



**HAL**  
open science

# Estimation spatialisée des rendements et composantes du bilan carbone du colza via une approche combinant télédétection satellitaire à haute résolution et modélisation agronomique

Souleymane Diop

► **To cite this version:**

Souleymane Diop. Estimation spatialisée des rendements et composantes du bilan carbone du colza via une approche combinant télédétection satellitaire à haute résolution et modélisation agronomique. Sciences de l'environnement. 2021. hal-04223345

**HAL Id: hal-04223345**

**<https://hal.inrae.fr/hal-04223345>**

Submitted on 29 Sep 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**Mémoire présenté pour obtenir le diplôme de MASTER 2 Mention GAED  
Spécialité TELENVI (Télédétection/Environnement)**

**Cohabilitation par l'Université Rennes 2 et Agrocampus Ouest**

**Présenté par  
Souleymane DIOP  
Sous la Direction de  
Eric Ceschia**

**Estimation spatialisée des rendements et composantes du bilan  
carbone du colza via une approche combinant télédétection  
satellitaire à haute résolution et modélisation agronomique**



**Soutenance le : 17/09/2021**

**Composition du Jury :**

Eric Ceschia  
Hervé Nicolas  
Simon Dufour  
Samuel Corgne  
Christine Bissuel

**Année Académique 2020-2021**



## Résumé

L'ère de la technologie ouvre une grande voie vers le progrès dans le monde agricole et environnemental. Les scientifiques s'intéressant à la télédétection, à l'agronomie et au numérique se sont groupés autour du projet « Colza Digital » dans l'optique de mettre en place un dispositif de suivi en temps réel la culture du colza. Ce travail s'inscrit dans ce contexte et sa contribution réside dans l'utilisation d'un modèle agronomique piloté par des données télédétection haute résolution spatiale et temporelle (SAFY-CO<sub>2</sub> (Pique et al., 2020a et b)). L'objectif visé est d'estimer les composantes du bilan carbone (GPP, NEE, Reco), la biomasse et les rendements de la culture du colza avec une précision de 10m. L'approche adoptée dans cette étude est de contraindre le modèle à reproduire avec le minimum d'erreurs la dynamique spatio-temporelle du colza à travers l'indice de végétation (GAI) dérivé du satellite qui tient en compte les effets de stress de la culture de manière implicite. Le GAI satellite est utilisé pour calibrer les 6 paramètres phénologiques et le paramètre d'efficacité de la lumière. La validation se fait sur un jeu de données acquises depuis 2005 sur le site d'Auradé.

Le modèle SAFY-CO<sub>2</sub> arrive à reproduire la dynamique du GAI sur les quatre (4) années étudiées (2008-2009 ; 2010-2011 ; 2012-2013 ; 2017-2018) avec des performances statistiques relativement satisfaisantes (R<sup>2</sup> compris entre 0.54 et 0.95 et des RMSE comprises entre 0.15 m<sup>-2</sup>.m<sup>-2</sup> et 0.8 m<sup>-2</sup>.m<sup>-2</sup>). Les dynamiques des composantes de flux CO<sub>2</sub> (GPP, NEE, Reco) sont très bien reproduites par le modèle avec très peu d'erreurs. Quant à la biomasse, SAFY-CO<sub>2</sub> arrive à bien l'estimer sur trois (3) années même si la performance moyenne sur les quatre (4) années reste très satisfaisante (R<sup>2</sup> : 0.86 et RMSE : 321.5 g.m<sup>-2</sup>). L'avantage de cette méthode est qu'elle ne nécessite pas beaucoup de données d'entrées ce qui lui confère la facilité d'être spatialisée à l'échelle du pixel, de la parcelle voire à large échelle.

## Abstract

The age of technology is opening up a great opportunity for progress in the agricultural and environmental world. Scientists interested in remote sensing, agronomy and digital technology have grouped together in the "Colza Digital" project with the aim of setting up a real-time monitoring system for rapeseed (*Brassica Napus L.*) crops. This work is part of this context and its contribution is in the use of an agronomic model driven by high spatial and temporal resolution remote sensing data (SAFY-CO<sub>2</sub> (Pique et al., 2020a and b)). The objective of this work is to estimate the components of the carbon balance (GPP, NEE, Reco), biomass and yields of rapeseed crops with an accuracy of 10m. The approach adopted in this study is to

constrain the model to reproduce with minimum error the spatio-temporal dynamics of rapeseed through the vegetation index (**GAI**) from satellite which takes into account the stress effects of the crop implicitly. The satellite GAI is used to calibrate the six (6) phenological parameters and the light efficiency parameter. The validation is done on a dataset acquired since 2005 on the Auradé site.

The SAFY-CO<sub>2</sub> model is able to reproduce the GAI dynamics over the four (4) years studied (2008-2009; 2010-2011; 2012-2013; 2017-2018) with relatively satisfactory statistical performances ( $R^2$  between 0.54 and 0.95 and RMSE between 0.15 m<sup>-2</sup>.m<sup>-2</sup> and 0.8 m<sup>-2</sup>.m<sup>-2</sup>). The dynamics of the CO<sub>2</sub> flux components (GPP, NEE, Reco) are very well reproduced by the model with few errors. As for the biomass, SAFY-CO<sub>2</sub> manages to estimate it well over three (3) years even if the average performance over the four (4) years remains very satisfactory ( $R^2$ : 0.86 and RMSE: 321.5 g.m<sup>-2</sup>). The advantage of this method is that it does not require a lot of input data, which makes it easy to spatialise at the pixel, plot or even global scale.

*Dédicaces*

*A ma mère Ndeye Salla DIOP pour l'éducation qu'elle m'a inculquée*

*A mon Père Gora DIOP pour son investissement sur mon éducation religieuse*

*A mon frère Mouhamed DIOP pour le soutien physique, moral et financier*

*A mes frères Ousmane, Mansour, Mayoro, Mame Cheikh*

*Et à ma seule et unique sœur Adjé Fatou DIOP*

*A ma douce moitié Rama Ndiaye pour les encouragements et le soutien <3.*

*« The life of every individual has meaning only insofar as it aids in making the life of every living thing nobler and more beautiful »*

*Albert Einstein*

## Remerciements

Ce travail est le fruit d'un labeur collaboratif et chaque contribution aussi infime soit-elle mérite de vifs remerciements.

Par cette présente, je tiens à adresser ma gratitude et ma toute reconnaissance à Monsieur Eric Ceschia Directeur de Recherche à l'INRAE et tuteur principal de ce stage. Merci pour la confiance, les encouragements durant le long du stage, les orientations, les contributions, les corrections, les cours sur la photosynthèse et la respiration des plantes. Vous m'avez aidé à trouver ma voie dans le monde de la Télédétection appliquée à l'Agriculture et pour ça je vous saurais éternellement gré. J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur Rémy Fieuzal Chercheur aguerri au CESBIO et co-tuteur du stage pour les orientations, l'esprit critique, la prise de recul, le sens du détail et les techniques de recherche bibliographique.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit de mon collègue de stage Julie Darre pour les riches échanges en agronomie/écophysiologie, les discussions sur les sujets philosophiques, sociétales, environnementales et pour sa bonté hors du commun. Je remercie Taeken Wijmert pour la formation SAFY-CO<sub>2</sub>, les riches échanges sur un pléthore de sujet, ses orientations, ses sages conseils et les dépannages informatiques 😊. Je remercie également Ahmad Al Bitar pour la formation SAFY-CO<sub>2</sub>, ses orientations en recherche, ses conseils et la sortie de terrain instrumentation que j'ai beaucoup appréciée. Je remercie également toute l'équipe SAFY-CO<sub>2</sub> Gaétan Pique (ses travaux sont des œuvres sacrées pour moi), Ludovic Arnaud, Morgan Ferlicoq et à tous les membres du CESBIO pour l'accueil chaleureux.

Ce travail ne pourrait être fait sans une solide formation en amont, à cet effet j'adresse toute ma gratitude et ma reconnaissance envers le corps professoral du Parcours TELENVI au nom de Simon Dufour et Hervé Nicolas. Je remercie également tous mes promotionnaires (Pape, Marion, Shiva, Oliver, Matthieu, Quentin, Hortense, Chloé, Léa, Solveig, Charlène, Yoann, Anouk, Hei-Taïna et Antoine) pour la co-assistance durant la période de pandémie.

Mes remerciements les plus chaleureux à ma douce moitié Rama Ndiaye pour le soutien physique, moral et psychologique. Pour les encouragements, les nuits blanches, les apports de correction à mes présentations, les délices du soir et pour tout l'amour qu'elle a envers ma modeste personne.

Mes remerciements les plus vifs vont à l'endroit de ma famille l'individu n'est rien sans le groupe auquel il appartient raison pour laquelle je ne cesse de vous remercier pour les encouragements, l'encadrement, l'éducation et le fait de croire en moi.

## Listes des sigles et acronymes

**BBCH** : Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und CHemische Industrie

**CESBIO** : Centre D'Etudes Spatiales de la Biosphère

**CNES** : Centre National d'Etudes Spatiales

**CNRS** : Centre National de Recherches Scientifiques

**DAM** : Dry Aboveground Mass

**FAO** : Fond des Nations Unies Pour L'Alimentation et l'Agriculture

**GAI** : Green Leaf Area

**GES** : Gaz à Effet de Serre

**GIEC** : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

**GPP** : Gross Primary Production

**ICOS** : Integrated Carbon Observation System

**INRAe** : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement

**IRD** : Institut de Recherche pour le Développement

**NECB** : Net Ecosystem Carbon Budget

**NEE** : Net Ecosystem Exchange

**NEP** : Net Ecosystem Production

**OCDE** : Organisation de Coopération et de Développement Economiques

**OMP** : Observatoire Midi Pyrénées

**PAC** : Politique Agricole Commune

**PIB** : Produit Intérieur Brut

**Ra** : Respiration Autotrophe

**Reco** : Respiration de l'Ecosystème

**Rh** : Respiration Hétérotrophe

**RMSE** : Root Mean Square Error

**SAR** : Synthetic Aperture Radar

# Table des matières

Résumé.....	2
Remerciements.....	5
Listes des sigles et Acronymes.....	6
Introduction Générale.....	9
<b>1 Chapitre I : Contexte, justification de recherche et objectifs.....</b>	<b>10</b>
1.1 Présentation de l'organisme d'accueil .....	10
1.2 Contexte du stage.....	10
1.3 Objectifs du stage.....	11
1.4 Les Tâches réalisées.....	12
1.5 Justification scientifique de recherche .....	13
1.5.1 Les changements climatiques.....	13
1.5.2 L'Agriculture .....	14
1.5.3 Le colza.....	15
<b>2 Chapitre II : Matériels et méthodes.....</b>	<b>20</b>
2.1 Présentation, Description et Localisation du site instrumenté d'Auradé .....	20
2.1.1 Type de sol.....	21
2.1.2 Le climat .....	21
2.2 Présentation et description des données.....	21
2.2.1 Les mesures in-situ.....	22
2.2.2 Les données de télédétection.....	25
2.3 Le modèle SAFY- CO <sub>2</sub> .....	26
2.3.1 Présentation, paramétrisation et calibration .....	26
2.3.2 Les processus simulés par SAFY-CO <sub>2</sub> .....	28
2.3.3 La validation des sorties du modèle.....	31
<b>3 Chapitre III : Résultats et Discussion.....</b>	<b>32</b>
3.1 Evaluation des performances du modèle sur le colza .....	32
3.1.1 L'indice de végétation (GAI).....	32
3.1.2 Les Composantes de flux CO <sub>2</sub> .....	33
3.1.3 Biomasse finale et dynamique de la biomasse.....	44
3.2 Discussion.....	46
3.2.1 Les avantages de la méthode.....	46
3.2.2 Les limites de la méthode.....	46
Conclusion.....	48
Bibliographies et Webographie.....	49
Listes des Tables.....	52

Listes des Figures.....	52
Annexes.....	53

## Introduction Générale

L'agriculture est l'un des leviers les plus puissants pour lutter contre la faim, la pauvreté et permettre l'accroissement des revenus aux populations les plus démunies dans certaines contrées du monde. Elle est un facteur d'accroissement économique et selon la Banque Mondiale, en 2020, elle représentait 42% de la population active et occupait 4% du PIB mondial.

Dans un contexte de changements climatiques, l'agriculture est au cœur des débats scientifiques relatifs aux enjeux du développement durable. Nombreux sont aujourd'hui soucieux de la quantification des rendements des cultures et des besoins en eau pour la production, d'autres se posent des questions quant à l'estimation du bilan carbone dans les parcelles agricoles ainsi que leur capacité à fixer du carbone atmosphérique dans le sol (**Pique et al., 2020a**) constituant un des leviers d'atténuation du changement climatique. Répondre à ces questions reviendrait à faire appel à différents outils physiques et numériques. Dans ce contexte, la télédétection apparaît comme un outil privilégié pour analyser le fonctionnement et la production des parcelles agricoles, et ceci à faible coût sur de vastes espaces géographiques. Elle permet de faire le suivi et l'évaluation de l'état des cultures via des plateformes à distance sans contact matériel direct. L'évolution du numérique a vu émerger d'autres techniques permettant non seulement de faire un suivi des cultures mais aussi de quantifier les rendements, les besoins en eau et les bilans carbone (**Claverie et al., 2012 ; Pique et al., 2020a et b**). Pour ce faire, la modélisation couplée à la télédétection permet de reproduire de manière réaliste et objective le fonctionnement des parcelles agricoles et d'estimer leur production.

Les approches basées sur la mise en œuvre du modèle SAFY-CO<sub>2</sub> en sont des illustrations parfaites. En assimilant des produits d'indice de végétation dérivés des images issues de la télédétection satellitaire (acquises à hautes résolutions spatiales et temporelles), le modèle agrométéorologique fournit une estimation des rendements et du bilan carbone des cultures. C'est un modèle parcimonieux, fonctionnant à un pas de temps journalier, et nécessitant peu de données d'entrée ce qui rend facile la spatialisation. Ce modèle peut être appliqué à différentes cultures, blé (**Pique et al., 2020a**), tournesol (**Pique et al., 2020c**). Dans cette étude, il sera appliqué à une nouvelle culture : le colza. L'objectif de ce stage était de paramétrer et valider le modèle SAFY-CO<sub>2</sub> au colza sur différentes années dans le but de simuler les composantes de flux CO<sub>2</sub> ainsi que la biomasse.

