linéaire.

## 6.4 Validation de l'albédo satellitaire

La corrélation entre l'albédo satellitaire et celle *in situ* a donné une valeur de RMSE égale à 0,04 (Figure 5.7). Cette valeur est supérieure à la valeur de 0,02 que renseignent les auteurs qui ont testé la même relation dans la littérature à des latitudes similaires (Liang *et al.*, 2003, Franch *et al.*, 2019, Bonafoni et Sekertekin, 2020). L'albédo obtenu au moyen de l'outil satellitaire Sentinel-2 s'est montré imprécis pour déterminer le forçage radiatif journalier de Lonzée, et ce, à deux niveaux :

Premièrement, la dynamique temporelle de l'albédo satellitaire (Figure 5.6) laisse voir toute une période pendant laquelle les données sont assez synchrones ainsi qu'une autre période où les différences sont assez marquées, comme en septembre 2019. La nébulosité entrave l'utilisation des satellites optiques à l'exemple de Sentinel-2 conduisant à une coïncidence non systématique entre les dates d'échantillonnage et l'acquisition des images. Les nuages et leurs ombres entraînent des données manquantes dans les séries chronologiques optiques et cet inconvénient affecte de manière significative leurs performances (Van Tricht *et al.*, 2018). Dans leur article, Goffart *et al.* (2021) ont conclu qu'une présence plus élevée de nuages en automne est un inconvénient à l'utilisation des images Sentinel-2 en Europe. En outre, à partir d'une valeur d'albédo de 0,2, (Figure 5.6) les valeurs d'albédos satellitaires sont systématiquement au-dessus de celles *in situ* et laissent penser à une surestimation. Cette situation est similaire à celle rencontrée par (Franch *et al.*, 2018) pour 5 dates de leur jeu de données sur lesquelles la correction atmosphérique était imprécise. Cependant, lors de bonnes performances dans les méthodes de conversion albédo bande étroite à bande large, il est possible d'observer une sous-estimation des valeurs d'albédos supérieures à 0,2 (Bonafoni

## CHAPITRE 6. DISCUSSION

et Sekertekin, 2020). Toutefois, cette erreur (surestimation ou sous-estimation) est prise en compte dans la valeur de la RMSE du site (Franch *et al.*, 2018).

Deuxièmement, le calcul d’albédo présenté à la Section 4.2.2 est abordé de manière très simple dans ce travail. Il s’avère qu’un produit d’albédo ainsi calculé est particulièrement sensible à la surface Roujean *et al.* (2019) et à l’anisotropie de la réflectance (Liu *et al.*, 2022). L’albédo dépend des conditions atmosphériques et les propriétés de diffusion de la surface sont différentes en fonction de la nature de la lumière (directe ou diffuse) (Liu *et al.*, 2022). Par conséquent, il reste des progrès à faire sur l’approche satellitaire, par exemple sur l’amélioration de la qualité de filtrage des données pour réduire l’effet des nuages. Qui plus est, les indicateurs d’albédo utilisés ici ont montré leurs limites. En effet, nous avons considéré des valeurs provenant de la littérature, celles-ci peuvent être biaisées dans leur détection de l’albédo dans la mesure où elles ont été établies pour certains types de sol, avec des couvertures végétales différentes, à d’autres latitudes et avec un climat différent du nôtre. Il aurait été possible de s’affranchir de ce problème en construisant un indicateur d’albédo propre à notre site d’étude grâce à des nombreux outils qu’offre la télédétection, ceci dépassant le cadre de cette étude.

Enfin, ces résultats sont établis pour une étude dont toute la validation tient à un point de terrain qui est la parcelle de Lonzée. Franch *et al.* (2019) insiste sur l’importance d’avoir plusieurs sites de mesures homogènes pour la validation de l’albédo satellitaire avec les mesures de terrain. Ceci permettrait de s’affranchir des éventuels artefacts (e.g. liés aux corrections des images) et d’améliorer la comparaison des données. De ce fait, pour avoir une meilleure idée de la validation des outils satellitaires, il serait judicieux d’augmenter les points de comparaison.

## 6.5 Détection des sols nus satellitaires

Les objectifs ici étaient, d’une part, de chercher de manière automatisée des parcelles de sol nu adjacentes à la parcelle d’intérêt durant la période d’étude et, d’autre part, d’en ressortir la valeur moyenne pour le calcul du forçage radiatif satellitaire. Les indications sur les tendances du BSI au fil du temps ont fourni des informations sur la fréquence de l’apparition de sols nus dans les terres cultivées et leur durée. Les tendances temporelles du NDVI nous ont fourni des indications sur le moment où les cultures ont été semées et récoltées. Les seuils utilisés ici  $-0,04 < \text{BSI} > 0,22$  et  $\text{NDVI} < 0,15$  ont été dérivés de la validation temporelle sur la zone d’étude (Figure 5.8). Les sols nus doivent avoir des valeurs de NDVI inférieures à 0,2 (Ibrahim et Gobin, 2021).

Dans cette étude, la combinaison du NDVI et du BSI s'est révélée être un bon moyen de distinguer les sols nus des autres conditions sur des parcelles agricoles situées dans une zone d'empreinte de 5 km autour de Lonzée (Figure 5.9). Ces indices basés sur les bandes infrarouges à ondes courtes ont la capacité de faire progresser la discrimination globale des sols nus (Mzid *et al.*, 2021). Le NDVI et BSI en tant qu'indicateurs de sols nus ont montré leur efficacité car leurs dynamiques saisonnières ont permis d'identifier les sols nus. Une très bonne corrélation était présente entre les deux indicateurs, cela signifie qu'ils ont la même information biologique mais de façon inversée. L'objectif de combiner ces deux indicateurs a été motivé par le fait qu'ils donnent la même information, mais pas totalement. En effet, le BSI se base sur l'infrarouge moyen et l'indicateur de végétation, de son côté, est sensible à la teneur en chlorophylle ainsi qu'aux autres pigments responsables de l'absorption du rayonnement solaire dans la gamme rouge du spectre électromagnétique (Davin *et al.*, 2014, Barboza Castillo *et al.*, 2020). Donc ces deux niveaux d'informations différents rendaient la technique intéressante. De plus, le NDVI est utilisé pour distinguer une période avec végétation d'une sans végétation, peu importe l'état humide ou non de celui-ci. Par contre, l'humidité elle sera mieux prise en compte par le BSI. Le NDVI a été utilisé avec une valeur seuil dans de nombreuses études pour identifier le sol nu (Silvero *et al.*, 2021). Les indicateurs de sols nus ont une quantité d'incertitudes associées à leur utilisation. Il aurait été possible de construire un indice robuste sur base d'autres indices spectraux qui s'avère moins discriminant, mais c'est au-delà de nos objectifs.

## 6.6 Perspectives

Un regard complémentaire au bilan carbone précédemment établi par (Buyssse *et al.*, 2017) sur la parcelle de Lonzée a été réalisé en y rajoutant l'effet albédo induit par la présence d'une CI. Il serait intéressant de voir comment évoluerait cette compensation avec les effets des changements climatiques. Dans la mesure où il est annoncé que les changements climatiques vont influencer les précipitations et que le modèle élaboré dans cette étude pour déterminer le  $\alpha_{\text{Ref}}$  est basé sur la teneur en eau du sol. En outre, pour continuer sur cette même lancée, il pourrait être envisagé de calculer les effets biophysiques non radiatifs (flux de chaleur sensible et latente) induits par les CI. Tout d'abord, la CI au travers des processus radiatifs réduit le stock d'énergie. Par la suite, elle influence la distribution de l'énergie disponible en surface et enfin augmente le retour d'eau vers l'atmosphère au travers de l'évapotranspiration (Ceschia *et al.*, 2017).

## CHAPITRE 6. DISCUSSION

De ce fait, des recherches plus approfondies pourraient être menées sur « l'assiette d'utilisation des CI en Wallonie ». Connaître la part des sols agricoles dédiée à la culture des CI aiderait à savoir quelle marge d'utilisation il reste pour l'implantation de cette pratique culturale et, par extrapolation, la quantité de carbone qui pourrait être séquestrée si elle était adoptée .

Le forçage radiatif calculé ici incluait les données d'albédo de surface dépourvu de couverture neigeuse. La présence de couverture neigeuse a un impact important sur l'albédo hivernal car l'albédo de la couverture neigeuse est beaucoup plus élevé que celui des plantes ou du sol ([Kaye et Quemada, 2017](#)). Il pourrait être intéressant de modéliser un albédo de référence avec couverture neigeuse et voir l'impact de la neige sur le forçage radiatif. Mais les changements climatiques affectent les jours de neiges (en 2020 aucun jour de neige à lonzée (*cf.* Annexe [.7](#)), ce qui rend ce scénario de moins en moins représentatif du futur.

De plus, Il pourrait également être intéressant de corroborer les résultats obtenus avec des données historiques sur base de mesures récentes non biaisées. Ceci reviendrait à appliquer la méthode développée ici à d'autres sites d'étude ICOS afin de comparer les résultats.

La modélisation de l'albédo de référence sur sol nu au moyen d'un modèle multilinéaire, incluant la teneur en eau et l'indice de clarté a montré des meilleurs résultats sur certaines périodes plus que d'autres. Il pourrait être envisagé de construire un modèle plus simple juste sur base de la combinaison des résultats de régression teneur en eau et l'analyse des résidus. Cela permettrait de comparer les valeurs obtenues à ceux de cette étude et voir laquelle des modélisations est meilleure.

En ce qui concerne l'utilisation des produits satellitaires, le calcul d'albédo présenté dans ce travail reste un moyen facile d'approximer l'albédo compte tenu de nos aptitudes. Il pourrait être envisagé d'utiliser des coefficients de conversions proposés par Bonafoni et al. (2020) qui ont montré de bonnes performances et observer si cela correspond mieux avec les données *in situ*.

La détection des sols nus a été effectuée au moyen de deux indicateurs (NDVI et BSI). Au final, le réel problème présent lors de la détection des sols vient de la définition même de ce que l'on appelle « sol nu ». L'utilisateur de cette méthode doit à priori fixer sa définition du sol nu, établir les limites de sa zone d'étude et par la suite calibrer la carte de sol nu obtenue avec un contrôle de terrain. Cependant, nous suggérons que, pour une meilleure optimisation des seuils, il serait concevable d'utiliser des valeurs générales résultant d'un sous-ensemble de la globalité des parcelles de la région.

*CHAPITRE 6. DISCUSSION*

## 7 | Conclusion

Il est généralement admis que la culture intermédiaire (CI) introduite dans la rotation durant la période d'interculture a un albédo plus élevé que le sol nu. Cependant, la durée de la culture sur la parcelle reste importante. À l'aide de la modélisation et des données Sentinel-2, nous avons, au cours de ce travail, déterminer l'albédo de référence de sol nu nécessaire au calcul du forçage radiatif induit par la présence de CI sur le site ICOS de Lonzée.

Durant la période d'étude de 4 ans (1 janvier 2017 et 31 décembre 2020), les deux périodes avec culture qui ont été identifiées étaient celle avec moutarde en 2017 et celle avec un mélange avoine/féverole en 2019. Ces périodes correspondent à deux scénarios pour lesquels le forçage radiatif a été calculé. La saison de culture intermédiaire débute après la récolte du froment et se termine lors du semis de la culture de printemps suivante. Les sols nus associés à ces périodes se divisent en état de sol après déchaumage et état de sol après labour.