# 1 Chapitre I : Contexte, justification de recherche et objectifs

## 1.1 Présentation de l'organisme d'accueil

Ce travail s'est effectué au Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (**CESBIO**) de Toulouse entre le 08 février et le 08 août 2021. Le CESBIO est une unité mixte de recherche (**UMR 5126**) sous tutelle du Centre National d'Etudes Spatiales (**CNES**), du Centre National de la Recherche Scientifique (**CNRS**), de l'Institut de Recherche pour le Développement (**IRD**) et de l'Université Paul Sabatier (Toulouse III). C'est aussi une entité sous contrat avec l'Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (**INRAe**) et faisant partie également de l'Observatoire Midi Pyrénées (**OMP**).

Le but de ce laboratoire de recherche est de développer des connaissances sur les surfaces continentales (en particulier les cultures) et de proposer de nouvelles missions spatiales d'observation de la Terre.

Les travaux qui y sont effectués ont un haut degré d'interdisciplinarité allant des sciences physiques aux sciences de la vie en passant par la modélisation environnementale, l'instrumentation et l'application de la télédétection à l'environnement.

## 1.2 Contexte du stage

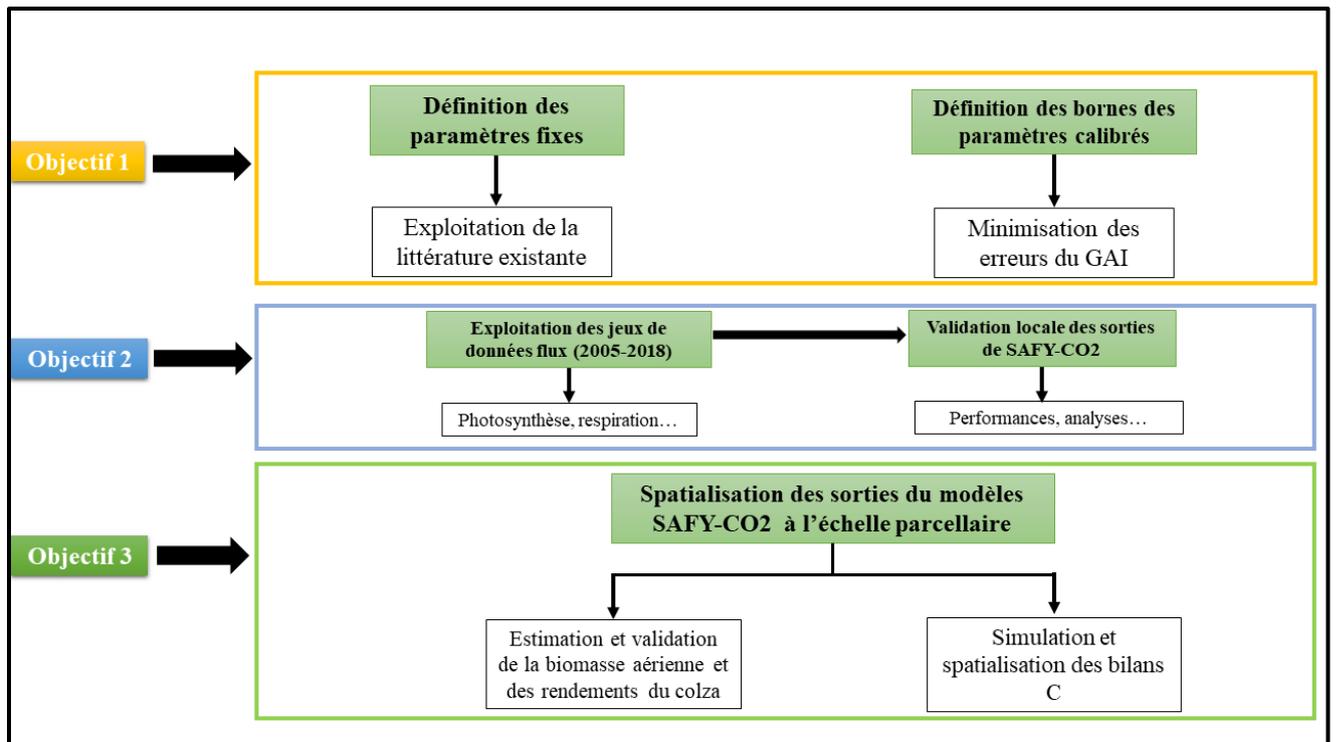
Les nouvelles technologies constituent une porte de progrès pour un éventail de domaines et le monde agricole n'échappe pas à la règle. Ainsi, plusieurs organismes scientifiques à l'image du CESBIO, Terres Inovia, Airbus, INRAe œuvrant à l'application de la télédétection dans le monde agronomique et environnemental se sont regroupés autour du projet "Colza Digital" pour mettre en place un dispositif de suivi en temps réel de la culture du colza par télédétection. Ce projet s'appuie sur les données gratuites de télédétection satellitaire à hautes résolutions spatiales et temporelles du programme Copernicus de l'Agence Spatiale Européenne (**Sentinel-2 de l'ESA**) et un modèle agronomique développé au CESBIO : SAFY-CO<sub>2</sub> (**Pique et al., 2020a, et b**). Ce modèle piloté à la fois par des mesures in-situ et de l'imagerie satellitaire offre la possibilité d'estimer avec précision (10m de résolution) la biomasse, le rendement et les composantes du bilan carbone des cultures sur de vastes territoires. Cette approche a l'avantage de reproduire avec fidélité les dynamiques spatio-temporelles des cultures à travers les données de télédétection qui, implicitement, prennent en compte les effets des stress biotiques et abiotiques (stress hydriques, manque d'azote...) sur le développement des plantes. Cette originalité fait que le modèle nécessite peu de données de forçage et pas d'informations en ce

qui concerne les pratiques culturales ce qui lui donne l'avantage d'être facilement spatialisable à grande échelle.

L'approche utilisée dans le cadre de ce stage se révèle très utile par exemple pour le marché carbone naissant en agriculture ou pour faciliter l'attribution de primes aux agriculteurs en fonction de leur capacité à stocker le carbone dans les sols dans le contexte de verdissement de la Politique Agricole Commune (PAC). Il permet également de quantifier la production et le rendement des cultures à différentes échelles. Son application à grande échelle constitue un avantage certain pour atteindre les objectifs visés dans le cadre de l'atténuation des impacts du changement climatique où le stockage carbone dans sols agricoles constitue sans aucun doute un des principaux leviers (**initiative 4/1000**).

### **1.3 Objectifs du stage**

Les objectifs du stage sont déclinés en trois (3) grandes étapes (**Figure 1**). Le premier objectif consistait à définir les paramètres fixes du modèle SAFY-CO<sub>2</sub> pour la culture de colza à partir de données disponibles dans la littérature et à définir les bornes des autres paramètres laissés libres dont les valeurs seront calibrées à partir d'indices de végétation observé sur le terrain ou par télédétection. Le second objectif était d'exploiter les jeux de données de mesures de flux CO<sub>2</sub> (Photosynthèse, Respiration, Échange Net de CO<sub>2</sub>...) acquis sur la parcelle d'Auradé depuis 2005 dans l'optique de valider localement les sorties du modèle. Le troisième objectif consistait à spatialiser le modèle dans différentes conditions pédoclimatiques et pratiques agricoles (sur une trentaine de parcelles en France) pour estimer et valider les biomasses aériennes et les rendements simulés par le modèle.



**Figure 1** : Les étapes et objectifs du stage.

#### 1.4 Les Tâches réalisées

Plusieurs tâches ont été définies durant ce stage. La première consistait à faire de la recherche bibliographique et l'objectif était de chercher des valeurs de paramètres pour la respiration qui sont spécifiques au colza. D'autres paramètres spécifiques au colza ont été aussi recherchés comme la température maximale, minimale et optimale pour la croissance, le coefficient d'extinction, l'indice de récolte etc... Mais l'essentiel de cette bibliographie était axé sur les paramètres de la respiration.

La prise en main du jeu de données de flux CO<sub>2</sub>, de biomasse, GAI constituait la deuxième tâche de ce stage. L'objectif était d'en faire des conversions (ex : passages des mesures semi-horaires à des moyennes ou cumuls journaliers pour les données de météo et de flux CO<sub>2</sub>) dans le but de pouvoir faire les validations des sorties du modèle. Aussi, cette tâche permettait d'avoir une idée de la dynamique des flux, de la biomasse et du GAI sur les différentes années pour se préparer aux exercices de simulation.

La prise en main du modèle codé en python était la troisième tâche. Une mini-formation a été faite dans ce contexte pour comprendre et faire tourner le modèle d'abord sur un autre jeu de données avant de l'appliquer sur les nôtres.

La quatrième tâche consistait à faire une analyse de sensibilité des paramètres du modèle, à savoir les paramètres ciblés lors de la calibration et ceux intervenant dans la respiration. Cette

analyse de sensibilité est faite d'abord avec le GAI obtenu par mesures destructives in-situ, dans l'optique de définir une première paramétrisation du modèle sur le colza. Après avoir fait cet exercice avec le GAI terrain, d'autres exercices de calibrations sont faits avec du GAI satellite afin de définir une nouvelle paramétrisation.

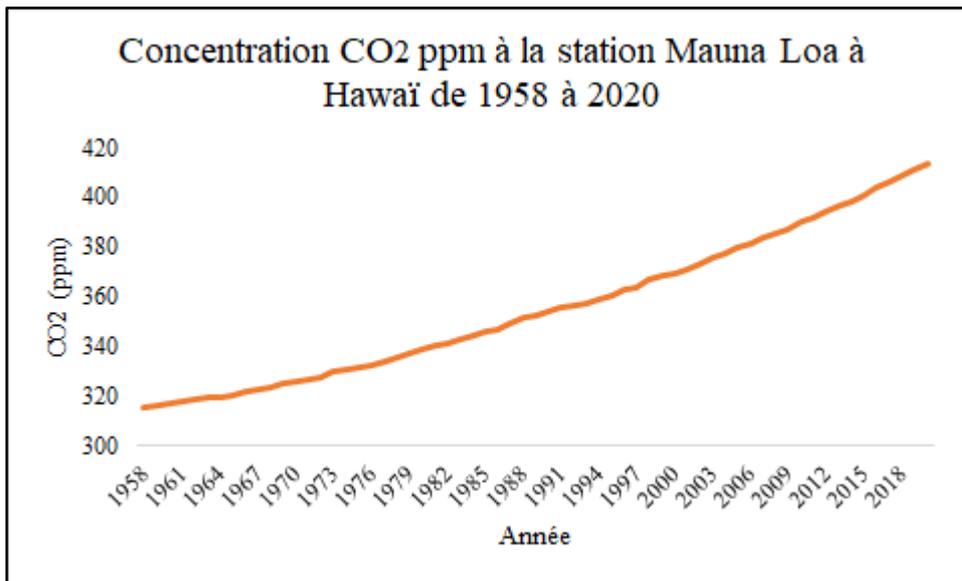
La validation des sorties du modèle constitue la cinquième tâche et par conséquent la dernière. Elles sont faites à partir des estimations du modèle et le jeu de données flux /biomasse acquis sur le site d'Auradé pour quatre (4) années.

La sixième tâche devait être les simulations spatialisées des rendements et du bilan carbone. Par manque de temps, cette tâche n'a pas été réalisée du fait qu'on a pris un peu retard sur la recherche bibliographique des paramètres de respiration spécifiques au colza.

## **1.5 Justification scientifique de recherche**

### **1.5.1 Les changements climatiques**

Les changements climatiques sont aujourd'hui l'un des principaux facteurs du déséquilibre écologique, économique et social dans le monde. Depuis l'ère industrielle jusqu'à nos jours, les émissions et la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère ne cessent d'augmenter et ceci contribue en grande partie au réchauffement global. En effet, **Arrhenius** en 1896 avait démontré qu'il existe une relation directe entre concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et température de l'air. L'hypothèse d'**Arrhenius** confirmée au cours du 20e siècle a entraîné une prise de conscience mondiale avec la création du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (**GIEC**) en 1988. Le travail du GIEC consiste à étudier et quantifier le réchauffement climatique global en corrélation avec les activités anthropiques. D'après le GIEC, les émissions cumulées s'élèvent à plus de 2000 Giga tonnes de CO<sub>2</sub> depuis l'ère industrielle dont près 60% sont piégées par les puits naturels et le reste se sont concentrées dans l'atmosphère soit près de 800 Gigas tonnes de CO<sub>2</sub> en 2014. Les dernières mesures de concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère enregistrées à la station historique de Mauna Loa à Hawaï en mars 2021 est de l'ordre de **417,64 ppm\*** (**Figure 2**) soit un peu plus de 1,4 fois qu'avant l'ère préindustrielle où elle était de **280 ppm** (**GIEC, 2014**).



**Figure 1 :** Concentration CO<sub>2</sub> dans l’atmosphère en moyenne annuelle à Mauna Loa (NOAA, <https://fr.co2.earth/co2-records>)

Le CO<sub>2</sub> contribue à l’absorption d’une portion du rayonnement infrarouge terrestre et participe au réchauffement de l’atmosphère d’où le nom d’effet de serre. Ce dernier est un phénomène naturel permettant de maintenir l’équilibre de la température moyenne de terre et il est perturbé aujourd’hui par les activités anthropiques. Depuis l’ère industrielle, les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) à l’image du CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>... ne cessent de croître, se traduisant par une augmentation de la température moyenne de la terre et par conséquent au réchauffement de la planète.

Plusieurs secteurs participent aux émissions de GES : l’industrie, l’immobilier, l’agriculture... L’agriculture dans sa globalité est un secteur polluant, elle participe à hauteur de 11 à 12% des émissions de GES d’origines anthropiques dont le CO<sub>2</sub>. Néanmoins, le secteur agricole a la capacité de capter et de stocker le carbone atmosphérique dans le sol à travers l’enfouissement des résidus de biomasse. Ce stockage peut être quantifié par le modèle **SAFY-CO<sub>2</sub>**. Ce dernier permet de simuler les processus de stockage de carbone du sol sur de larges territoires. Il donne aussi la possibilité de quantifier les effets des pratiques agricoles comme les couverts intermédiaires permettant d’accroître les apports de biomasse au sol et donc le stockage de carbone.