Afin d'estimer l'albédo au cours du temps, une approche de modélisation a été suivie. C'est une régression multilinéaire avec la teneur en eau à 5 cm et l'indice de clarté comme variables explicatives qui a montré les résultats les plus probants pour la modélisation de l'albédo suivant deux stratégies. La stratégie 1 a été appliquée sur les données correspondantes à la période d'étude, mais l'énorme variabilité de l'albédo pour des petites gammes de teneur en eau et le peu de données récoltées affectent la robustesse des tests statistiques ce qui nous a conduit à la stratégie 2. Celle-ci consistait à réaliser une modélisation sur les données historiques malgré la présence d'un biais technique de 0,018 lié à la position des instruments de mesure de l'albédo avant 2017. En outre, les indicateurs de sols nus ont permis l'identification de parcelle de sols nus au moyen de Sentinel -2. Les valeurs d'albédos satellitaires obtenues étaient du même ordre de grandeur que celles mesurées *in situ*. Toutefois, sur le plan satellitaire de ce travail une des grandes limites a été, la faible couverture temporelle de Sentinel-2 sur notre zone d'étude à cause de la présence des nuages.

Concernant le forçage radiatif, l'absence de données de teneurs en eau sur une partie du scénario de 2017 a affecté les résultats. Le meilleur forçage radiatif a été obtenu pour le

## CHAPITRE 7. CONCLUSION

mélange avoine/ féverole après modélisation sur les données historiques. Il avait une valeur moyenne de  $-5,4 \pm 5,42 \text{ W.m}^{-2}$  pour une variation d’albédo moyenne de  $0,05 \pm 0,02$ . Dans un scénario de rotation à Lonzée où la CI serait présente une fois sur deux durant 100 ans, le forçage radiatif par unité de surface correspondait à une diminution de  $\text{CO}_2$  atmosphérique de  $2,8 \text{ kgCO}_2\text{-eq. m}^{-2}$  ce qui équivaut à un effet positif en équivalent carbone par hectare de  $7,6 \text{ tC.ha}^{-1}$  (stocks). Bien que l’effet albédo reste inférieur aux effets biogéochimiques déjà calculé à Lonzée, ces derniers pourraient contrebalancer le bilan de la parcelle. Enfin, il pourrait être important de considérer l’effet albédo des terres cultivées dans les solutions agricoles pour atténuer les changements climatiques.

# Bibliographie

- AUSTIN, E. E., WICKINGS, K., McDANIEL, M. D., ROBERTSON, G. P. et GRANDY, A. S. (2017). Cover crop root contributions to soil carbon in a no-till corn bioenergy cropping system. *Gcb Bioenergy*, 9(7):1252–1263.
- BARBOZA CASTILLO, E., TURPO CAYO, E. Y., de ALMEIDA, C. M., SALAS LÓPEZ, R., ROJAS BRICEÑO, N. B., SILVA LÓPEZ, J. O., BARRENA GURBILLÓN, M. Á., OLIVA, M. et ESPINOZA-VILLAR, R. (2020). Monitoring wildfires in the northeastern peruvian amazon using landsat-8 and sentinel-2 imagery in the gee platform. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(10):564.
- BETTS, R. A. (2000). Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo. *Nature*, 408(6809):187–190.
- BONAFONI, S., BALDINELLI, G. et VERDUCCI, P. (2017). Sustainable strategies for smart cities : Analysis of the town development effect on surface urban heat island through remote sensing methodologies. *Sustainable Cities and Society*, 29:211–218.
- BONAFONI, S. et SEKERTEKIN, A. (2020). Albedo retrieval from sentinel-2 by new narrow-to-broadband conversion coefficients. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17(9):1618–1622.
- BONTEMPS, S., ARIAS, M., CARA, C., DEDIEU, G., GUZZONATO, E., HAGOLLE, O., INGLADA, J., MATTON, N., MORIN, D., POPESCU, R. et al. (2015). Building a data set over 12 globally distributed sites to support the development of agriculture monitoring applications with sentinel-2. *Remote Sensing*, 7(12):16062–16090.
- BREST, C. L. et GOWARD, S. N. (1987). Deriving surface albedo measurements from narrow band satellite data. *International Journal of remote sensing*, 8(3):351–367.
- BRIGHT, R. M., BOGREN, W., BERNIER, P. et ASTRUP, R. (2016). Carbon-equivalent metrics for albedo changes in land management contexts : relevance of the time dimension. *Ecological Applications*, 26(6):1868–1880.

## BIBLIOGRAPHIE

- BRIGHT, R. M. et LUND, M. T. (2021). Co 2-equivalence metrics for surface albedo change based on the radiative forcing concept : a critical review. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(12):9887–9907.
- BRIGHT, R. M., ZHAO, K., JACKSON, R. B. et CHERUBINI, F. (2015). Quantifying surface albedo and other direct biogeophysical climate forcings of forestry activities. *Global Change Biology*, 21(9):3246–3266.
- BUYSSE, P., BODSON, B., DEBACQ, A., DE LIGNE, A., HEINESCH, B., MANISE, T., MOUREAUX, C. et AUBINET, M. (2017). Carbon budget measurement over 12 years at a crop production site in the silty-loam region in belgium. *Agricultural and Forest Meteorology*, 246:241–255.
- CARRER, D., MEUREY, C., CEAMANOS, X., ROUJEAN, J.-L., CALVET, J.-C. et LIU, S. (2014). Dynamic mapping of snow-free vegetation and bare soil albedos at global 1 km scale from 10-year analysis of modis satellite products. *Remote Sensing of Environment*, 140:420–432.
- CARRER, D., PIQUE, G., FERLICOQ, M., CEAMANOS, X. et CESCHIA, E. (2018). What is the potential of cropland albedo management in the fight against global warming ? a case study based on the use of cover crops. *Environmental Research Letters*, 13(4):044030.
- CESCHIA, E., MARY, B., FERLICOQ, M., PIQUE, G., CARRER, D., DEJOUX, J.-F. et DEDIEU, G. (2017). Potentiel d'atténuation des changements climatiques par les couverts intermédiaires. *Innovations agronomiques*, 62:43–58.
- CLAVERIE, M., JU, J., MASEK, J. G., DUNGAN, J. L., VERMOTE, E. F., ROGER, J.-C., SKAKUN, S. V. et JUSTICE, C. (2018). The harmonized landsat and sentinel-2 surface reflectance data set. *Remote sensing of environment*, 219:145–161.
- CLOSE, O., BENJAMIN, B., PETIT, S., FRIPATIAT, X. et HALLOT, E. (2018). Use of sentinel-2 and lucas database for the inventory of land use, land use change, and forestry in wallonia, belgium. *Land*, 7(4):154.
- COLUZZI, R., IMBRENDA, V., LANFREDI, M. et SIMONIELLO, T. (2018). A first assessment of the sentinel-2 level 1-c cloud mask product to support informed surface analyses. *Remote sensing of environment*, 217:426–443.
- da SILVA CHAGAS, C., de CARVALHO JUNIOR, W., BHERRING, S. B. et CALDERANO FILHO, B. (2016). Spatial prediction of soil surface texture in a semiarid region using random forest and multiple linear regressions. *Catena*, 139:232–240.
- DAVIN, E. L., SENEVIRATNE, S. I., CIAIS, P., OLISO, A. et WANG, T. (2014). Preferential cooling of hot extremes from cropland albedo management. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(27):9757–9761.

## BIBLIOGRAPHIE

- DE TOFFOLI, M., IMBRECHT, O. et DECAMPS, C. (2013). Les cultures intermédiaires : Piège à nitrate et production de fourrage. Rapport technique 1.
- DESJARDINS, R., WORTH, D., DYER, J., VERGÉ, X. et McCONKEY, B. (2020). The carbon footprints of agricultural products in canada. In *Carbon Footprints*, pages 1–34. Springer.
- DESTAIN, J.-P., REUTER, V. et GOFFART, J.-P. (2010). Les cultures intermédiaires pièges à nitrate (cipan) et engrais verts : protection de l'environnement et intérêt agronomique. *BASE*.
- DICKINSON, R. E. (1983). Land surface processes and climate—surface albedos and energy balance. 25:305–353.
- DIEK, S., FORNALLAZ, F., SCHAEPMAN, M. E. et DE JONG, R. (2017). Barest pixel composite for agricultural areas using landsat time series. *Remote Sensing*, 9(12):1245.
- DOBOS, E. (2011). Encyclopedia of Soil Science, Second Edition.
- DRUSCH, M., DEL BELLO, U., CARLIER, S., COLIN, O., FERNANDEZ, V., GASCON, F., HOERSCH, B., ISOLA, C., LABERINTI, P., MARTIMORT, P. et al. (2012). Sentinel-2 : Esa's optical high-resolution mission for gmes operational services. *Remote sensing of Environment*, 120:25–36.
- ESA (2021). S2 MPC : L1C Data Quality Report (Reference : S2-PDGS-MPC-DQR). Rapport technique.
- FERLICOQ, M., CESCHIA, E., BRUT, A. et TALLEC, T. (2013). Quantifying the effect of crops surface albedo variability on ghg budgets in a life cycle assessment approach : methodology and results. pages EGU2013–9464.
- FORKUOR, G., DIMOBE, K., SERME, I. et TONDOH, J. E. (2018). Landsat-8 vs. sentinel-2 : examining the added value of sentinel-2's red-edge bands to land-use and land-cover mapping in burkina faso. *GIScience & remote sensing*, 55(3):331–354.
- FRANCH, B., VERMOTE, E., SKAKUN, S., ROGER, J.-C., MASEK, J., JU, J., VILLAESCUSA-NADAL, J. L. et SANTAMARIA-ARTIGAS, A. (2019). A method for landsat and sentinel 2 (hls) brdf normalization. *Remote Sensing*, 11(6):632.
- FRANCH, B., VERMOTE, E., SKAKUN, S., ROGER, J.-C., SANTAMARIA-ARTIGAS, A., VILLAESCUSA-NADAL, J. L. et MASEK, J. (2018). Toward landsat and sentinel-2 brdf normalization and albedo estimation : A case study in the peruvian amazon forest. *Frontiers in Earth Science*, 6:185.
- GASCOIN, S., DUCHARNE, A., RIBSTEIN, P., PERROY, E. et WAGNON, P. (2009). Sensitivity of bare soil albedo to surface soil moisture on the moraine of the zongo glacier (bolivia). *Geophysical Research Letters*, 36(2).

## BIBLIOGRAPHIE

- GOFFART, D., CURNEL, Y., PLANCHON, V., GOFFART, J.-P. et DEFOURNY, P. (2021). Field-scale assessment of belgian winter cover crops biomass based on sentinel-2 data. *European Journal of Agronomy*, 126:126278.
- GORELICK, N., HANCHER, M., DIXON, M., ILYUSHCHENKO, S., THAU, D. et MOORE, R. (2017). Google earth engine : Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*, 202:18–27.
- GUAN, X., HUANG, J., GUO, N., BI, J. et WANG, G. (2009). Variability of soil moisture and its relationship with surface albedo and soil thermal parameters over the loess plateau. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26(4):692–700.
- HOFIERKA, J. et ONAČILLOVÁ, K. (2021). Estimating visible band albedo from aerial orthophotographs in urban areas. *Remote Sensing*, 14(1):164.
- IBRAHIM, E. et GOBIN, A. (2021). Sentinel-2 recognition of uncovered and plastic covered agricultural soil. *Remote Sensing*, 13(21):4195.
- IMMITZER, M., VUOLO, F. et ATZBERGER, C. (2016). First experience with sentinel-2 data for crop and tree species classifications in central europe. *Remote sensing*, 8(3):166.
- IPCC (2022). Climate Change 2022 : Mitigation of Climate Change.
- JONES, A. D., COLLINS, W. D. et TORN, M. S. (2013). On the additivity of radiative forcing between land use change and greenhouse gases. *Geophysical Research Letters*, 40(15):4036–4041.
- JOOS, F., ROTH, R., FUGLESTVEDT, J. S., PETERS, G. P., ENTING, I. G., VON BLOH, W., BROVKIN, V., BURKE, E. J., EBY, M., EDWARDS, N. R. et al. (2013). Carbon dioxide and climate impulse response functions for the computation of greenhouse gas metrics : a multi-model analysis. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(5):2793–2825.
- KAYE, J. P. et QUEMADA, M. (2017). Using cover crops to mitigate and adapt to climate change. a review. *Agronomy for sustainable development*, 37(1):1–17.
- KOTTHAUS, S. et GRIMMOND, C. S. B. (2014). Energy exchange in a dense urban environment–part ii : Impact of spatial heterogeneity of the surface. *Urban Climate*, 10:281–307.
- LAMBERT, M.-J., TRAORÉ, P. C. S., BLAES, X., BARET, P. et DEFOURNY, P. (2018). Estimating smallholder crops production at village level from sentinel-2 time series in mali's cotton belt. *Remote Sensing of Environment*, 216:647–657.
- LENTON, T. M. et VAUGHAN, N. E. (2009). The radiative forcing potential of different climate geoengineering options. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(15):5539–5561.

## BIBLIOGRAPHIE

- LI, Z., ERB, A., SUN, Q., LIU, Y., SHUAI, Y., WANG, Z., BOUCHER, P. et SCHAAF, C. (2018). Preliminary assessment of 20-m surface albedo retrievals from sentinel-2a surface reflectance and modis/viirs surface anisotropy measures. *Remote sensing of environment*, 217:352–365.
- LIANG, S. (2001). Narrowband to broadband conversions of land surface albedo i : Algorithms. *Remote sensing of environment*, 76(2):213–238.
- LIANG, S., SHUEY, C. J., RUSS, A. L., FANG, H., CHEN, M., WALTHALL, C. L., DAUGHTRY, C. S. et HUNT JR, R. (2003). Narrowband to broadband conversions of land surface albedo : II. validation. *Remote Sensing of Environment*, 84(1):25–41.
- LIU, J., DESJARDINS, R. L., WANG, S., WORTH, D. E., QIAN, B. et SHANG, J. (2022). Climate impact from agricultural management practices in the canadian prairies : Carbon equivalence due to albedo change. *Journal of Environmental Management*, 302:113938.
- LIU, J., WORTH, D., DESJARDINS, R., HAAK, D., McCONKEY, B. et CERKOWNIAK, D. (2021). Influence of two management practices in the canadian prairies on radiative forcing. *Science of the Total Environment*, 765:142701.
- LOGNOUL, M., THEODORAKOPOULOS, N., HIEL, M.-P., REGAERT, D., BROUX, F., HEINESCH, B., BODSON, B., VANDENBOL, M. et AUBINET, M. (2017). Impact of tillage on greenhouse gas emissions by an agricultural crop and dynamics of n<sub>2</sub>o fluxes : Insights from automated closed chamber measurements. *Soil and Tillage Research*, 167:80–89.
- LUGATO, E., CESCATTI, A., JONES, A., CECCHERINI, G. et DUVEILLER, G. (2020). Maximising climate mitigation potential by carbon and radiative agricultural land management with cover crops. *Environmental Research Letters*, 15(9):094075.
- MALENOVSKÝ, Z., ROTT, H., CIHLAR, J., SCHAEPMAN, M. E., GARCÍA-SANTOS, G., FERNANDES, R. et BERGER, M. (2012). Sentinels for science : Potential of sentinel-1,-2, and-3 missions for scientific observations of ocean, cryosphere, and land. *Remote Sensing of environment*, 120:91–101.
- MALHI, G. S., KAUR, M. et KAUSHIK, P. (2021). Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies : A review. *Sustainability*, 13(3):1318.
- MATTHIAS, A., FIMBRES, A., SANO, E., POST, D., ACCIOLY, L., BATCHILY, A. et FERREIRA, L. (2000). Surface roughness effects on soil albedo. *Soil Science Society of America Journal*, 64(3):1035–1041.
- MEYER, S., BRIGHT, R. M., FISCHER, D., SCHULZ, H. et GLASER, B. (2012). Albedo impact on the suitability of biochar systems to mitigate global warming. *Environmental Science & Technology*, 46(22):12726–12734.

## BIBLIOGRAPHIE

- MUÑOZ, I., CAMPRA, P. et FERNÁNDEZ-ALBA, A. R. (2010). Including co2-emission equivalence of changes in land surface albedo in life cycle assessment. methodology and case study on greenhouse agriculture. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(7):672–681.
- MZID, N., PIGNATTI, S., HUANG, W. et CASA, R. (2021). An analysis of bare soil occurrence in arable croplands for remote sensing topsoil applications. *Remote Sensing*, 13(3):474.
- NUNEZ, M., DAVIES, J. et ROBINSON, P. (1972). Surface albedo at a tower site in lake ontario. *Boundary-Layer Meteorology*, 3(1):77–86.
- PAHLEVAN, N., SARKAR, S., FRANZ, B., BALASUBRAMANIAN, S. et HE, J. (2017). Sentinel-2 multispectral instrument (msi) data processing for aquatic science applications : Demonstrations and validations. *Remote sensing of environment*, 201:47–56.
- PEEL, M. C., FINLAYSON, B. L. et McMAHON, T. A. (2007). Updated world map of the köppen-geiger climate classification. *Hydrology and earth system sciences*, 11(5):1633–1644.
- PELLERIN, S., BAMIÈRE, L., SAVINI, I. et RÉCHAUCHÈRE, O. (2021). *Stocker du carbone dans les sols français : Quel potentiel et à quel coût?* éditions Quae.
- PHIRI, D., SIMWANDA, M., SALEKIN, S., NYIREnda, V. R., MURAYAMA, Y. et RANAGALAGE, M. (2020). Sentinel-2 data for land cover/use mapping : a review. *Remote Sensing*, 12(14):2291.
- PINTY, B., LATTANZIO, A., MARTONCHIK, J. V., VERSTRAETE, M. M., GOBRON, N., TABERNER, M., WIDLowski, J.-L., DICKINSON, R. E. et GOVAERTS, Y. (2005). Coupling diffuse sky radiation and surface albedo. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62(7):2580–2591.
- POST, D., FIMBRES, A., MATTHIAS, A., SANO, E., ACCIOLY, L., BATCHILY, A. et FERREIRA, L. (2000). Predicting soil albedo from soil color and spectral reflectance data. *Soil Science Society of America Journal*, 64(3):1027–1034.
- QU, Y., LIANG, S., LIU, Q., HE, T., LIU, S. et LI, X. (2015). Mapping surface broadband albedo from satellite observations : A review of literatures on algorithms and products. *Remote Sensing*, 7(1):990–1020.
- RIKIMARU, A., ROY, P. et MIYATAKE, S. (2002). Tropical forest cover density mapping. *Tropical ecology*, 43(1):39–47.
- ROUJEAN, J.-L., OLISO, A., CESCHIA, E., HAGOLLE, O. et WEISS, M. (2018). A surface albedo product at high spatial resolution from a combination of sentinel-2 and landsat-8 observations. pages 8169–8172.

## BIBLIOGRAPHIE

- ROUJEAN, J.-L., OLIOSO, A., CESCHIA, E., HAGOLLE, O., WEISS, M., TALLEC, T., BRUT, A. et FERLICOQ, M. (2019). A surface albedo product at high spatial resolution from a combination of sentinel-2 and landsat-8 data : the role of surface radiative forcing from agriculture areas as a major contributor to an abatement of carbon emission. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42:59–61.
- ROUQUIÉ, B., HAGOLLE, O., BRÉON, F.-M., BOUCHER, O., DESJARDINS, C. et RÉMY, S. (2017). Using copernicus atmosphere monitoring service products to constrain the aerosol type in the atmospheric correction processor maja. *Remote Sensing*, 9(12):1230.
- ROXY, M., SUMITHRANAND, V. et RENUKA, G. (2010). Variability of soil moisture and its relationship with surface albedo and soil thermal diffusivity at astronomical observatory, thiruvananthapuram, south kerala. *Journal of Earth System Science*, 119(4):507–517.
- SCHAAF, C. B., GAO, F., STRAHLER, A. H., LUCHT, W., LI, X., TSANG, T., STRUGNELL, N. C., ZHANG, X., JIN, Y., MULLER, J.-P. et al. (2002). First operational brdf, albedo nadir reflectance products from modis. *Remote sensing of Environment*, 83(1-2):135–148.
- SEGARRA, J., BUCHAILLOT, M. L., ARAUS, J. L. et KEFAUVER, S. C. (2020). Remote sensing for precision agriculture : Sentinel-2 improved features and applications. *Agronomy*, 10(5):641.
- SHABOU, M., MOUGENOT, B., LILI CHABAANE, Z., WALTER, C., BOULET, G., BEN AISSA, N. et ZRIBI, M. (2015). Soil clay content mapping using a time series of landsat tm data in semi-arid lands. *Remote sensing*, 7(5):6059–6078.
- SIEBER, P., ERICSSON, N. et HANSSON, P.-A. (2019). Climate impact of surface albedo change in life cycle assessment : Implications of site and time dependence. *Environmental Impact Assessment Review*, 77:191–200.
- SILLONBELGE (2020). Cipan, SIE... les conseils de Protect'eau pour composer le couvert idéal! - SillonBelge.be.
- SILVERO, N. E. Q., DEMATTÊ, J. A. M., AMORIM, M. T. A., dos SANTOS, N. V., RIZZO, R., SAFANELLI, J. L., POPPIEL, R. R., de SOUSA MENDES, W. et BONFATTI, B. R. (2021). Soil variability and quantification based on sentinel-2 and landsat-8 bare soil images : A comparison. *Remote Sensing of Environment*, 252:112117.
- SMITH, R. (2010). The heat budget of the earth's surface deduced from space. *Yale University Center for Earth Observation : New Haven, CT, USA*.
- STOREY, J., ROY, D. P., MASEK, J., GASCON, F., DWYER, J. et CHOATE, M. (2016). A note on the temporary misregistration of landsat-8 operational land imager (oli) and sentinel-2 multi spectral instrument (msi) imagery. *Remote Sensing of Environment*, 186:121–122.