### 1.5.2 L’Agriculture

L’agriculture est le travail de la terre, c’est une activité de production animale et/ou végétale à partir du sol. Depuis la révolution néolithique (+ de 10 000 ans environ), cette activité ne cesse d’évoluer tant sur le plan technique que sur les pratiques, les méthodes et les modes de

production. Aujourd'hui face à la forte pression démographique, la demande en nourriture ne cesse de croître. Selon la **FAO** en **2018** la population mondiale est estimée à **7,8 milliards** d'individus et pourrait atteindre **8.5 milliards** en **2030** et plus de **10 milliards** en **2100**. Cette croissance démographique entraîne de fortes modifications des pratiques agricoles (intensification des pratiques). A l'heure actuelle, l'agriculture occupe près de 40% des terres de la planète avec plus de 70% de ces terres essentiellement pâturées (**OCDE/FAO, 2019**). Sur ces 40%, la production oléagineuse occupe une place prépondérante avec une production mondiale estimée à 1050 M de tonnes cultivées sur plus de 300 M d'hectares (**OCDE/FAO, 2019**). Le soja occupe plus de la moitié de la production mondiale d'oléagineux suivi du colza qui représente en 2015 une production de l'ordre de 70 M de tonnes (**FAOSTAT, 2015**).

Des productions d'une telle envergure demandent de vastes parcelles agricoles et des amendements importants. Longtemps c'est la technique d'extensification qui était utilisée pour augmenter la production mais depuis **la révolution verte** on assiste à une production intensive nécessitant d'importantes quantités d'intrants. Ces derniers révèlent très rapidement leurs effets néfastes notamment la pollution de l'eau (les nappes...), des sols (par érosion chimique) et de l'air... Tous ces problèmes combinés aux effets du changement climatique doivent contraindre les producteurs à revoir leurs pratiques pour répondre aux besoins alimentaires tout en minimisant leur impact sur l'environnement et notamment en réduisant leurs émissions de GES voire à stocker du carbone dans le sol pour lutter contre le réchauffement climatique et améliorer la fertilité.

### **1.5.3 Le colza**

Le colza (*Brassica Napus L.*) fait partie des oléagineux, c'est une plante riche en huile et en protéine. Il est destiné à l'alimentation humaine (production d'huile) et animale (tourteaux). Il est semé très souvent au mois de septembre et est récolté fin juin début juillet, couvrant ainsi le sol environ 300 jours. C'est une culture très efficace pour lutter contre l'érosion du sol et le lessivage du fait de son cycle de vie couvrant presque toute l'année. Le colza est un moyen de réduire le cycle des maladies des céréales et des mauvaises herbes dans le cadre d'une rotation des cultures, il absorbe également l'azote du sol en automne et maintient la richesse en matière organique (**Terres Inovia, 2020**).

#### **Les stades phénologiques du colza**

Le colza (*Brassica Napus L.*) possède dix (10) stades phénologiques en se basant sur l'échelle BBCH (**Lancashire et al., 2008**). Le code BBCH sert à identifier les stades phénologiques

d'une plante. Il utilise un système de code décimal subdivisé en stades de croissances (principaux et secondaires). Ces codes sont au nombre de dix (10) à savoir la germination, le développement des feuilles, la formation des pousses latérales, l'élongation de la tige, le développement des organes, l'apparition de l'inflorescence, la floraison, la fructification, la maturité et la sénescence. Cette échelle s'applique au colza ainsi qu'aux autres cultures.

Dans le cadre de ce travail nous allons nous focaliser principalement sur les stades de croissances principaux du colza (**Figure 3**).

- **La levée**

La levée correspond à la phase où la plante est visible à la surface du sol. Elle nécessite un bon contact entre la terre et la graine semée, et une quantité de précipitation allant de 7 à 10mm est requise après le semis. A ce stade, seuls les deux cotylédons sont visibles, la plante n'a pas encore développé de vraies feuilles.

- **Formation de la rosette**

C'est durant ce stade de croissance que les premières feuilles apparaissent. Durant cette phase la présence d'une vraie tige n'est pas observée. Les feuilles étalées et ou déployées passent de 1 puis 2 jusqu'à n feuilles à la fin du stade rosette et au début de la montaison. C'est à partir de cette phase de développement que le colza est visible par satellite.

- **La montaison**

La montaison correspond à la phase de reprise végétative après une étape plus ou moins longue de développement ralenti de la plante. De jeunes feuilles apparaissent et c'est durant cette phase que la tige commence à se développer.

- **L'élongation de la tige**

Au cours de ce stade, la tige se développe rapidement et atteint les 20 cm entre la base de la rosette et les premières inflorescences deviennent visibles.

- **Début de floraison**

Ce stade est caractérisé par l'allongement des pédoncules floraux. Les boutons accolés se séparent durant cette phase ce qui rend visible l'inflorescence.

- **La floraison**

Cette phase est décrite par la première ouverture des fleurs et allongement de la hampe florale.

- **Formation des siliques**

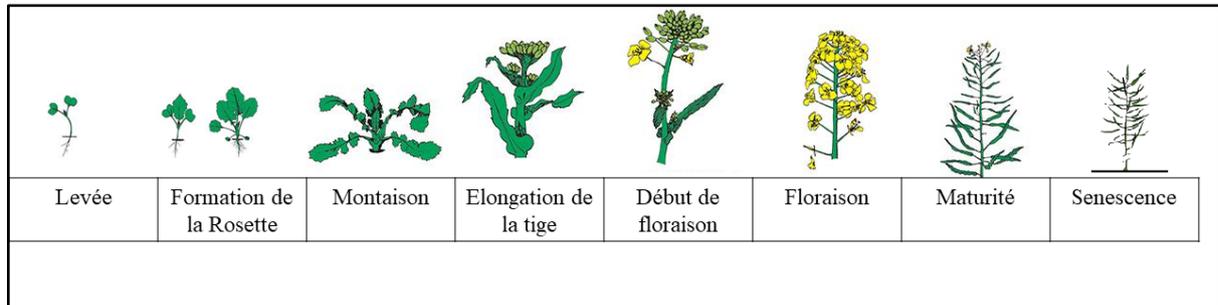
La chute des premiers pétales marque l'apparition des siliques (enveloppes contenant les graines). La floraison des inflorescences secondaire est observée durant ce stade et les siliques se développent progressivement jusqu'à atteindre la maturité

- **La maturité**

La maturité est marquée par le remplissage des siliques qui au début sont vertes et deviennent progressivement beiges puis noires et dures.

- **La sénescence**

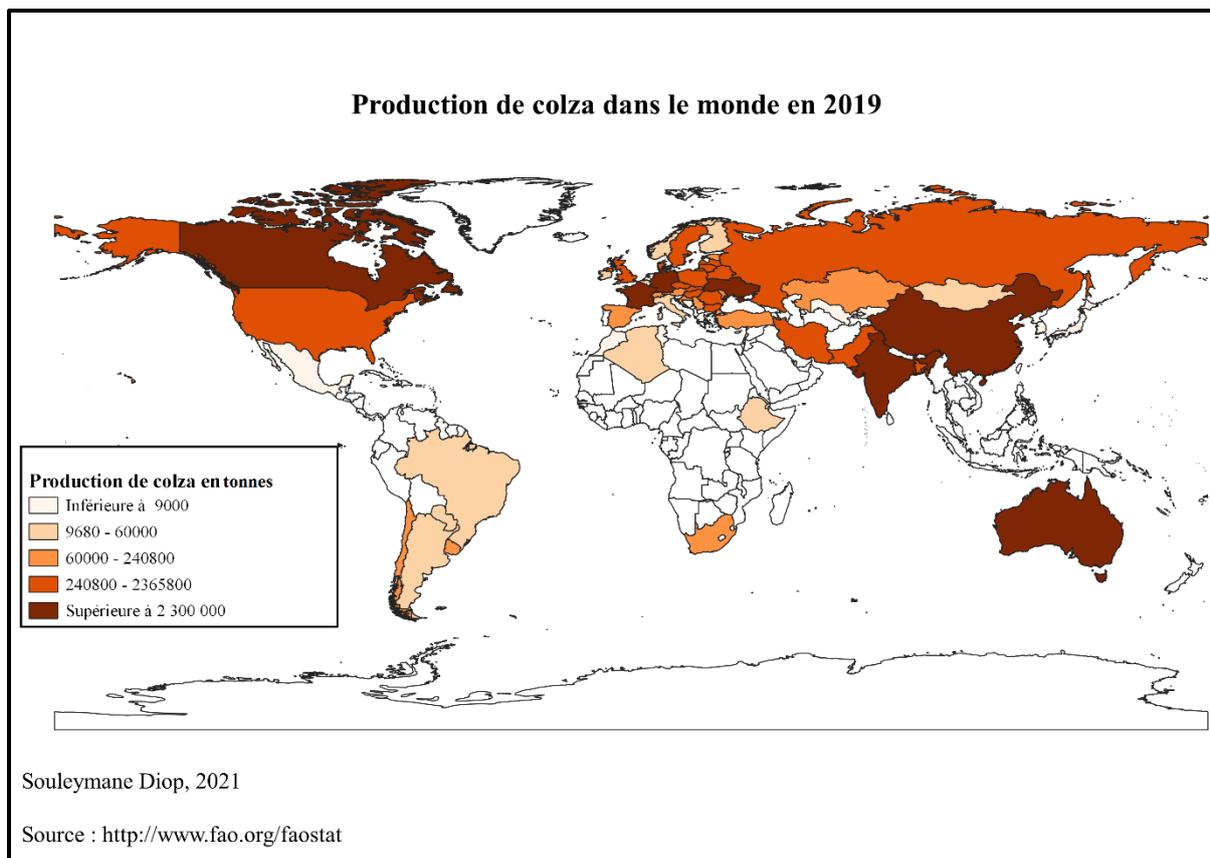
C'est le stade final du développement phénologique de la plante. C'est un processus physiologique caractérisé par le vieillissement et la dégradation progressive de la plante. A ce stade la plante est desséchée et morte donc prête pour la récolte.



**Figure 3** : Les stades de croissances principaux suivant l'échelle BBCH du colza (**Terres Inovia, 2019**)

### **La production colza à l'échelle mondiale**

Le colza représente aujourd'hui une production mondiale de l'ordre de 70 M tonnes (**FAOSTAT, 2019**) et plus de la moitié de cette production se concentre dans les hautes latitudes (**Figure 4**). Le continent asiatique détient plus de 34.2% de la production mondiale de colza suivi de l'Europe avec 32.9% devant l'Amérique, l'Océanie et l'Asie contribuant respectivement 29.3% , 3.4% et 0.2% (**FAOSTAT, 2019**).



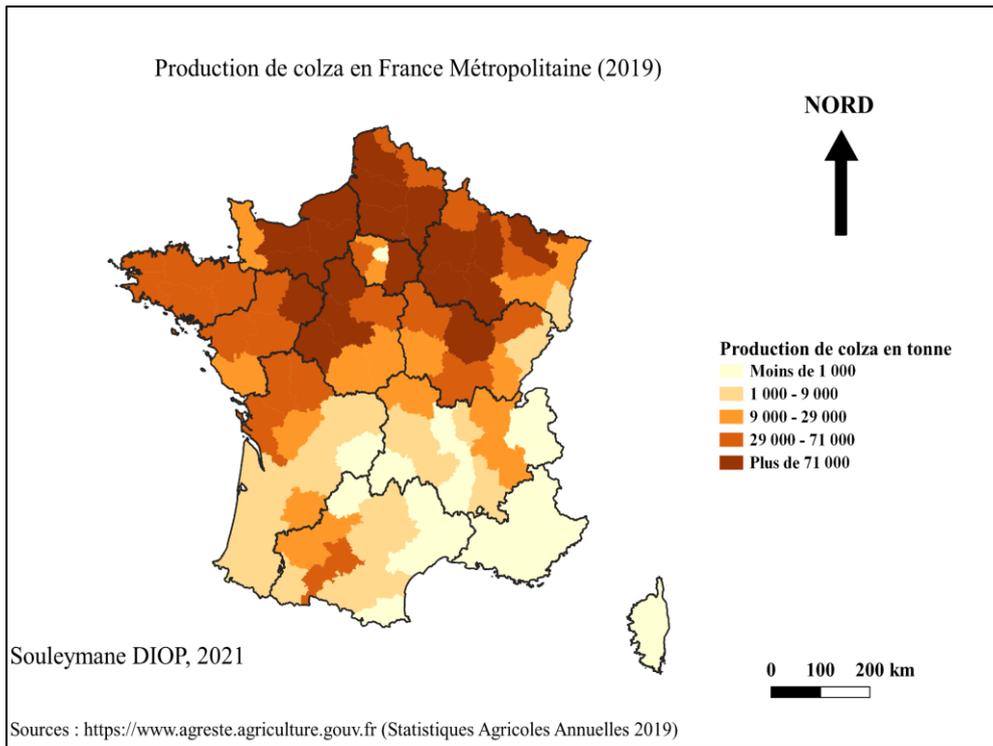
**Figure 4 :** Production de colza à l'échelle mondiale (<http://www.fao.org/faostat> , 2019)

### La production du colza en France

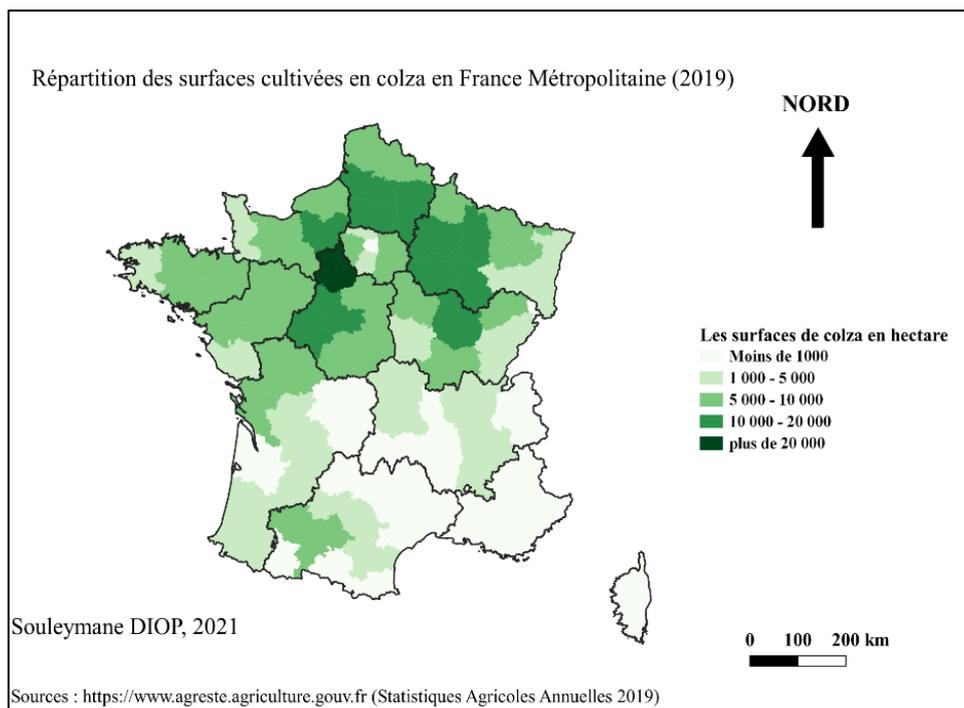
Le colza est l'une des cultures les plus importantes en France. Cultivé sur plus 1,1 millions d'hectares en 2019 (**Terres Inovia, 2020**), la France a opté pour une agriculture durable dans la filière du colza dans les années à venir.

Elle était le premier producteur Européen du colza en 2017 (5,7 M de tonnes) devant l'Allemagne (4.8 M de tonnes) et le quatrième de la planète en 2018 (**FAOSTAT, 2018**) avec un peu plus 8% de la production mondiale derrière le Canada (21.9%), la Chine (16.3%), l'Inde (11.1%).

Les régions françaises du Nord sont les leaders de la production à l'échelle nationale. En 2019, elles concentraient plus de 50% de la production nationale (**Figure 5**) et regroupent les 70% des terres cultivées en colza (**Figure 6**). Le département d'Eure-et-Loir est le leader du colza en France en 2019 avec une production totale de 250 000 tonnes (**Agreste, 2020**) soit 7% de la production nationale sur une superficie de 74 000 hectares, suivi de la Marne qui concentre une production de 178 000 tonnes sur 58 000 hectares de terres cultivables puis le département de l'Eure qui vient en troisième position avec 5% de la production nationale soit 173 000 tonnes (**Agreste, 2020**).



**Figure 5** : Production de colza par département en France métropolitaine en 2019 (Agreste, 2020)

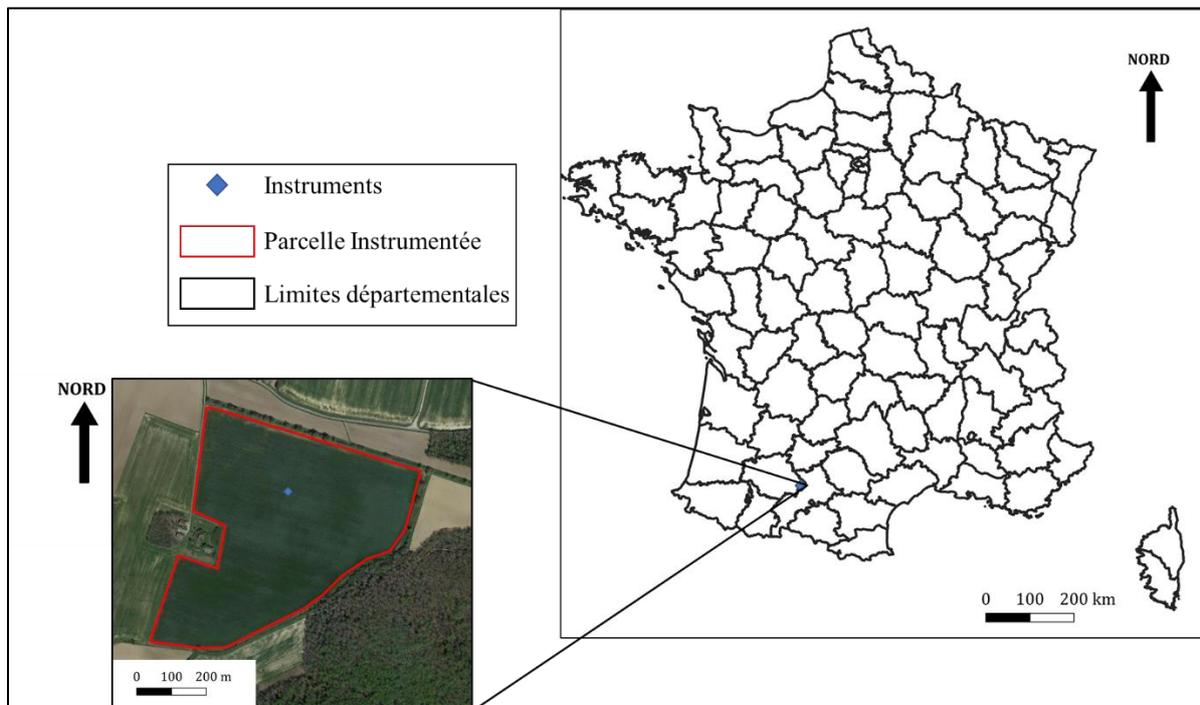


**Figure 6** : Superficie cultivée en colza par département en France métropolitaine en 2019 (Agreste, 2020)

## 2 Chapitre II : Matériels et méthodes

### 2.1 Présentation, Description et Localisation du site instrumenté d'Auradé

Le site d'Auradé se situe dans le Sud-Ouest de la France, dans le département du Gers à quelques kilomètres de Toulouse dans la région de l'Occitanie. Il fait partie de l'Observation Spatiale Régional Sud-Ouest correspondant à une zone agricole de 50x50 km avec 2 sites instrumentés (Auradé et Lamasquère) de mesures des flux de GES appartenant au réseau Européen ICOS (Integrated Carbon Observation System). Les mesures de flux CO<sub>2</sub> utilisées dans le cadre de ce stage sont collectées sur la parcelle agricole d'Auradé de 23,5 hectares cultivés depuis une quarantaine d'années. Elle se localise à 40 kilomètres à l'ouest de Toulouse (43.54965°, 1.10611°) avec une altitude moyenne de 245 mètres, une pente orientée Est/Nord-Est de 2%. La parcelle d'Auradé est caractérisée par un système de rotation des cultures blé/tournesol/blé/colza. Le colza est semé vers fin août et récolté vers début juillet. Les mesures qui seront utilisées dans ce travail correspondent aux années culturales de colza qui sont au nombre de cinq (5) : 2004-2005, 2008-2009, 2010-2011, 2012-2013, 2017-2018. Les données de 2005 étant incomplètes l'analyse des résultats se focalisera sur les quatre années restantes (2009, 2011, 2013, 2018).



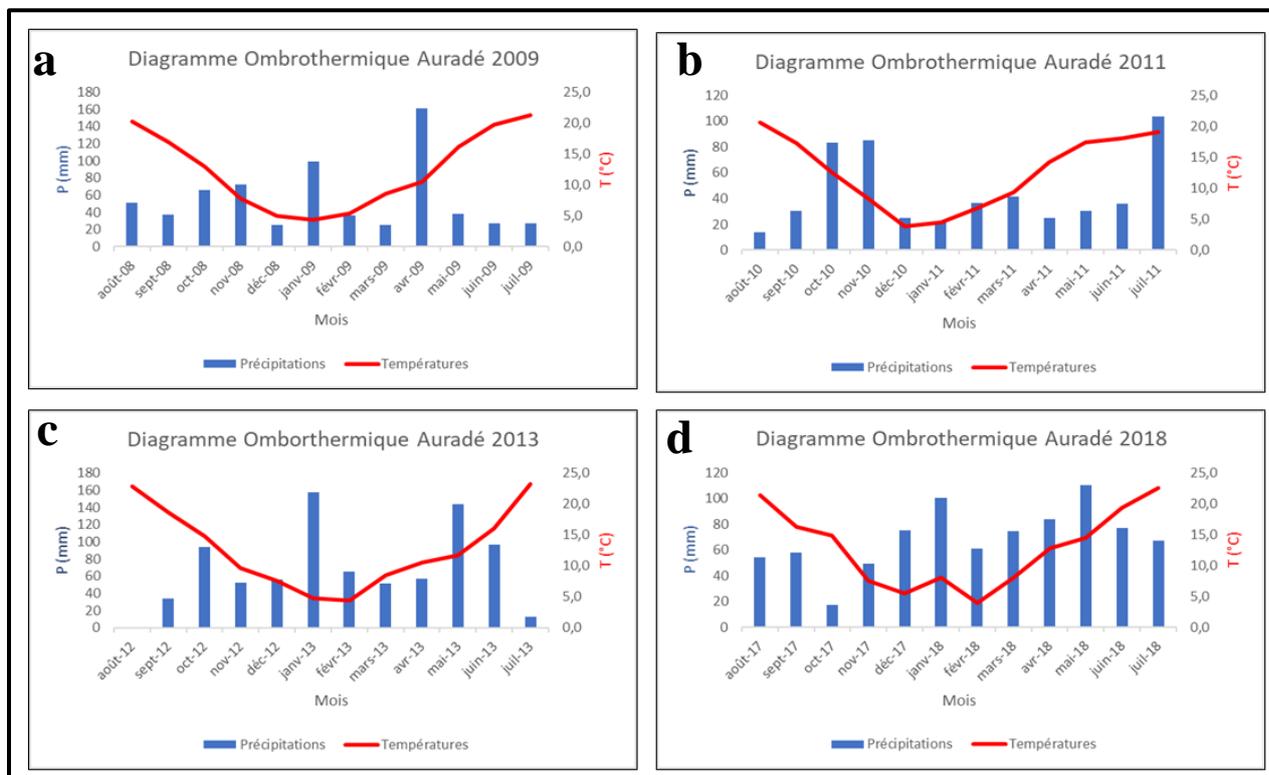
**Figure 7** : Localisation du site instrumenté d'Auradé

### 2.1.1 Type de sol

Le site d'étude se situe dans un paysage essentiellement collinaire a été choisi pour sa topographie plane car cela est requis pour la méthode de mesure des flux de CO<sub>2</sub> employée. Du point de vue pédologique, il est couvert par un sol de "terrefort" c'est à dire de type argilo-calcaire lourd et fertile.

### 2.1.2 Le climat

Le climat est de type océanique à influence méditerranéenne caractérisé par des étés chauds et secs. Nous notons des variations de températures et de précipitations marquées d'une saison à une autre mais aussi des années climatiques contrastées (**Figure 8**). Ces variations climatiques ont de fortes influences sur le développement de la culture, la production agricole et les rendements.



**Figure 8 :** Diagramme Ombrothermique site d'Auradé pour quatre (4 années culturale du colza

## 2.2 Présentation et description des données

Dans le cadre de ce travail divers types de données sont nécessaires pour faire fonctionner calibrer ou valider le modèle. Des données de télédétection à haute résolution spatiale, des données météorologiques (rayonnement global, température in situ), des mesures de biomasse

(biomasse aérienne, rendement...), des mesures de flux nets de CO<sub>2</sub> avec la technique d'Eddy-Covariance permettant par déconvolution d'estimer la Photosynthèse et la Respiration de l'écosystème.

### 2.2.1 Les mesures in-situ

Les mesures météo et de flux s'étendent sur plus de 15 ans et ce site est désormais intégré dans le réseau européen **Integrated Carbon Observation System (ICOS)**.

Plusieurs variables y sont mesurées telles que les échanges d'énergies d'eau et de CO<sub>2</sub> par la technique *d'Eddy Covariance* (Béziat et al. 2009) à l'aide d'un anémomètre sonique tridimensionnel (Csat 3 de Campbell) et un analyseur de gaz infrarouge haute fréquence (LI7500 de LiCor). Des variables climatiques y sont mesurées aussi comme le rayonnement global, la température de l'air, les précipitations, l'humidité relative, la vitesse du vent... à une fréquence semi-horaire. Les campagnes de mesure de biomasse et indice de végétation (GAI, pour Green Area Index) y sont faites aussi sur plusieurs années.

#### Les mesures de flux

A partir des mesures réalisées par le système *d'Eddy Covariance*, plusieurs variables sont calculées : La Production Primaire Brute (**GPP** pour Gross Primary Production), la Respiration de l'Ecosystème (**Reco**) et l'Echange net de CO<sub>2</sub> de L'Ecosystème (**NEE** pour Net Ecosystem Exchange).

La **figure 9** illustre la dynamique de la photosynthèse (GPP) pour les 5 années de culture du colza. Les années colza 2004-2005, 2008-2009, 2012-2013 et 2017-2018 ont un démarrage plus précoce que l'année 2010-2011 car pour cette année, le semi a été plus tardif que les autres (21 Septembre) c'est à dire 15 jours en moyenne plus tard que les autres années. Pour la culture 2004-2005, les mesures ne commencent qu'en mars 2005, mais on observe aussi une croissance plus tardive de la GPP comparée à 2008-2009, 2012-2013 et 2017-2018 avec une GPP atteignant son maximum à la fin du mois de mai, puis décroissant progressivement au cours de la sénescence jusqu'au milieu du mois de juin. Le démarrage tardif de la GPP en 2005 peut être expliqué par un hiver sec et froid (**Figure 8a**) comparé aux autres années colza.