## BIBLIOGRAPHIE

- TARRIO, K., TANG, X., MASEK, J. G., CLAVERIE, M., JU, J., QIU, S., ZHU, Z. et WOODCOCK, C. E. (2020). Comparison of cloud detection algorithms for sentinel-2 imagery. *Science of Remote Sensing*, 2:100010.
- TASUMI, M., ALLEN, R. G. et TREZZA, R. (2008). At-surface reflectance and albedo from satellite for operational calculation of land surface energy balance. *Journal of hydrologic engineering*, 13(2):51–63.
- TATSUMI, K., YAMASHIKI, Y., TORRES, M. A. C. et TAIPE, C. L. R. (2015). Crop classification of upland fields using random forest of time-series landsat 7 etm+ data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 115:171–179.
- TRENBERTH, K. E., FASULLO, J. T. et KIEHL, J. (2009). Earth's global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(3):311–324.
- UPRETI, D., HUANG, W., KONG, W., PASCUCCI, S., PIGNATTI, S., ZHOU, X., YE, H. et CASA, R. (2019). A comparison of hybrid machine learning algorithms for the retrieval of wheat biophysical variables from sentinel-2. *Remote Sensing*, 11(5):481.
- VALIENTE, J., NUNEZ, M., LOPEZ-BAEZA, E. et MORENO, J. (1995). Narrow-band to broad-band conversion for meteosat-visible channel and broad-band albedo using both avhrr-1 and-2 channels. *Remote Sensing*, 16(6):1147–1166.
- VAN DURME, G. et ERPICUM, M. (2005). Variabilité spatio-temporelle de l'albédo. analyse menée à la résolution métrique. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 46.
- VAN TRICHT, K., GOBIN, A., GILLIAMS, S. et PICCARD, I. (2018). Synergistic use of radar sentinel-1 and optical sentinel-2 imagery for crop mapping : A case study for belgium. *Remote Sensing*, 10(10):1642.
- VOGELS, M. F., DE JONG, S. M., STERK, G., DOUMA, H. et ADDINK, E. A. (2019). Spatio-temporal patterns of smallholder irrigated agriculture in the horn of africa using geobia and sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*, 11(2):143.
- WHITCRAFT, A. K., VERMOTE, E. F., BECKER-RESHEF, I. et JUSTICE, C. O. (2015). Cloud cover throughout the agricultural growing season : Impacts on passive optical earth observations. *Remote Sensing of Environment*, 156:438–447.
- WU, M., YANG, C., SONG, X., HOFFMANN, W. C., HUANG, W., NIU, Z., WANG, C., LI, W. et YU, B. (2018). Monitoring cotton root rot by synthetic sentinel-2 ndvi time series using improved spatial and temporal data fusion. *Scientific Reports*, 8(1):1–12.

## BIBLIOGRAPHIE

- XIONG, J., THENKABAIL, P. S., TILTON, J. C., GUMMA, M. K., TELUGUNTIA, P., OLIPHANT, A., CONGALTON, R. G., YADAV, K. et GORELICK, N. (2017). Nominal 30-m cropland extent map of continental africa by integrating pixel-based and object-based algorithms using sentinel-2 and landsat-8 data on google earth engine. *Remote Sensing*, 9(10):1065.
- YANG, F., MITCHELL, K., HOU, Y.-T., DAI, Y., ZENG, X., WANG, Z. et LIANG, X.-Z. (2008). Dependence of land surface albedo on solar zenith angle : Observations and model parameterization. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(11):2963–2982.
- YANG, J., LI, Z., ZHAI, P., ZHAO, Y. et GAO, X. (2020). The influence of soil moisture and solar altitude on surface spectral albedo in arid area. *Environmental Research Letters*, 15(3):035010.
- YOUNG, N. E., ANDERSON, R. S., CHIGNELL, S. M., VORSTER, A. G., LAWRENCE, R. et EVANGELISTA, P. H. (2017). A survival guide to landsat preprocessing. *Ecology*, 98(4):920–932.
- YUE, X., LI, Z., ZHAO, J., FAN, J., TAKEUCHI, N. et WANG, L. (2020). Variation in albedo and its relationship with surface dust at urumqi glacier no. 1 in tien shan, china. *Frontiers in Earth Science*, 8:110.
- ZHAO, Y., GAO, J. et NI, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from tm imagery. *International journal of remote sensing*, 24(3):583–594.
- ZHAO, K. et JACKSON, R. B. (2014). Biophysical forcings of land-use changes from potential forestry activities in north america. *Ecological Monographs*, 84(2):329–353.
- ZHENG, Z., WEI, Z., WEN, Z., DONG, W., LI, Z., WEN, X., ZHU, X., JI, D., CHEN, C. et YAN, D. (2017). Inclusion of solar elevation angle in land surface albedo parameterization over bare soil surface. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 9(8):3069–3081.
- ZHU, Z., WANG, S. et WOODCOCK, C. E. (2015). Improvement and expansion of the fmask algorithm : Cloud, cloud shadow, and snow detection for landsats 4–7, 8, and sentinel 2 images. *Remote sensing of Environment*, 159:269–277.
- ŽÍŽALA, D., MINAŘÍK, R. et ZÁDOROVÁ, T. (2019). Soil organic carbon mapping using multispectral remote sensing data : Prediction ability of data with different spatial and spectral resolutions. *Remote Sensing*, 11(24):2947.



# **Annexes**

## .1 Relation entre l'albédo de la surface et le forçage radiatif au sommet de l'atmosphère

L'albédo est important dans la quantification du forçage radiatif de la surface de la terre ([Bonafoni et Sekertekin, 2020](#)). C'est un paramètre incontournable du bilan énergétique de la terre ([Gascoin et al., 2009](#)). L'équilibre radiatif de la terre peut être perturbé par la modification d'albédo ([Muñoz et al., 2010](#)).

Selon [Trenberth et al. \(2009\)](#), la moyenne de rayonnement incident à ondes courtes atteignant le sommet de l'atmosphère est de  $341 \text{ W.m}^{-2}$  (Figure .1). En raison des aérosols et des nuages,  $79 \text{ W.m}^{-2}$  sont réfléchis vers l'espace, tandis que  $78 \text{ W.m}^{-2}$  sont absorbés dans l'atmosphère. Sur les  $184 \text{ W.m}^{-2}$  qui arrivent jusqu'à la surface du sol,  $161 \text{ W.m}^{-2}$  sont absorbés, tandis que  $23 \text{ W.m}^{-2}$  sont réfléchis sous forme d'albédo. De ce fait, l'albédo moyen de la surface est déduit et vaut  $23/184 = 0,13$  et celle au sommet de l'atmosphère  $102/341 = 0,3$  ([Muñoz et al., 2010](#)).

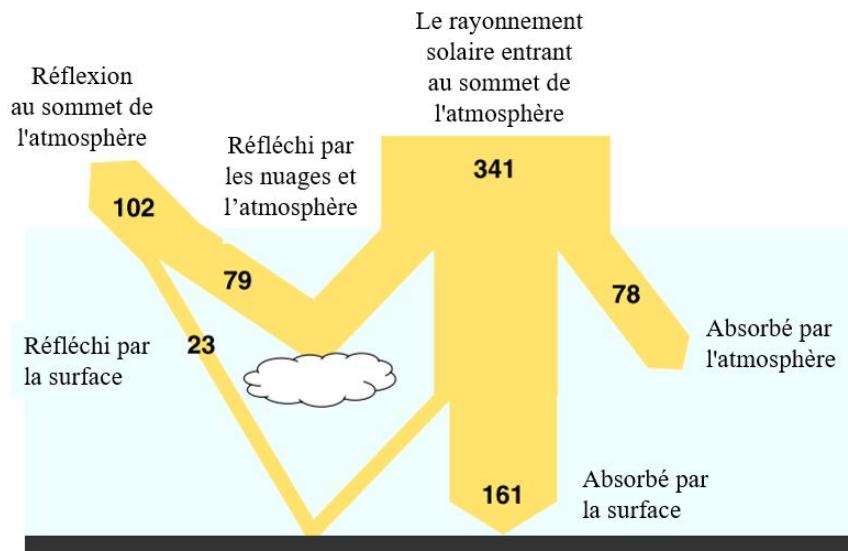


FIGURE .1 – Flux moyen global d'énergie d'ondes courtes en watts par mètre carré. L'absorption du rayonnement entrant à ondes courtes est compensée par la libération de la même quantité de rayonnement sortant à ondes longues ([Trenberth et al., 2009](#))

### .1.1 Autres facteurs d'influence de l'albédo

**Teneur en matière organique du sol** En effet, la couleur de la surface conditionne l'albédo, car elle est déterminée par l'interaction du matériau de surface avec les spectres visibles du rayonnement incident ([Yue et al., 2020](#)). Cependant, dans les systèmes de classifications

## ANNEXES

des sols, la couleur est utilisée pour déterminer les caractéristiques physiques et chimiques du sol ([Post et al., 2000](#)). La teneur en matière organique participe à la coloration du sol, une augmentation de cette teneur augmente son absorbance [Matthias et al. \(2000\)](#), entraînant une diminution d’albédo ([Dobos, 2011](#)).

**Rugosité** La rugosité est un paramètre qui définit le type de réflexion d’une surface. Les surfaces lisses (plan d’eau, feuilles, sol gorgé d’eau) sont des réflecteurs presque parfaits qui présentent un albédo relativement élevé. Par contre, les surfaces rugueuses présentent des valeurs d’albédo plus faibles, notamment lorsque l’angle du soleil est faible et que l’effet d’ombrage diminue la réflexion ([Gascoin et al., 2009](#)).

Les diverses classes texturales présentent des rugosités variées qui impactent l’albédo ([Kotthaus et Grimmond, 2014](#)). Les sols secs à texture fine produisent un albédo élevé en raison de leur surface relativement lisse. Inversement, les sols secs, à texture grossière (grains de sable), réfléchissent une plus petite partie du rayonnement incident que les sols argileux ([Dobos, 2011](#)).

## .2 Corrections requises sur Sentinel-2

Les avancées technologiques de télédétection par satellite ont révolutionné les approches de surveillance des ressources naturelles et humaines à la surface de la terre, permettant ainsi de surveiller de vastes zones ([Phiri et al., 2020](#)). L'apparition des satellites à images optiques a permis de nombreuses évolutions dans le domaine agricole ([Van Tricht et al., 2018](#)). De plus, l'amélioration des résolutions spatiales, spectrales et temporelles au fil des années ont conduit à une meilleure précision des résultats ([Tatsumi et al., 2015](#)). Les bandes spectrales de Sentinel-2 sont disponibles dans la Table .1.

Bandes Multi spectrales	Résolution Spatiale (m)	Longueur d'onde Centrale (nm)	Bandes Passantes (nm)
B1 : aerosol cotier	60	443	20
B2 : Blue	10	490	65
B3 : vert	10	560	35
B4 : Rouge	10	665	30
B5 : Rouge bord	20	705	15
B6 : Rouge bord	20	740	15
B7 : Rouge bord	20	783	20
B8 : NIR	10	842	115
B8A : Vegetation RE	20	865	20
B9 : Vapeur d'eau	60	945	20
B10 : SWIR Cirrus	60	1375	30
B11 : SWIR	20	1610	90
B12 : SWIR	20	2190	180

TABLE .1 – Résolution des bandes spectrales de l'instrument multi-spectral Sentinel-2 ([Drusch et al., 2012](#), [Segarra et al., 2020](#)).

La disponibilité de la bande rouge bord donne à l'imagerie multi-spectrale Sentinel-2 un

## ANNEXES

avantage par rapport aux autres capteurs du même type ([Upreti et al., 2019](#)). Cette dernière offre hypothétiquement une meilleure précision de récupération des variables biophysiques des cultures ([Goffart et al., 2021](#)).

Sentinel-2 est devenu un outil incontournable pour la surveillance des activités agricoles du Nord au Sud. Tout d'abord, les nombreuses études menées débutent au niveau de la parcelle ([Lambert et al., 2018](#)) pour aller jusqu'au niveau continental ([Xiong et al., 2017](#), [Carrer et al., 2018](#)). Ensuite, les sujets traités reprennent de nombreux domaines d'études à l'exemple de l'identification de sol nu ([Mzid et al., 2021](#)). Enfin, les résultats qui ressortent de ces études peuvent être des informations utiles aux agriculteurs ou des cartes agricoles ([Bontemps et al., 2015](#), [Vogels et al., 2019](#)).