L'année 2008-2009 voit un développement rapide du colza. Dès le début du mois d'Octobre des valeurs négatives de la GPP ont été observées. Ceci s'explique par une activité végétative en hiver mais qui sera freinée par les épisodes de gel en fin décembre. Les conditions thermiques particulièrement froides de décembre 2008 et janvier 2009 expliquent l'arrêt drastique de la GPP qui va se reprendre au mois de mars pour atteindre son maximum vers mi-

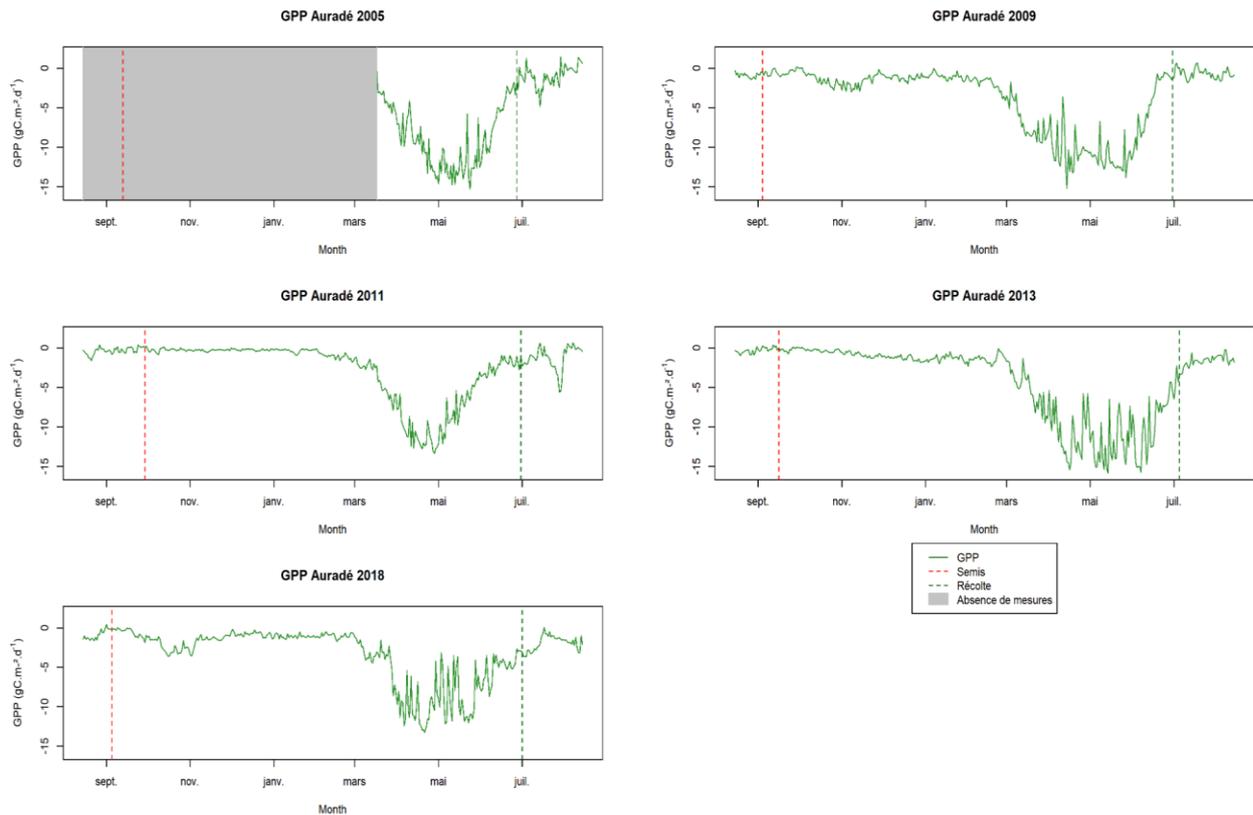
avril. La GPP commence à diminuer à la sénescence, le cycle végétatif se terminant vers mi-juin.

L'année 2011 a un démarrage tardif de la GPP à cause d'un semis plus tardif de 15 à 25 jours par rapport autres années. Le développement du colza est aussi très particulier cette année-là, du fait d'un hiver sec et d'un printemps beaucoup plus chaud que les autres années (**Figure 8b**). La GPP était quasiment nulle durant toute la saison hivernale et printanière, puis a connu un accroissement rapide pour atteindre son maximum en fin avril, suivi d'une diminution plus rapide que les toutes les autres années jusqu'à la sénescence aux environs de mi-juin.

La saison 2012-2013 présente les mêmes dynamiques de GPP que l'année 2009 sauf qu'ici aucune activité photosynthétique significative n'est observée en automne. La GPP est quasiment nulle jusqu'au mois de mars ou elle augmente progressivement pour atteindre son pic vers mi-avril avant de diminuer lors du début de la sénescence atteignant sa fin au bout du mois de juin. Comparée à la saison 2008-2009, celle 2012-2013 a connu un automne plus chaud et plus sec d'où l'absence de développement du colza en automne.

En 2018, les dynamiques de GPP observées sont similaires à la saison 2008-2009 avec un démarrage très précoce de la photosynthèse dès le début du mois d'octobre. Ce développement précoce s'achève aussitôt en hiver du fait des températures relativement basses et un excès d'eau dans le sol. Cette saison présente d'importantes quantités de précipitations comparées aux autres années de colza. La reprise de la GPP est observée en début mars et atteint son maximum à la fin du mois d'avril, puis elle décroît progressivement jusqu'à la fin de la sénescence, vers mi-juin. Cette année présente une plus faible dynamique de GPP, le colza s'est mal adapté aux conditions climatiques plus humides que les autres années étudiées.

Nous avons choisi dans cette partie de décrire uniquement la GPP puisqu'elle permet de mieux cerner les dynamiques de végétation pour chaque année de culture.



**Figure 9 :** Les dynamiques de GPP des 5 années de colza à Auradé

### Les mesures de biomasse

Les mesures de biomasse sont réalisées au cours du développement de la culture et elles sont obtenues par mesures destructives (**Beziat, 2009**). Ces mesures utilisent des techniques d'échantillonnage respectant un certain nombre de protocoles comme **VALERI** (<http://w3.avignon.inra.fr/valeri/>). Les informations liées au rendement sont données par l'agriculteur et ce sont souvent des valeurs moyennes pour l'exploitation. Toutes les informations liées aux mesures de biomasse pour les années de colza à Auradé sont résumées dans le **Tableau1**.

Années	Dates de semis	Dates de récolte	Nombre de mesures Biomasse
2009	04-sept-2008	30-juin-2009	8
2011	29-sept-2010	30-juin-2011	6
2013	16-sept-2012	05-juil-2013	6
2018	05-sept-2017	01-juil-2018	3

**Tableau 1 :** Synthèse des données de biomasse collectées pour chaque année de colza sur la parcelle instrumentée d'Auradé.

### 2.2.2 Les données de télédétection

Dans le cadre de ce travail, une large gamme de données de télédétection à haute résolution spatiale et temporelle est utilisée. Le **Tableau 2** résume l'ensemble des images satellites utilisées dans cette étude entre 2009 et 2018. Ces données proviennent de différents satellites d'observation de la terre ayant une bonne capacité de suivi des cultures grâce à un temps de revisite compris entre 1 et 16 jours. L'utilisation de différentes données satellitaires augmente le nombre d'observations pour une année de culture donnée même si les nuages restent toujours un frein pour la télédétection optique. Les données satellites utilisées sont en réflectance de surface obtenues grâce aux prétraitements de la chaîne KALIDEOS (<http://kalideos.cnes.fr>) assurant la correction atmosphérique, géométrique et radiométrique.

Satellite	SPOT	Formosat-2	Landsat-5	Landsat-8	Sentinel 2
<b>Résolutions Spatiales</b>	20m (SPOT 2-4) 10m (SPOT-5)	8m	30m	30m	10m
<b>Instruments</b>	HRV/HVR-IR	RSI	TM	OLI	MSI
<b>Résolutions Temporelles</b>	1 à 3 jours	1 jour	16 jours	16 jours	5 à 6 jours
<b>Bandes spectrales utilisées</b>	Vert : [0.5–0.59] Rouge : [0.61–0.68] PIR : [0.79–0.89] SWIR : [1.53–1.75]	Vert : [0.52–0.6] Rouge : [0.63–0.69] PIR : [0.79–0.9]	Vert : [0.52–0.6] Rouge : [0.63–0.69] PIR : [0.76–0.9] SWIR1 : [1.55–1.75] SWIR2 : [2.08–2.35]	Vert : [0.53–0.59] Rouge : [0.64–0.67] PIR : [0.85–0.88] SWIR1 : [1.57–1.65] SWIR2 : [2.11–2.29]	Vert : [0.54–0.58] Rouge : [0.65–0.68] RE1 : [0.7–0.71] RE2 : [0.73–0.75] RE3 : [0.77–0.79] PIR : [0.72–0.95] PIR2 : [0.85–0.87] SWIR1 : [1.57–1.66] SWIR2 : [2.11–2.29]
<b>Fauchées</b>	60km	24 km	185 km	170x185km	290 km

**Tableau 2 :** Caractéristiques des données satellitaires utilisées durant le stage

#### Le GAI dans SAFY-CO<sub>2</sub>

Le GAI (Green Area Index) est le ratio de la surface totale verte de la plante à la surface du sol. C'est une variable biophysique exprimée en mètre carré de surface verte par mètre carré de sol (m<sup>-2</sup>.m<sup>-2</sup>). C'est un bon indicateur de la croissance végétale. Le GAI dérivé du satellite peut

être obtenu de différentes manières. Dans l'étude de (**Pique et al., 2020a**), le GAI est issu de BV-NNET (**Baret et al., 2007**) utilisant des réseaux neuronaux entraînés par des sorties d'un modèle de transfert radiatif dénommé PROSAIL. Dans d'autres études, le GAI est obtenu par relation empirique avec le NDVI (**Wang et al., 2005 ; Veloso et al., 2013, Claverie et al., 2012**).

Dans le cadre de cette étude, la relation exponentielle LAI-NDVI est utilisée (**Eq.2**). Cette relation a été établie dans le cadre de la Thèse d'**Amanda Veloso (2013)** entre le NDVI dérivé des images satellites sur différentes cultures (blé, tournesol, orge et maïs) et le GAI mesuré sur le terrain (**voir Annexe3**) montrant une bonne corrélation ( $R^2 : 0.86$ ) et des erreurs relativement faibles (RMSE  $0.39 \text{ m}^{-2} \cdot \text{m}^{-2}$ ).

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R} \quad (\text{Eq.1})$$

$$GAI = 0,31 \times e^{2.85 \times NDVI} - 0.45 \quad (\text{Eq.2})$$

Le GAI satellite permet d'avoir un suivi du développement de la culture au cours du cycle de végétation. L'utilisation de cet indice permet de faire la calibration des paramètres phénologiques et d'efficacité d'utilisation de la lumière du modèle pour la photosynthèse (**Pique et al., 2020a**) et elles permettent de prendre en compte implicitement des effets de stress biotiques et abiotiques. Le GAI donne également la possibilité de s'affranchir de l'utilisation de données concernant les pratiques agricoles en obligeant le modèle à reproduire le développement de la culture « vue » par satellite ce qui facilite l'application du modèle à grande échelle dans différentes conditions pédoclimatiques.

## 2.3 Le modèle SAFY- CO<sub>2</sub>

### 2.3.1 Présentation, paramétrisation et calibration

SAFY-CO<sub>2</sub> (Simple Algorithm for Yield and Carbon fluxes Estimates) est un modèle agrométéorologique à pas de temps journalier qui a pour objectifs de simuler le rendement, les composantes des flux de CO<sub>2</sub>, ainsi que le bilan carbone. Il permet aussi de reproduire le développement phénologique d'une culture et la production de biomasse aérienne de la plante (**Pique et al., 2020a ; Pique et al., 2020b**). Il prend en variables climatiques d'entrée le rayonnement global incident (**R<sub>g</sub>**) et la température de l'air (**T<sub>a</sub>**). Le modèle nécessite des

paramètres fixes et d'autres calibrés pour simuler les dynamiques de végétation et les composantes flux de CO<sub>2</sub>.

SAFY-CO<sub>2</sub> utilise également l'imagerie satellitaire à haute résolution spatiale et temporelle pour la calibration des six (6) paramètres phénologiques du modèle : jour d'émergence (**D0**), les paramètres intervenant dans la fonction d'allocation de la biomasse aux feuilles (**PRT\_La**, **PRT\_Lb**), la somme de température déclenchant la sénescence (**SENa**), le taux de sénescence (**SENb**) et l'indice foliaire spécifique (**SLA**) (**Annexe1 et 2**). La calibration se fait par la minimisation des erreurs entre le GAI observé par satellite et simulé par le modèle. La méthode d'optimisation choisie ici est celle de Monte Carlo qu'on peut qualifier de « *brute force* » (puisque'il ne comporte que la phase exploratoire) avec des a priori physiques suivant une distribution normale.

Cette approche, à savoir un modèle piloté par l'imagerie satellite, permet d'avoir une estimation spatialisée des rendements et du bilan carbone d'une culture donnée, à l'échelle de la parcelle (voire du pixel), avec la possibilité d'être mise en œuvre à large échelle (ex : bassins de production).

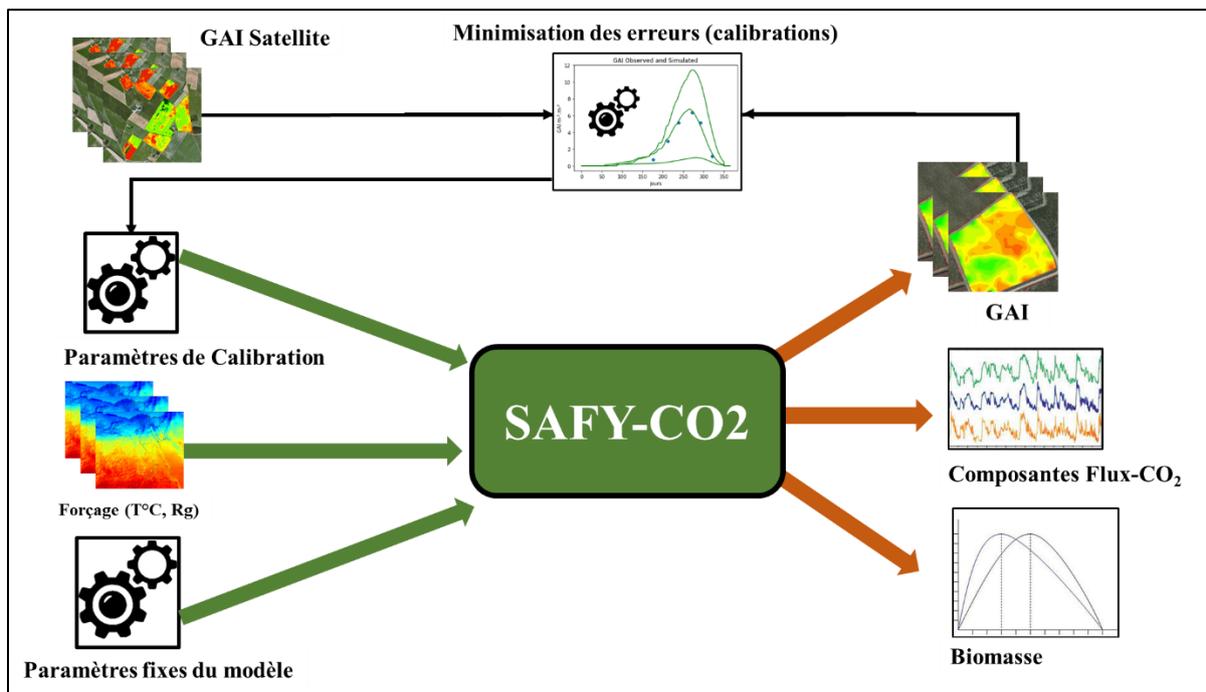


Figure 10 : Schéma simplifié du fonctionnement du modèle SAFY-CO<sub>2</sub>

### 2.3.2 Les processus simulés par SAFY-CO2

#### Production primaire brute (GPP)

La production primaire brute (**GPP pour Gross Primary Production**) correspond à la fixation du carbone par les plantes grâce aux processus de photosynthèse, elle est par convention de signe négatif (**Eric Ceschia, 2013**) car on considère que c'est du carbone extrait à l'atmosphère. Une partie de ce carbone fixé par la plante est utilisée par les producteurs primaires pour la respiration cellulaire et l'entretien des tissus existants et l'énergie restante correspond à la production primaire nette (**NPP**). La **NPP** correspond à la quantité de carbone stocké dans les différentes parties de la plante (**Ago et al., 2016**) sous forme de biomasse et elle résulte de la différence entre la production primaire brute (**GPP**) et de la respiration autotrophe (**Ra**) (**Eq.3**). La **GPP** est la première variable simulée par le modèle pour l'estimation de la biomasse et du bilan carbone (**Pique et al., 2020**). Elle est calculée à partir du rayonnement global incident, de la température de l'air, de la fraction du rayonnement absorbée par les plantes par photosynthèse (**fAPAR**). Cette dernière est calculée par le modèle comme une fonction du **GAI** (**Eq.5**), de l'efficacité des plantes à absorber la lumière pour la photosynthèse (**ELUE**) et du paramètre **sR10** (**Eq.7**). Le **sR10** est égale à 1 entre la levée et le début de la sénescence et qui est estimé à partir de du **GAI** entre la phase de sénescence et la récolte. Ce paramètre permet de prendre en compte la perte d'efficacité photosynthétique de la plante en phase de sénescence.

$$NPP = GPP - Ra \quad (\text{Eq.3})$$

$$GPP = R_g \times \varepsilon_C \times f_{APAR} \times f_t(T_a) \times f_{ELUE} \times sR10 \quad (\text{Eq.4})$$

$$f_{APAR} = 1 - \exp(-k_{ext} \times GAI) \quad (\text{Eq.5})$$

$$f_{ELUE} = ELUEa \times \exp\left(ELUEb \times \frac{R_{df}}{R_g}\right) \quad (\text{Eq.6})$$

$sR10 = 1$  (entre levée et début de sénescence) ou

$$\frac{GAI}{GAI_{max} \times C_s} \quad (\text{Entre sénescence et récolte}) \quad (\text{Eq.7})$$

#### Respiration autotrophe (Ra)

La respiration autotrophe correspond à l'émission de  $CO_2$  par les plantes. La  $Ra$ , par convention positive, correspond à la somme de deux composantes respiratoires (**Eq.8**) : la respiration de croissance notée ici **Rgr** correspondant à la respiration de la plante générée par les processus

de création de la biomasse, et la respiration de maintenance notée **Rm** qui permet le maintien en vie de la biomasse existante.

$$Ra = Rm + Rgr \quad (\text{Eq.8})$$

### **La respiration du sol ou Respiration hétérotrophe (Rh)**

Elle correspond à la quantité de CO<sub>2</sub> libérée par sol (donc dirigée vers l'atmosphère) grâce aux processus de décomposition de la matière organique par les microorganismes. C'est une des composantes de la respiration de l'écosystème (**Reco**). Ce flux dépend tout d'abord de la température du sol mais le contenu en eau et la nature du substrat joue également un rôle essentiel sur son intensité.

### **La respiration de l'écosystème (Reco)**

La respiration de l'écosystème (**Reco**) résulte de la somme entre la respiration des plantes (**Ra**) et la respiration du sol (**Rh**).

$$Reco = Ra + Rh \quad (\text{Eq.9})$$

### **Echange net de CO<sub>2</sub> (NEE)**

L'échange net de CO<sub>2</sub> de l'écosystème avec l'atmosphère (**NEE pour Net Ecosystem Exchange**) représente la somme des flux entrant (**GPP**) et sortant de CO<sub>2</sub> (**Ra + Rh**) entre l'écosystème et l'atmosphère. Elle peut être mesurée en utilisant les techniques d'Eddy covariance (**Béziat et al. 2009**). Cette méthode est très utilisée aujourd'hui pour la quantification des échanges gazeux entre l'écosystème et l'atmosphère. L'estimation de la NEE peut également se faire à partir du modèle **SAFY-CO<sub>2</sub>**, en faisant la différence entre la production primaire nette estimée par modèle et la respiration hétérotrophe (Rh).

$$NEE = GPP - Ra - Rh \text{ ou } NEE = NPP - Rh \quad (\text{Eq.10})$$

ou

$$NEE = GPP - Reco \quad (\text{Eq.11})$$

### **La biomasse aérienne (DAM)**

La NPP (**Eq.3**) est divisée en NPPr (Production Primaire Nette racinaire) résultant du produit entre la NPP et le ratio biomasse racinaire et aérienne (RTS pour Root to shoot ratio) (**Eq.12**) et en NPPa (Production Primaire Nette aérienne) (**Eq.13**).

La **DAM** (Dry Aboveground Mass) est estimée par le rapport entre la production primaire nette dérivée de la partie aérienne de la plante (**NPPa**) le contenu en carbone des plantes (qui diffère selon le type de végétation étudiée) généralement noté **Cveg**.

$$NPPr = NPP \times RTS \quad (\text{Eq.12})$$

$$NPPa = NPPr \times (1-RTS) \quad (\text{Eq.13})$$

$$DAM = \frac{NPPa}{Cveg} \quad (\text{Eq.14})$$

### Rendement final (YLD)

Le rendement correspond à la quantité de grain produite par unité de surface cultivée. Dans SAFY-CO<sub>2</sub>, la simulation du rendement d'une culture se fait sur la base de la biomasse aérienne maximale (**DAM<sub>max</sub>**) atteinte en fin de culture que l'on multiplie par un indice de récolte constant (**HI, pour Harvest Index**).

$$YLD = DAM_{max} \times Hi \quad (\text{Eq.15})$$

### Production nette de l'écosystème (NEP)

La production nette de l'écosystème (**NEP**) correspond à la quantité de CO<sub>2</sub> absorbée ou libérée par les processus métaboliques des plantes et la respiration du sol sur une année culturale complète. Cette période est généralement établie entre le 1er Octobre et le 30 Septembre de l'année suivante (**Pique et al., 2020 ; Ceschia et al., 2010**). Si la NEP est positive, l'écosystème, en l'occurrence le terrain agricole sera considéré comme une source de CO<sub>2</sub>, et si elle est négative le terrain agricole est vu comme un puits atmosphérique de CO<sub>2</sub> (**Ceschia, 2013**). Elle est calculée à partir de l'échange net de CO<sub>2</sub> (NEE) de l'écosystème cumulé sur l'année. Dans le cadre de cette étude, l'estimation de la NEP devrait se faire entre mi-juillet et mi-juillet de l'année suivante puisque le colza est semé avant la plupart des autres cultures d'hiver et récolté en fin juin début juillet.

$$NEP = \int_{15 \text{ juillet}+1}^{15 \text{ juillet}} NEE \quad (\text{Eq.16})$$

### Net Ecosystem Carbon Budgets (NECB)

Le bilan carbone net de l'écosystème (**NECB**) permet de déterminer le changement à court terme de la quantité de carbone séquestré dans un écosystème (**Peter S. et al., 2010**). SAFY-

CO<sub>2</sub> permet d'estimer le **NECB** à partir des données météorologiques, de télédétection et d'autres variables intermédiaires que le modèle simule et qui permettent de quantifier ce bilan (**Eq.16**). Le **NECB** est obtenu en faisant la somme de la **NEP** (**Net Ecosystem Production**) et de la quantité de carbone sortant (**Cexp**) qui, par convention, est de signe positif, correspondant à la quantité de carbone perdue par la respiration du sol et la récolte (**Pique et al. 2020**). Un troisième terme doit être pris en compte dans le calcul du bilan C, **Cinp**, qui correspond à la quantité de carbone entrant sur la parcelle sous forme d'engrais organique (fumier...). Par convention, **Cinp** est de signe négatif. Cependant, dans notre région d'étude il n'y a pas d'apport d'engrais organique réalisé sur le colza.

$$\text{NECB} = \text{NEP} + \text{Cexp} - \text{Cinp} \quad (\text{Eq.17})$$

### 2.3.3 La validation des sorties du modèle

Les variables d'intérêts simulées nécessitent d'être validées pour juger le niveau de performance du modèle. Dans le cadre de ce travail, la validation est réalisée sur les mesures de flux de CO<sub>2</sub> et des mesures destructives de biomasse acquises depuis 2005 sur le site instrumenté d'Auradé. Les années cibles sont celles correspondant à la culture du colza (**cf. chapitre 2**). Pour juger la qualité de reproduction des dynamiques de flux CO<sub>2</sub> et de la biomasse, de 3 indices statistiques sont calculés : le coefficient de détermination (R<sup>2</sup>), la RMSE (Root-Square-Mean-Error, (**Eq.18**)) et le biais (**Eq.19**). Les validations sont faites sur la photosynthèse (**GPP**), la respiration (**Reco**), l'échange net de CO<sub>2</sub> (**NEE**), et la biomasse aérienne (**DAM**). Pour l'indice de végétation, le processus ne correspond pas vraiment à une validation car le GAI observé par satellite est utilisé pour obtenir les paramètres de calibration (**Pique et al 2020a**). La comparaison du GAI satellite et du GAI simulé sert donc plutôt de vérification de la capacité du modèle à reproduire le GAI observé.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{Observée} - \text{Modélisée})^2}{N}} \quad (\text{Eq.18})$$

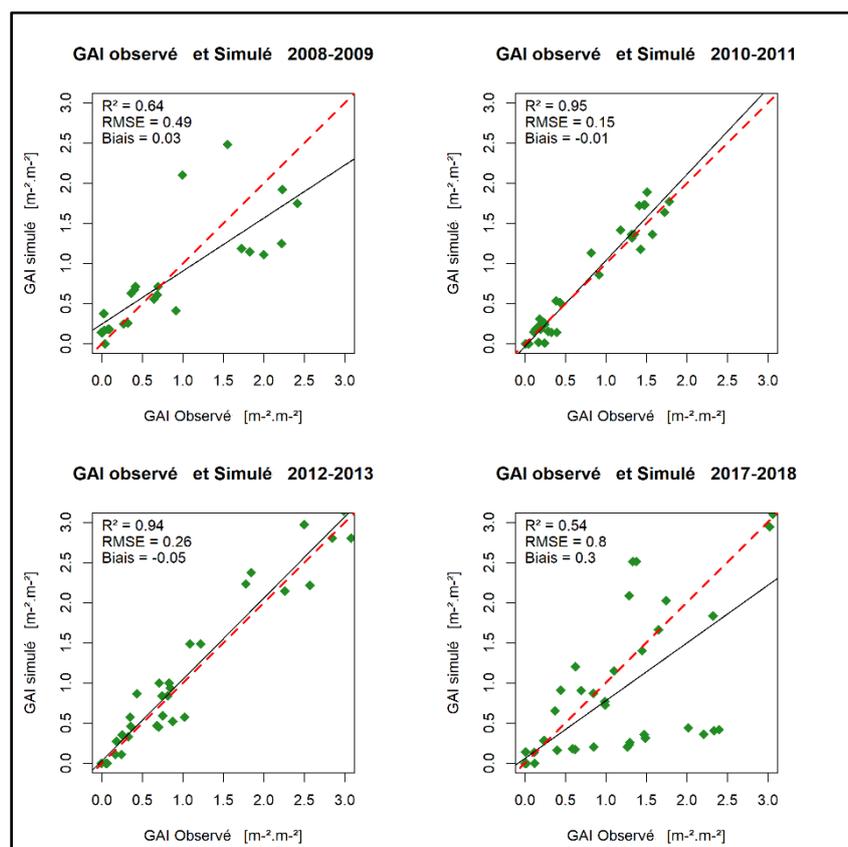
$$\text{Biais} = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{Observée} - \text{Modélisée})}{N} \quad (\text{Eq.19})$$