**Les produits** sont disponibles sous plusieurs niveaux (0,-1A,-1B,-1C et -2A) et doivent subir nombreux traitements avant d'être accessibles à l'utilisateur ([ESA, 2021](#)). Le niveau-2A est obtenu au départ du niveau-1C en utilisant la boîte à outil de Sentinel-2 renseignée sur le site internet de l'Agence Spatiale Européenne, elle permet de corriger les effets atmosphériques et obtenir une image équivalente au bas de l'atmosphère. Une fois qu'on a obtenu le niveau-2 A, celui-ci peut ou impliquer des corrections. Si besoin, de nombreux algorithmes au choix de l'utilisateur sont disponibles afin d'améliorer la qualité de l'image.

**Corrections géométrique, locale et atmosphérique** Comme tout autre capteur optique, Sentinel-2 est affecté par des effets géométriques, topographiques, atmosphériques. De nombreux prétraitements sont nécessaires pour réduire les erreurs liées à l'acquisition des données et par conséquent améliorer la qualité de l'image satellitaire.

Bien que l'erreur géométrique de Sentinel-2 soit faible, il est important d'ajuster la position des images en fonction de celle au sol pour la corriger ([Drusch et al., 2012](#), [Young et al., 2017](#)). Cette correction est possible tout d'abord en utilisant les données mondiales géo référencées basées sur les images mono-spectrales de Sentinel-2, dans un modèle physique pour correction géométrique ([Drusch et al., 2012](#)), mais aussi avec le modèle numérique d'élévation (MNE) que propose la Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) ([ESA, 2021](#)). En outre, le logiciel atmosphérique/topographique (ATCOR) fourni par la boîte à outils de Sentinel-2, permet également la correction géométrique et topographique. Pour [Pahlevan et al. \(2017\)](#) la correction topographique a pour objectif de réduire les effets causés par les ombres et irrégularités de surface.

L'erreur de géolocalisation (12,5m) de Sentinel-2 est supérieure à celle de Landsat-8 qui est de 12 m et l'écart d'alignement entre les deux capteurs est de 38 m ([Storey et al., 2016](#)). La normalisation de cette erreur est possible grâce au programme d'harmonisation robuste

Landsat et Sentinel-2, développé par l'Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace (NASA) ([Claverie et al., 2018](#)).

Pour réduire l'erreur atmosphérique, la littérature renseigne plusieurs corrections disponibles. Compte tenu de l'importance de l'étape de prétraitement, la plateforme d'application Sentinel (SNAP) ou Sen2Core permet le traitement des images provenant de l'Agence Spatiale Européenne, notamment des corrections pour la détection des nuages et de leur ombre, la détection des cirrus et la correction de l'effet de pente ([Forkuor et al., 2018](#), [Wu et al., 2018](#)). Outre l'utilisation de SNAP, les effets atmosphériques peuvent être corrigés en utilisant MAJA (développé par CESBIO/CNES) ou i-COR (développé par VITO) ([Segarra et al., 2020](#)). Toutefois aucun algorithme de traitement ne produit les meilleurs résultats pour la détection simultanée des nuages et ombres dans les images Sentinel-2, il faudra toujours faire des concessions ([Tarrio et al., 2020](#)). Au regard de la haute importance des effets atmosphériques, il y a une croissance du nombre d'articles qui traitent des algorithmes de corrections de Sentinel-2 ([Phiri et al., 2020](#)).

**Masque de couverture nuageuse** La littérature évoque les possibles stratégies pour résoudre les inconvénients liés aux ombres et aux nuages sur les capteurs optiques ([Van Tricht et al., 2018](#)). La méthode la plus utilisée pour masquer les nuages sur Sentinel-2 est Fmask [Zhu et al. \(2015\)](#) plusieurs études démontrent leur efficacité, une version améliorée de cet algorithme a été développée au moyen de l'indice de déplacement des nuages ([Franch et al., 2018](#)). De plus, la Vlaamse Instelling voor Technologische (VITO)<sup>1</sup> située en Belgique, travaille sur les applications de Sentinel-2, en développant des outils de masquage des nuages afin d'améliorer la précision des données Sentinel-2 pour différentes applications telles que la surveillance des forêts, de l'agriculture et des catastrophes ([Coluzzi et al., 2018](#)).

---

1. (<https://remotesensing.vito.be/hubspot-topics/Sentinel-2>)

### .3 Particularités des cultures intermédiaires

**Caractéristiques** La bonne gestion de l'inter-culture dans une ferme est conditionnée par les objectifs, les contraintes et le type de CI que fixe au préalable l'agriculteur. La date d'implantation est le critère décisif pour le choix d'une culture intermédiaire ([Destain et al., 2010](#)). Ensuite, viennent des caractéristiques telles que : la couverture de sol, le piégeage d'azote, la période de récolte, le rendement fourrager, la résistance aux maladies. La température est le principal facteur influençant le bon développement des CI, notamment celui des légumineuses.

La principale fonction des cultures intermédiaires est de capturer le nitrate dans le sol. À cela peut s'ajouter d'autres fonctions pour l'agriculteur. En effet, suivant la surface agricole utile, elles peuvent, en cas de mauvaises conditions climatiques, compléter les stocks des fourrages et prolonger le pâturage d'automne.

L'implantation et la récolte des CI sont très importants. [De Toffoli et al. \(2013\)](#) proposent quelques règles de bonnes pratiques à savoir :

- il est recommandé suite à la récolte de la culture précédente de travailler le sol avant le semis de la CI, d'autant plus si la culture précédente était de l'escourgeon ;
- pour éviter les impacts (floraison précoce chez la moutarde) du stress hydrique, la CI doit être semée juste avant le retour des pluies ;
- les CI ne nécessitent pas de traitement particulier surtout si l'implantation du couvert a été convenablement effectuée.

**Calendrier agronomique** Les dates de labour diffèrent d'une année à l'autre et sont gouvernées par la culture qui a précédé le labour. Par exemple, s'il s'agit d'une céréale d'hiver, le labour aura lieu fin octobre voire début novembre. Mais dans le cas de l'implantation d'une CI, la destruction du couvert avec enfouissement lors du labour se fera plutôt mi-novembre/début décembre voir janvier en fonction des conditions. La période de labour est aussi fonction du type de sol. Dans des sols lourds de type argile, le labour se fait avant l'hiver. Par contre pour des sols légers (limons – sableux), le labour se fait après l'hiver, sinon, il y a des risques que le sol se referme.

Débuter la culture de CIPAN le plus tôt possible (début août) permet de bénéficier au maximum de ses avantages. Le respect des exigences biologiques des espèces plantées aide aussi à maximiser les chances de levée et garantit la bonne croissance de la CIPAN ([SillonBelge, 2020](#)). Prenons le cas de la moutarde semée après le déchaumage de la céréale d'hiver. Le semis prématué entraîne des difficultés de levées et une montée en graines précoce à cause des risques de sécheresse. Tandis qu'un semis tardif, lorsque les températures sont faibles, conduit à une faible production de biomasse, particulièrement si la destruction

du couvert se fait en novembre. Pour éviter des désagréments, il faut semer la CI pendant sa période optimale.

**Devenir des CIPAN** Dans la plupart des cas, les CI qui sont des mélanges, sont récoltés sous forme d'ensilage ou de préfané. 65 à 80 jours environ sont requis entre le semis et la récolte selon les espèces et les mélanges pour récolter à un stade optimal ([De Toffoli et al., 2013](#)). En absence d'obligation agroenvironnementales, et, en présence de situations climatiques favorables, certains CI pourront également être pâturés en fin de saison, s'il ne s'agit pas d'engagements agroenvironnementaux. Le matériel présent sur la ferme influencera le type de récolte, de conservation et de distribution. En cas de récolte supplémentaire au printemps, il faudra prévoir des espèces non gélives. Par contre, la destruction fin d'automne sera facilitée par l'utilisation d'espèces gelant rapidement.

En outre, les CIPAN peuvent être enfouies pour restituer à la culture suivante l'azote enmagasiné lors des processus de minéralisation, c'est d'ailleurs le cas sur la parcelle de Lonzée. Cette opération se réalise idéalement en fin novembre-début décembre surtout chez les espèces crucifères et graminées à l'exemple de la moutarde et l'avoine. Toutefois, la présence des CIPAN n'empêche pas un apport de fertilisant à la culture de printemps qui va suivre. Pour être valorisés en Surface d'Intérêt Écologique (SIE), les CIPAN doivent répondre à deux législations, à savoir : (1) le couvert doit se composer de minimum 2 espèces appartenant à 2 espèces de familles botaniques distinctes, parmi les Graminées, les Légumineuses, les Crucifères, les autres familles. Avec une obligation de rester 3 mois sur la parcelle avant leur destruction. De plus, (2) l'historique des interventions de l'agriculteur qui met des SIE en place doit être renseigné dans un carnet de champ. Enfin, 0,1 ha de CIPAN équivaut à 0,3 ha de SIE. Les cultures intermédiaires de longues durées (exemple de la vesce velue) sont celles qui restent sur la parcelle au-delà de la date réglementaire (15 novembre), jusqu'au semis de la culture suivante.

Suivant leurs utilisations, les CI ont des valeurs ajoutées agronomiques et environnementales à savoir :

- Recyclage des nutriments (contre lixiviation des nitrates par exemple),
- Fixation symbiotique de l'azote atmosphérique,
- Seconde production (culture à cycle court récoltée mature ou production de fourrage sur pied ou fauché),
- Contrôle des adventices,
- Production de biomasse plus élevée sur la parcelle,
- Tout au long de sa présence sur la parcelle, la CI diminue le lessivage et l'érosion et par conséquent protège les nappes phréatiques.

## .4 Incertitudes liées au forçage radiatif en équivalent $CO_2$

Le calcul du forçage radiatif et sa conversion en équivalent  $CO_2$  comprend des variables qui s'accompagnent d'incertitudes. Selon Carrer *et al.* (2018) l'incertitude estimée due à la méthode de conversion en équivalent  $CO_2$  est de l'ordre des 8 %. En outre, la valeur de l'incertitude dépend des données définies par l'utilisateur et des valeurs par défaut des différentes variables. Il faut donc s'attendre à une erreur globale pour les émissions d'équivalent  $CO_2$  d'environ  $\pm 35\%$  (Muñoz *et al.*, 2010).

Dans ce travail, l'incertitude du Rf pourrait être chiffré par une équation de propagation des erreurs (Liu *et al.*, 2022). Il correspond à la racine carrée de la somme au carré des écarts types de chaque variable sur la variable elle-même et se calcule avec l'Equation 1. Le calcul n'est pas très conservatif.

$$\Delta R_f / R_f = \sqrt{(\Delta SW_{in} / SW_{in})^2 + (\Delta T_a / T_a)^2 + (\Delta(\Delta\alpha) / \Delta\alpha)^2} \quad (1)$$

Lors de la conversion en équivalent  $CO_2$ , des incertitudes supplémentaires peuvent résulter de la réponse impulsionale  $y_{CO_2}(t) = IRF_{CO_2}(t)$  et de l'efficacité radiative du  $CO_2$ . Cependant, ces sources d'incertitude ne sont pas prises en compte dans l'étude actuelle. Dans certains cas d'études, l'incertitude sur l'équivalent carbone a été considérée comme étant propagée à partir du forçage radiatif local (Liu *et al.*, 2022).