### 3 Chapitre III : Résultats et Discussion

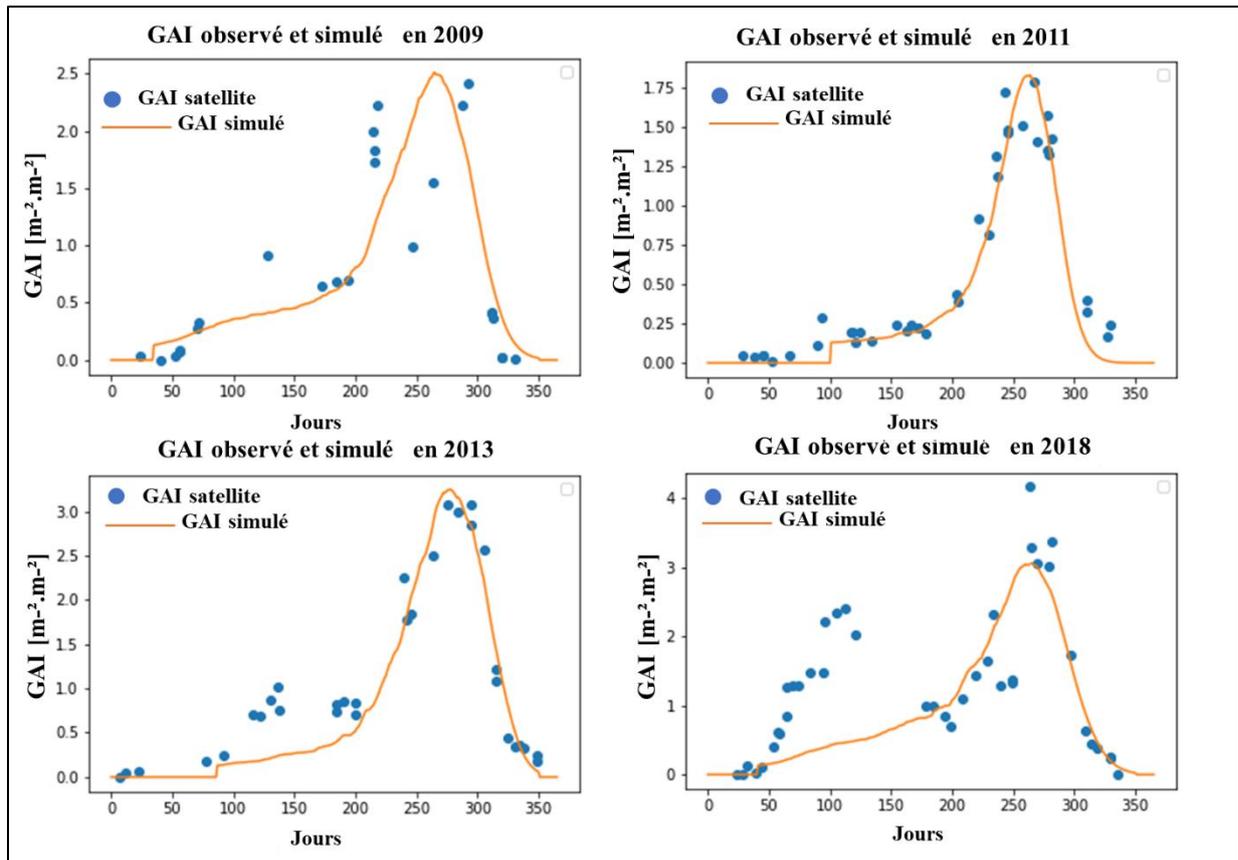
#### 3.1 Evaluation des performances du modèle sur le colza

##### 3.1.1 L'indice de végétation (GAI)

La **Figure 11** montre les performances du modèle pour la simulation des GAI sur le site flux. Nous observons une bonne reproduction du GAI sur toutes les années ( $R^2$  0.74 en 2009, 0.95 en 2011, 0.94 en 2013 et 0.54 en 2018). Les erreurs observées sont plutôt faibles pour les 4 années (0.42  $m^{-2}.m^{-2}$  en 2009, 0.15  $m^{-2}.m^{-2}$  en 2011, 0.26  $m^{-2}.m^{-2}$  en 2013 et 0.8  $m^{-2}.m^{-2}$  en 2018). Néanmoins les performances sont moins bonnes sur les années où il a y une pousse automnale après le semis, en l'occurrence les années 2009 et 2018 où le colza s'est développé très rapidement dès l'automne (**Chapitre 2**). Le modèle n'arrive pas à bien reproduire ces pousses automnales surtout en 2018 ce qui a entraîné de fortes erreurs sur la reproduction de la dynamique du GAI pour les deux années citées ci-dessus (**Figure 12**). Cette bonne reproduction du GAI par le modèle SAFY-CO<sub>2</sub> est confirmée par d'autres études faites sur d'autres cultures comme le blé d'hiver et le tournesol (**Pique et al., 2020a et b**).



**Figure 11** : Scatter plot entre la GAI dérivé du satellite et simulée par SAFY-CO<sub>2</sub> pour chaque année colza



**Figure 12 :** Dynamiques temporelles des GAI issus de satellite et simulé par SAFY-CO<sub>2</sub> pour les quatre (4) années étudiées.

### 3.1.2 Les Composantes de flux CO<sub>2</sub>

Globalement les dynamiques de flux sont bien estimées par le modèle pour les quatre années d'intérêts. Le tableau ci-dessous résume l'ensemble des performances pour les composantes de flux CO<sub>2</sub> sur les quatre (4) années d'étude.

Année	Variables	R <sup>2</sup>	RMSE [gC.m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup> ]	Biais
2009	GPP	0.89	1.43	0.05
	NEE	0.85	1.25	-0.29
	Reco	0.76	1	0.34
2011	GPP	0.86	1.81	-0.42
	NEE	0.84	1.48	-0.72
	Reco	0.58	1.18	0.3

<b>2013</b>	GPP	0.85	2.44	-0.84
	NEE	0.76	2.17	-1.02
	Reco	0.82	1.03	0.18
<b>2018</b>	GPP	0.83	1.49	0.34
	NEE	0.77	1.28	-0.22
	Reco	0.76	1.05	0.56

**Tableau 3** : Synthèse des performances statistiques des composantes flux CO<sub>2</sub> simulées par le modèle SAFY-CO<sub>2</sub> en 2009, 2011, 2013 et 2018 sur la parcelle instrumentée d'Auradé.

### La Production Primaire Brute (GPP)

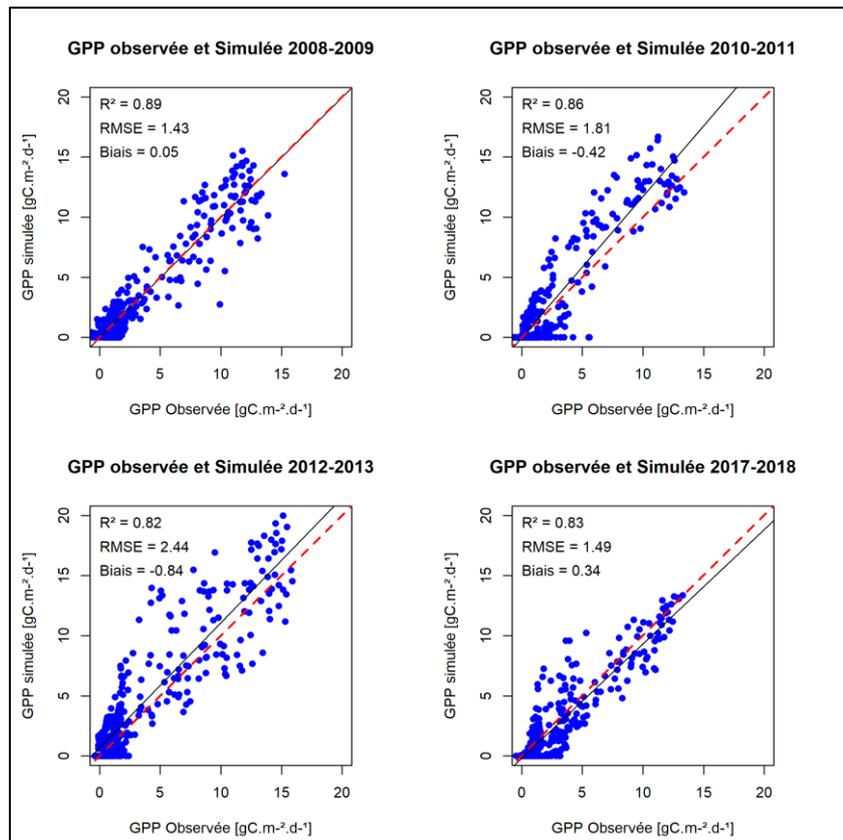
L'évaluation des performances de la GPP est faite sur toute la période de culture (semis-récolte) pour les quatre années de colza. La GPP est bien reproduite par le modèle avec des coefficients de corrélation compris entre 0.8 et 0.86 et des RMSE compris entre 1.43 gC.m<sup>2</sup>.d<sup>-1</sup> et 2.44 gC.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> en fonction des années.

En 2009 les dynamiques de photosynthèses ont été bien reproduites par le modèle, avec de bonnes performances statistiques ( $R^2$  : 0.89 et RMSE : 1.43 gC.m<sup>2</sup>.d<sup>-1</sup> (**Figure 13**)). Cette année a connu un démarrage rapide de la GPP (dès l'automne) et nous observons une bonne prise en compte du pic automnale par le modèle (**Figure 14a**). Au cours de la croissance, le modèle arrive à simuler avec une bonne précision la GPP même si de légères surestimations sont notées par endroit. La GPP simulée en 2009 est très fluctuante durant la période de croissance et ceci peut être lié à l'efficacité du rayonnement diffus sur la photosynthèse (**Annexe 1**).

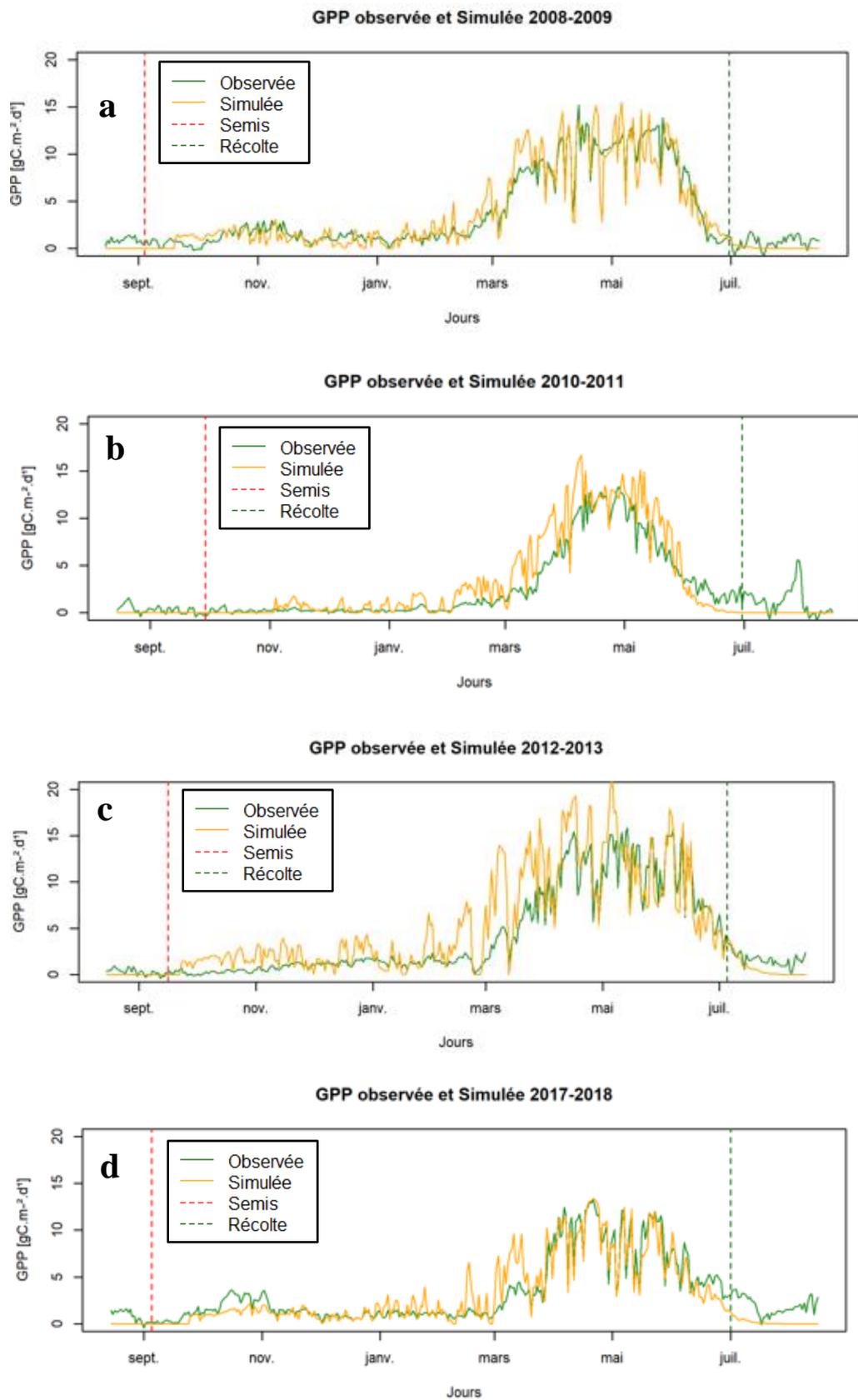
L'année 2011 est marquée par un démarrage tardif de l'activité photosynthétique car la saison automnale était froide et pluvieuse. En revanche, cette année est caractérisée par un hiver et un printemps beaucoup plus chaud que les autres années. Aussi, le cycle de végétation a été très précoce à partir de l'hiver et s'est terminé bien plus tôt que les autres années. La GPP simulée en 2011 est en adéquation avec les mesures in-situ avec un  $R^2$  de 0.86 et une RMSE de 1.81 gC.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> (**Figure 13**). Nous observons toutefois au début de la phase de croissance active (mars-avril) de légères surestimations de la GPP simulée (**Figure 14b**).

Le modèle arrive à bien simuler la GPP en 2013 avec un  $R^2$  de 0.82 et une RMSE de 2.44 gC.m<sup>2</sup>.d<sup>-1</sup> (**Figure 13**). Toutefois, il surestime un peu la photosynthèse au début et durant la phase de croissance (**Figure 14c**).

Tout comme l'année 2013 l'année 2018 présente les mêmes dynamiques de simulations de la GPP avec des surestimations au début de la phase de développement de la végétation (**Figure14d**). Tout de même la photosynthèse est bien reproduite par le modèle avec de bonnes performances statistiques ( $R^2$  : 0.83, RMSE : 1.49  $\text{gC.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$  (**Figure 13**)).