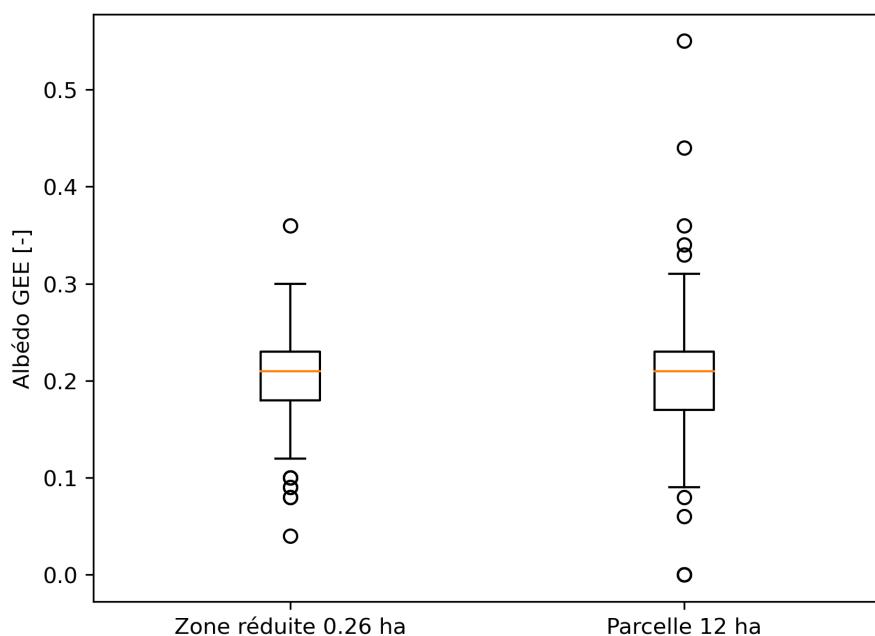
Dans notre étude, l'inventaire des sources principales d'erreurs apporte les informations suivantes :

- Le  $SW_{in}$  n'est pas entaché d'erreurs car il est issu des mesures ICOS,
- La transmittance est issue du calcul de  $SW_{in}$  et  $SW_{TOA}$ , calculé au départ de mesures ICOS également donc nous supposons que les erreurs sont négligeables.
- La variation d'albédo ( $\Delta\alpha = \alpha_{CI} - \alpha_{Ref}$ ), comme l'albédo est calculé au départ des données mesurées par ICOS, nous considérons que ces erreurs sont également négligeables. Pour l'albédo de référence, deux approches ont été utilisées pour sa détermination, de ce fait, sont des potentielles sources d'erreurs.

## .5 Étude de l'hétérogénéité de la parcelle d'étude

### .5.1 Réduction de la parcelle d'étude

Dans la documentation du CNR4 on peut lire : « 99% de l'entrée des capteurs inférieurs provient d'une zone circulaire avec un rayon de 10 h » où h est la hauteur de mesure. Tenant compte de la hauteur qui est de 2,9 m, nous pouvons considérer un rayon de 29 m et donc la surface couverte sera  $S = 2642 \text{ m}^2$  soit 0,26 ha autour du point de mesure. En comparant les valeurs d'albédos obtenues sur la parcelle d'étude à celles obtenues sur la zone d'étude (Figure .2), nous observons la présence d'une grande variabilité spatiale au niveau de la parcelle. Le point qui va suivre apporte plus d'explications à ce constat.



**FIGURE .2 – Diagramme en "boîtes à moustaches" de l'albédo en fonction de la zone d'étude.** Les valeurs de pixels de la zone d'empreinte ont été comparées à celles qui étaient extraites à l'échelle du polygone initial. Les lignes dans les boîtes représentent la médiane. Les extrémités des boîtes représentent respectivement les quartiles inférieur et supérieur. Les "moustaches" s'étendent aux points qui se situent dans un intervalle de 1,5 fois l'écart interquartile du quartile inférieur et supérieur. Les observations qui se situent en dehors de cet intervalle sont affichées indépendamment

### .5.2 Variabilité spatiale

Les cartes de la Figure .3, montrent les problèmes d'hétérogénéité de l'albédo énumérés à la Section 4.1. Toute fois, la tour à flux se situe sur une portion homogène de la parcelle d'étude. Les deux cartes correspondent aux valeurs moyennes d'albédos sur une partie de l'hiver 2018 et l'été 2019.

## ANNEXES

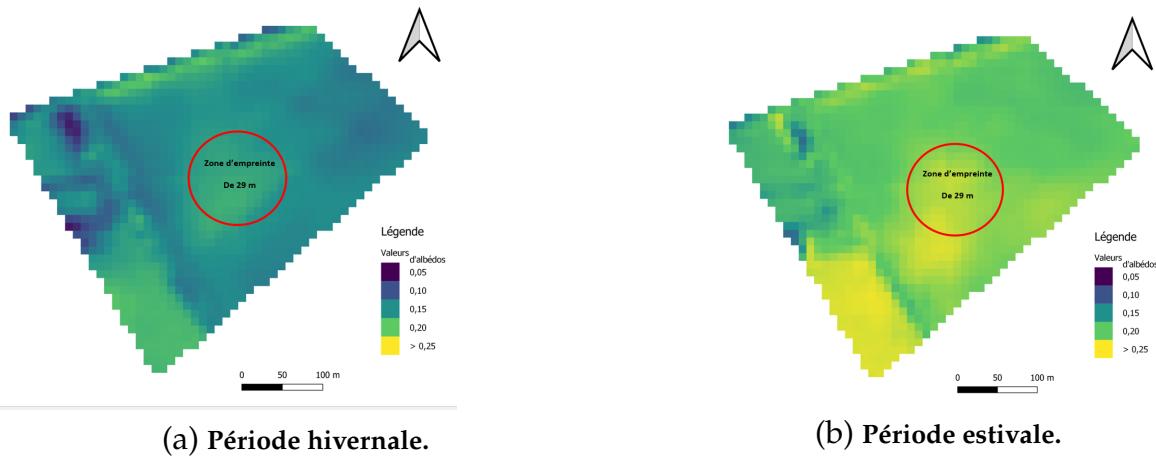


FIGURE .3 – Valeurs d’albédos de la parcelle d’études pendant deux situations d’albédos opposées. La carte correspond à une moyenne d’albédos sur les périodes d’intérêt.

### .5.3 Albédo moyen et médian

Après réduction de la zone d’étude, une comparaison entre l’albédo moyen et l’albédo médian des produits Sentinel-2 pour la zone d’empreinte de 29 m a été faite. Cette comparaison avait pour but de vérifier l’homogénéité de la zone réduite.

Les valeurs moyennes et médianes d’albédos obtenues avec les satellites varient entre 0,07 et 0,28 (Figure .4). En comparant ces valeurs, on constate qu’elles sont quasiment identiques. Par conséquent, il n’y a pas de variabilité spatiale intra-parcellaire dans la zone tampon de 29 m de rayon. Comme les deux grandeurs se tiennent bien, choisir l’une ou l’autre n’aura pas un grand impact dans le travail. Pour la suite des analyses, les valeurs moyennes d’albédos sont celles qui seront utilisées.

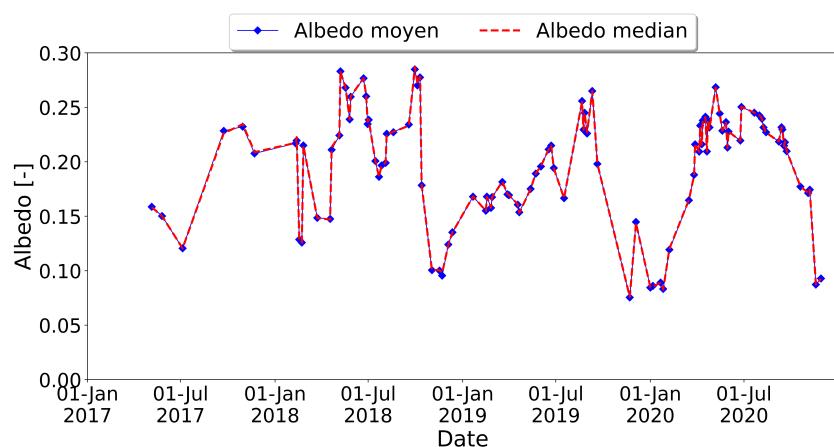


FIGURE .4 – Dynamique de l’albédo moyen et médian obtenue avec Sentinel-2 à Lonzée. Entre le 1 janvier 2017 et le 31 décembre 2020.

## .6 Résultats des régressions entre l'albédo et ses variables explicatives

L'albédo de référence a été modélisé dans ce travail en utilisant l'approche 1 et 2 décrites dans la Section 4.2.1. Les statistiques des régressions obtenues années après années pour le sol après déchaumage et le sol après labour des données récentes ( Figures .5 et .6) et données historiques (Figure .7 et Figure .8 ) sont représentées ci-dessous. Seules les valeurs moyennes sont représentées dans le travail principal à la Section 5.3.2.

### .6.1 Données récentes

Les données récentes correspondent à celle de la période d'étude c'est à dire de 2017 à 2020.

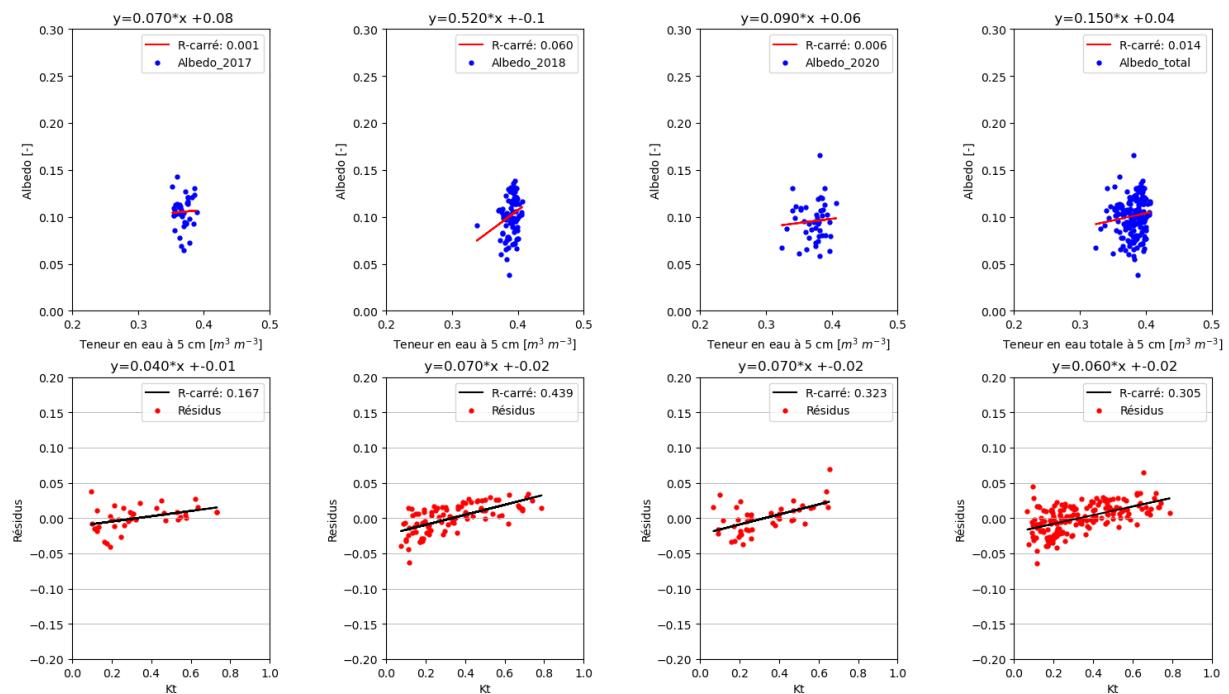
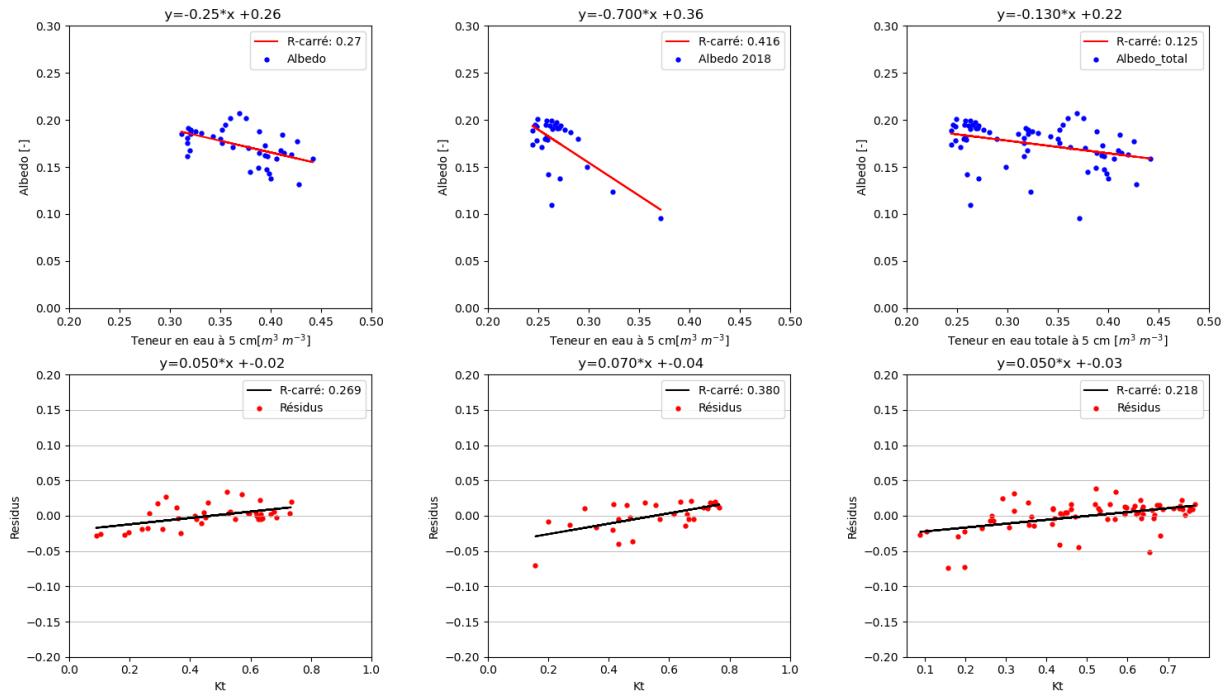


FIGURE .5 – Relation albédo et teneur en eau, résidus de régression et Kt pour le sol après déchaumage des années récentes. Relation albédo et teneur en eau (bleu), résidus de régression et Kt (rouge) pour le sol après déchaumage des années récentes.

## ANNEXES



**FIGURE .6 – Relation albédo et teneur en eau, résidus de régression et K<sub>t</sub> pour le sol après labour des années récentes.** Relation albédo et teneur en eau (bleu), résidus de régression et K<sub>t</sub> (rouge) pour le sol après labour des années récentes.

## .6.2 Années historiques

Les données historiques correspondent aux années 2005, 2007 et 2011.

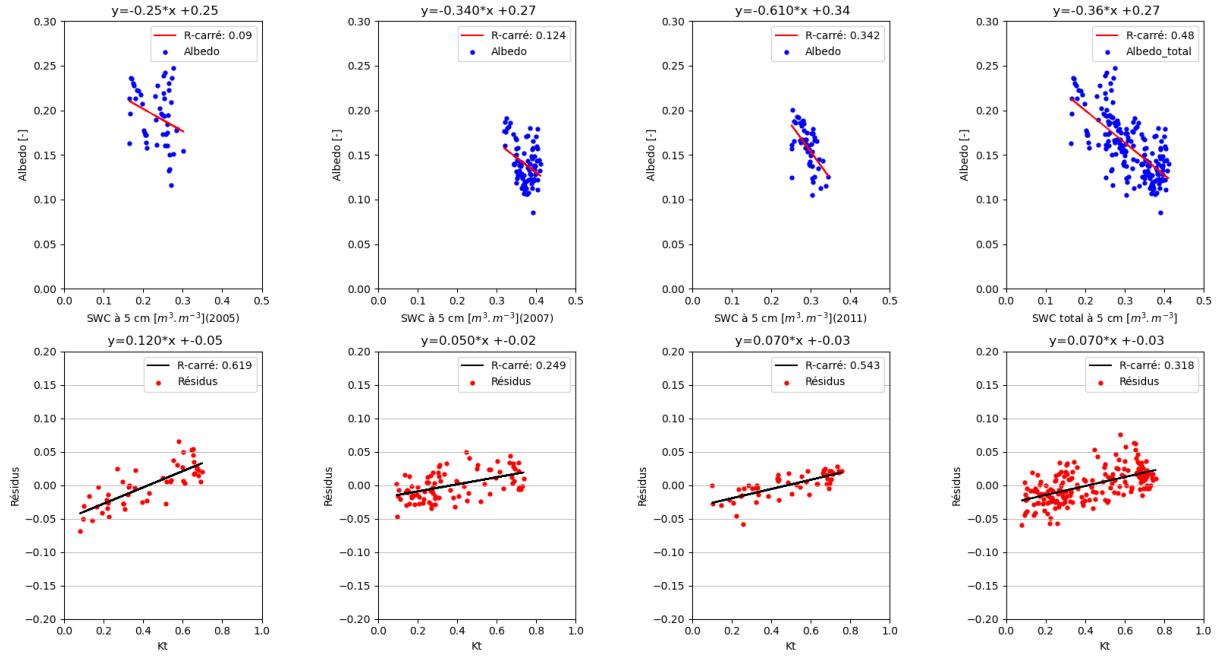


FIGURE .7 – Idem que la figure .5, pour les années historiques. Relation albédo et teneur en eau (bleu), résidus de régression et Kt (rouge) pour le sol après déchaumage des années historiques.

## ANNEXES

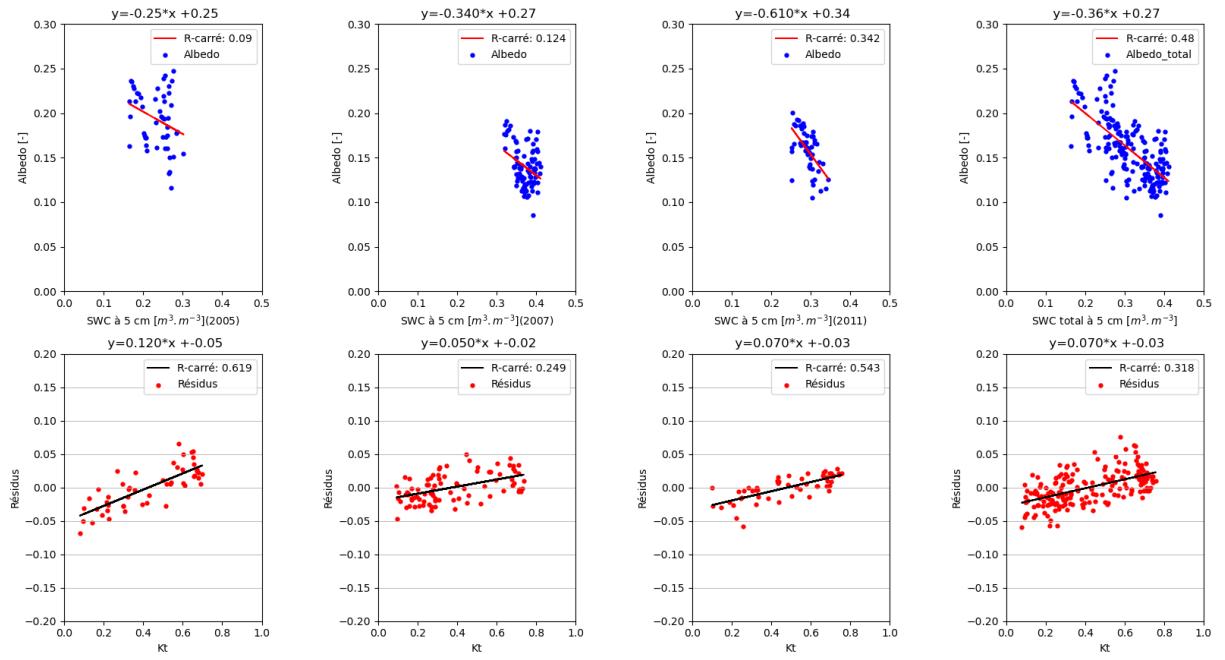


FIGURE .8 – Idem que la Figure .6, pour les années historiques. Relation albédo et teneur en eau (bleu), résidus de régression et Kt (rouge) pour le sol après déchaumage des années historiques.

## .7 Cahier de terrain

La présence du biais technique a réduit la période d'étude de ce travail de (2017 à 2020). C'est moins que la durée normale d'une rotation à Lonzée qui est de 4 ans. Les dates et les activités de gestion des cultures obtenues grâce aux cahiers de terrain de Lonzée sont reprises dans la Table .2. Pour avoir la série complète des activités de gestion de la parcelle, le lecteur est invité à se référer à l'article de ([Buyssse et al., 2017](#)).

TABLE .2 – État de la parcelle de Lonzée entre 2017 et 2020.

Date de début	Date de fin	Occupation du sol
01-01-17	03-03-17	Sol labouré
04-03-17	28-07-17	Froment
		<i>29 au 30-07-2017 Récolte de froment</i>
29-07-17	05-09-17	Sol après récolte
		<i>06 au 07-09 2017 Déchaumage et semis de la moutarde</i>
08-09-17	26-09-17	Sol après déchaumage
08-09-17	09-12-17	Moutarde
		<i>10-12-2017 Destruction de la moutarde et labour</i>
11-12-17	01-04-18	Sol labouré
02-04-18	24-07-18	Pomme de terre
25-07-18	10-09-18	Défanage de la pomme de terre
		<i>11-09-2018 Travail superficiel du sol et semis du froment</i>
12-09-2018	21-10-18	Sol après travail superficiel
22-10-18	31-07-19	Froment
		<i>01-08-2019 Récolte de froment</i>
02-08-19	08-08-19	Sol après récolte
		<i>09-08-2019 Déchaumage et semis de l'avoine/fèverole</i>
10-08-19	31-08-19	Sol après déchaumage
01-09-19	05-12-19	Avoine/fèverole
		<i>05,06-12-2019 Destruction de l'avoine/fèverole et labour</i>
07-12-19	30-03-20	Sol labouré
01-04-20	14-11-20	Betterave
		<i>15,16-11-2020 Récolte de la betterave et labour</i>
17-11-20	31-12-20	Sol labouré

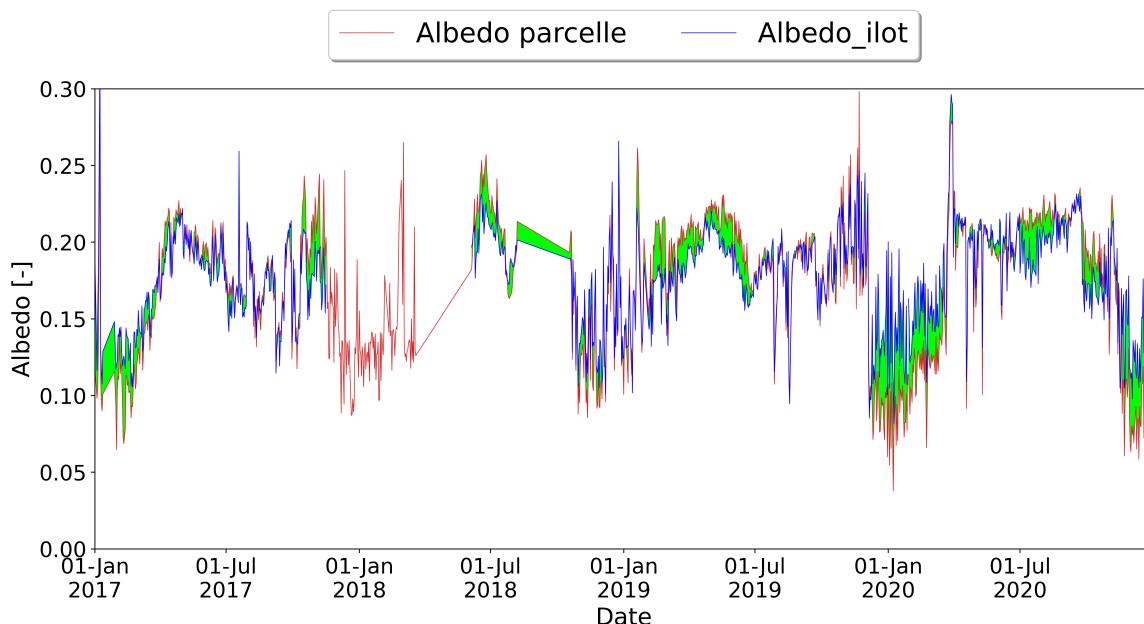
## ANNEXES

### .8 Albédo îlot vs. albédo parcelle

Depuis le début des mesures en 2004 et jusqu'en avril 2016, le mât de mesures se trouvait sur l'îlot central de la parcelle agricole de Lonzée . Cette position de l'instrument a influencé la qualité des mesures du rayonnement réfléchi. Afin de résoudre ces problèmes et ainsi permettre la labélisation ICOS en fin 2017, deux améliorations ont été faites :

1. L'îlot central a non seulement été réduit, mais aussi désormais en dessous de ce dernier est cultivée à la main la même culture qui se trouve sur la parcelle.
2. Le mât principal de mesure a été déplacé sur parcelle pour améliorer la précision des capteurs.

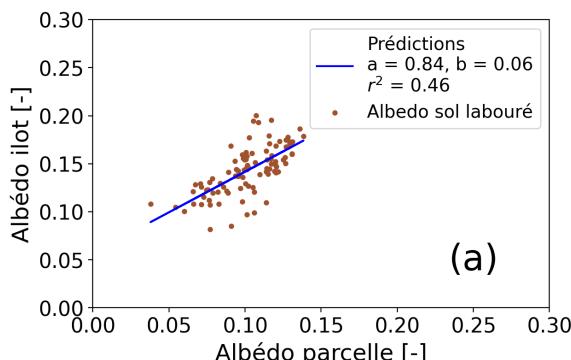
L'objectif de cette partie est de voir si, sur base des mesures au champ, il serait possible de remonter à des périodes historiques où l'instrument de mesures était positionné au mauvais endroit (sur l'îlot).



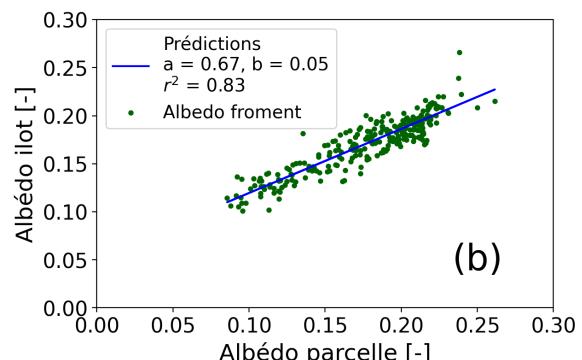
**FIGURE .9 – Évolution temporelle de l'albédo de l'îlot central et celui de la parcelle entre 2017 et 2020.** La partie en vert du graphe représente la différence entre les deux courbes.

Les albédos mesurés sur la parcelle et l'îlot central varient entre 0,06 et 0,3, l'axe des albédos a été limité à 0,3 pour pouvoir mieux observer les variations (Figure .9). Les différences entre les deux albédos sont plus marquées lorsque le sol est labouré et très faible pour des périodes avec cultures. Par contre sur sol nu, la différence entre les deux albédos peut aller jusqu'à 0,05 (voir janvier 2017). L'ordre de grandeur des différences est assez important et pourrait avoir une grande influence sur les valeurs d'albédos obtenues.

La relation entre l'albédo de l'îlot et celui de la parcelle pour une période (26-12-2019 au 10-03-2020) de sol labouré (Figure .10 a) et une période (22-10-2018 au 01-08-2019) de croissance de froment (Figure .10 b) ont été établis. Une plus grande variation des albédos est observée pour le sol labouré et le  $R^2$  est de 0,46. Par contre les albédos en présence de froment sont assez bien corrélés et la valeur du  $R^2$  est de 0,83. Ces statistiques sont cohérentes avec ce qui était déjà observable sur la figure .9. Ces différences selon nous pourraient être expliquées par l'absence du labour sur l'îlot, vu que l'albédo de la parcelle est inférieur à celui de l'îlot à ce moment-là. En effet, le labour du sol assombri la surface, et, par conséquent, diminue la valeur d'albédo. Le travail du sol influe sur l'albédo de la surface car il modifie les conditions de surface du sol, les fractions de couverture des résidus de culture, et, éventuellement, les fractions de couverture neigeuse en hiver ([Liu et al., 2021](#)).



(a) Période de sol nu.



(b) Période de froment.

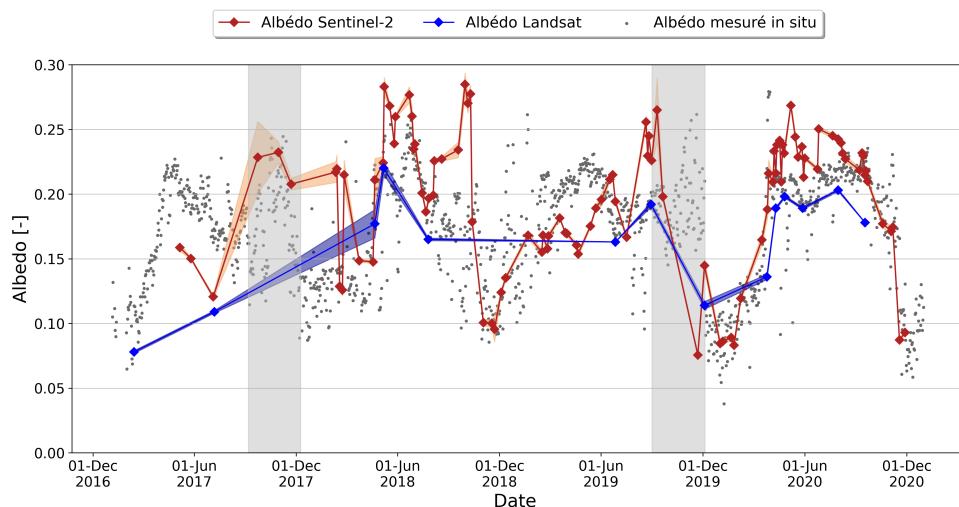
FIGURE .10 – Relation albédo parcelle Vs îlot pour (a) période de sol labouré; (b) période de culture de froment.

En définitive, l'état de l'îlot central avant 2017 reste inconnu car nous n'avons pas d'images ni d'informations dans le cahier de terrain. Le biais technique a été chiffré et se marque surtout quand on est sur des périodes de sol nu. À Lonzie, le biais trouvé n'est pas instrumental, il serait plutôt lié à la localisation des instruments de mesures. Par conséquent, en remontant dans les années historiques (avant 2017), il y a un risque de faire une erreur moyenne de 0,018 sur l'albédo, sachant que la gamme (comprise entre 0 et 1) d'albédo n'est pas assez grande.

## ANNEXES

### .9 Albédo Landsat vs. Sentinel-2

Les valeurs d’albédos obtenues avec Landsat sont toujours inférieures à celles obtenues via à Sentinel-2 (Figure .11). La comparaison de ces deux résultats donne une idée de l’hétérogénéité de l’albédo au niveau de la parcelle et permet d’avoir le contrôle de l’effet capteur sur les valeurs d’albédos obtenues. À un moment donné, de ce travail, nous avons voulu agrandir la période d’étude et retourner dans les données historiques, avant la date de lancement de Sentinel-2. Compte tenu de la taille de la zone d’étude (12 ha), la résolution spatiale de 30 m du satellite Landsat pourrait être suffisante. Après essai, la Figure .11 montre que la fréquence temporelle et la résolution spatiale de Landsat sont moins bonnes comparées aux résultats de Sentinel-2. Par conséquent, Les images obtenues avec Landsat ne sont pas adaptées au site de Lonzée. Ces constats, ajoutés au fait qu’avant l’année 2017 le mât de mesure se trouvait sur l’îlot central, nous ont contraint à n’utiliser que les images Sentinel-2 dépourvues de nuages tout au long de ce travail.



**FIGURE .11 – Évolution temporelle de l’albédo Landsat et Sentinel-2.** Les lignes et les aires colorées représentent respectivement l’albédo moyen et l’erreur standard associée à l’albédo moyen. Les deux albédos satellitaires sont obtenus sur la zone tampon de 29 m de rayon entre le 01 janv. 2017 et le 31 déc. 2020

La Figure .11 permet d’observer un décalage des valeurs d’albédos satellitaires (Landsat et Sentinel-2) avec les valeurs d’albédos *in situ* de septembre à décembre 2019. Si les deux satellites, qui sont indépendants l’un de l’autre, observent la même dynamique au même moment, deux causes pourraient aider à expliquer cela. (1) Soit l’estimation de l’albédo obtenu par les bandes spectrales omet une information, sachant que l’on pourrait se fier aux données *in situ* car la qualité des données ICOS est garantie. (2) Soit il y a une caractéristique physiologique du mélange avoine/féverole qui perturberait la réflexion sur cet interval de temps.

## .10 Jours de neige

Grâce à la camera phénologique installée à Lonzée depuis 2008, il est possible de recueillir des images journalières de l'état de la parcelle. La Table .3 renseigne les différents jours de couverture neigeuse identifiés grâce aux images de la parcelle d'étude.

TABLE .3 – Jours de neige observés pour les stratégies 1 et 2.

	Dates	Années	Nombres de jours
Stratégie 1 Données récentes	01 au 04/01/2017, 07/01/2017, 08/01/2017, 13 au 29/01/2017, 11/02/2017, 01/12/2017, 10/12/2017, 12/12/2017,	2017	27 jours
	06 au 10/02/2018, 12/02/2018, 24 au 27/02/2018	2018	10 jours
	01/03/2018, 03/03/2018	2019	1 jour
	30/01/2019	2020	0
Stratégie 2 Données historiques	–	2005	
	–	2007	
	01 au 06/01/2011	2011	6jours