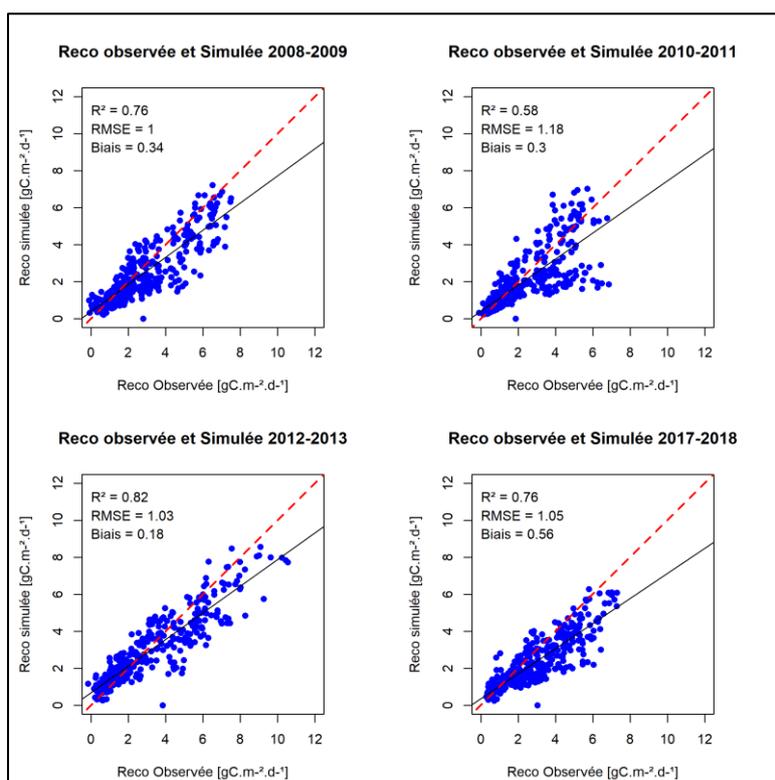
**Figure 13** : Scatter plot entre la GPP observée sur le terrain et simulée par SAFY-CO<sub>2</sub> pour chaque année colza



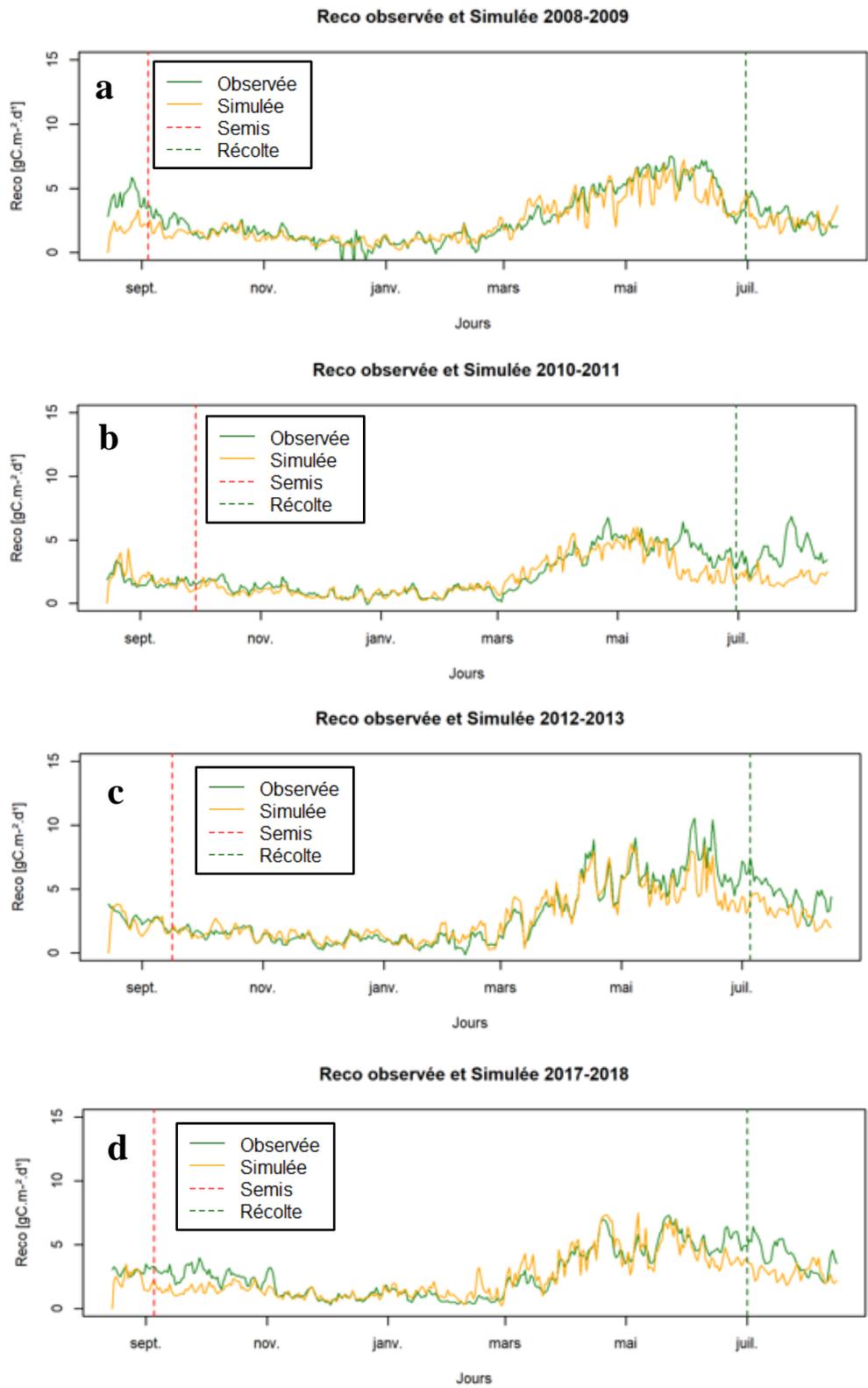
**Figure 14** : Dynamique temporelle des **GPP** mesurées et simulées par SAFY-CO<sub>2</sub>

## La respiration de l'écosystème

Les résultats obtenus montrent une bonne estimation de la respiration de l'écosystème par le modèle SAFY-CO<sub>2</sub> pour les quatre (4) années d'études (**Figure 15**). Une bonne estimation est obtenue en 2009 avec une bonne corrélation de l'ordre de 0.73 et une RMSE de 1.07 gC.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> plus faible qu'en année 2011 qui présente une RMSE de 1.18 gC.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> et un R<sup>2</sup> de 0.58. L'année 2011 présente une bonne simulation de la Reco (R<sup>2</sup> : 0.58 et RMSE de 1.18 gC.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>) au début jusqu'à la phase de croissance puis une sous-estimation en fin de cycle (**Figure 16b**). Cette sous-estimation est liée à une repousse du colza, non simulée par le modèle (il est possible d'activer une option dans le modèle pour que ce soit le cas), ce qui a sans doute engendré la plus grande erreur par rapport aux autres années. En 2013 la Reco estimée suit les tendances des mesures de flux durant tout le cycle cultural avec un R<sup>2</sup> de 0.82 et une RMSE de 1.03 gC.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> légèrement plus faible qu'en 2009 et en 2011. Nous observons une bonne adéquation des simulations en début et durant la phase de croissance et une sous-estimation de la Reco en fin de cycle (**Figure 16c**). Enfin, la Reco est bien simulée aussi en 2018 avec un R<sup>2</sup> de 0.71 et un RMSE de 1.05 gC.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>. Comme pour 2013, l'année 2018 présente les mêmes tendances avec une bonne adéquation durant toute la phase de culture jusqu'à la sénescence où la Reco se voit sous-estimée par rapport aux mesures in-situ (**Figure 16d**).



**Figure 15** : Scatter plot entre la Reco observée sur le terrain et simulée par SAFY-CO<sub>2</sub> pour chaque année colza



**Figure 16 :** Dynamique temporelle des **Reco** mesurées et simulées par SAFY-CO<sub>2</sub>

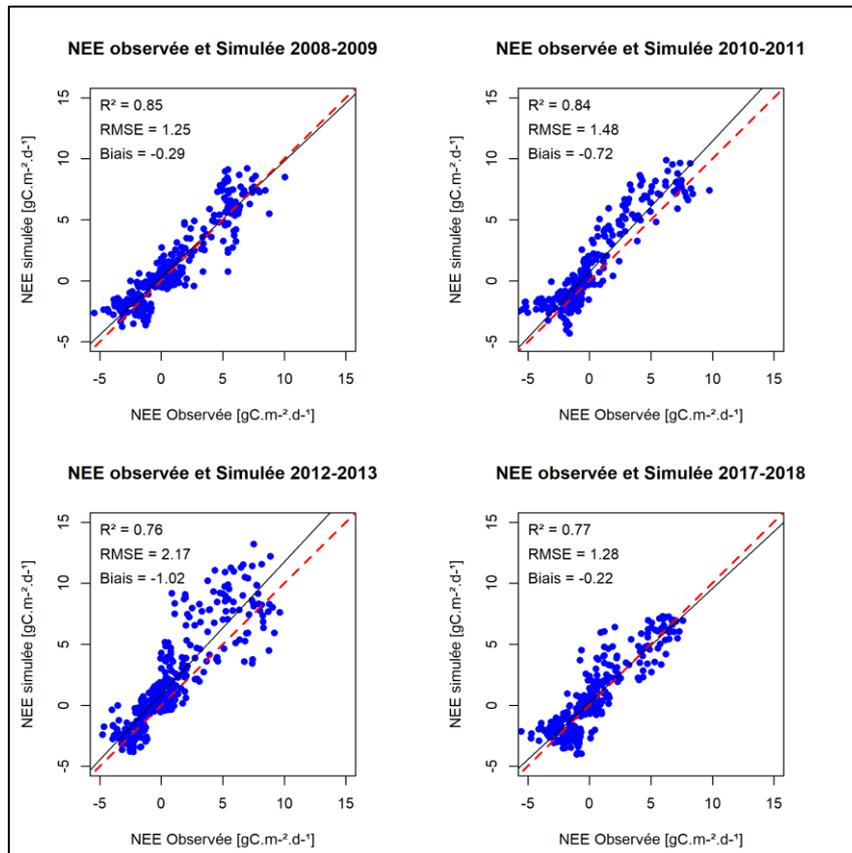
### **L'échange net de CO<sub>2</sub> de l'écosystème**

Les NEE des quatre (4) années de colza sont bien simulées par modèle (**Figure 17 et 18**). Pour l'année 2009, la NEE simulée suit la dynamique des mesures in-situ (**Figure 18a**) avec un R<sup>2</sup> de 0.85 et une RMSE de 1.25 gC.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>. Des écarts entre observation et simulation en 2009 pour la NEE sont observés durant la phase de croissance avec des fluctuations entre mi-avril et mi-mai qui sont liées à des variations du rayonnement diffus et direct.

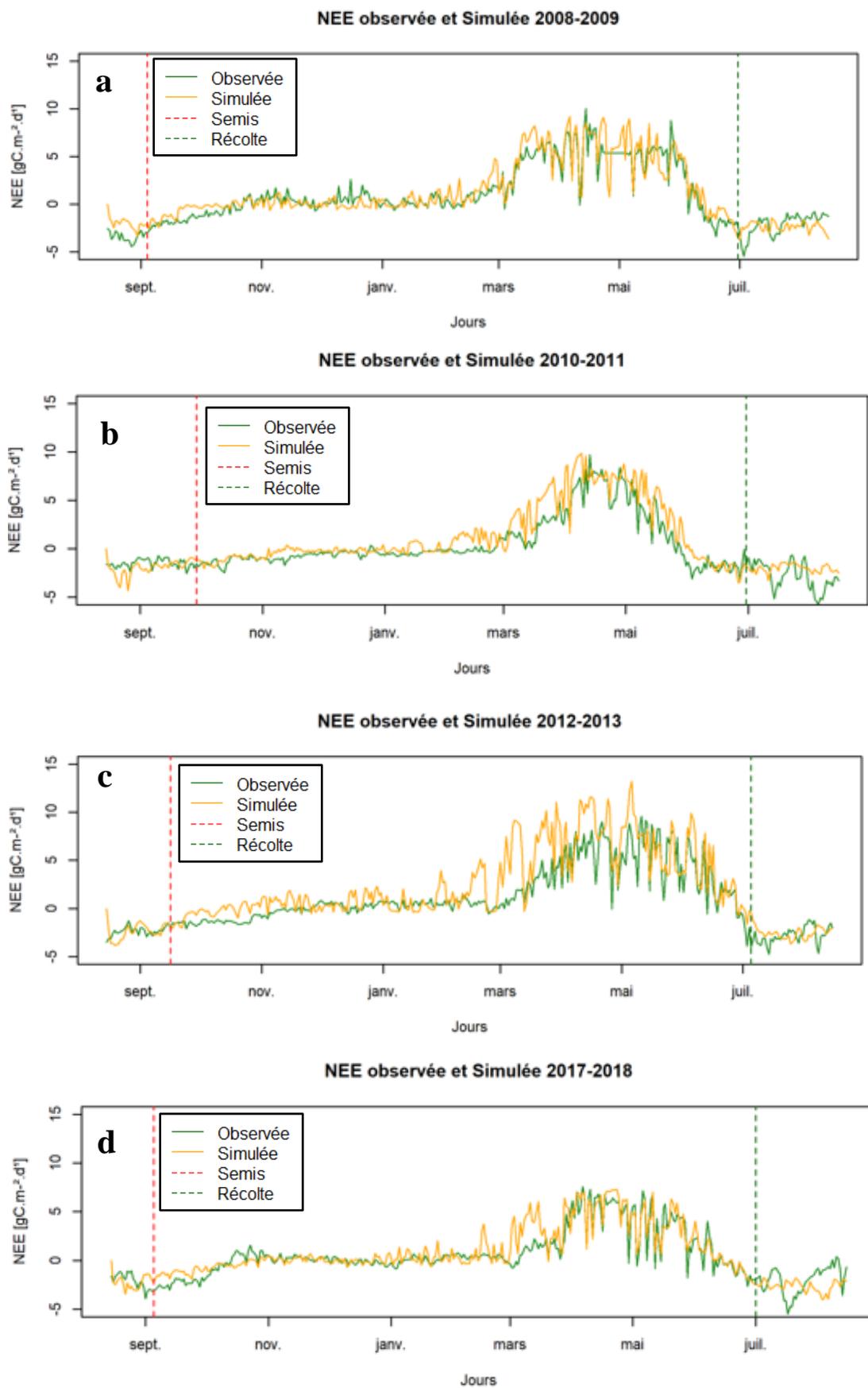
Pour l'année 2011, le modèle simule bien la dynamique de la NEE avec une très bonne corrélation avec les mesures in-situ (R<sup>2</sup> de 0.84) et une erreur relativement faible (RMSE de 1.48 gC.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>). Toutefois, la NEE simulée de cette année se voit surestimée au cours du développement de la culture et en fin de cycle (**Figure 18b**).

En 2013 l'estimation de la NEE montre des performances statistiques satisfaisantes avec un coefficient de détermination de 0.76 et une erreur quadratique moyenne de 2.17 gC.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> relativement plus grande qu'en 2009 et 2011 (**Tableau3**). La NEE est surestimée en 2013 surtout durant la phase de croissance (**Figure 18c**).

En 2017-2018 (**Figure 18d**), les dynamiques de simulation de la NEE sont bien simulées sur quasiment toutes les phases de la culture. Le modèle arrive à bien reproduire la NEE cette année avec un R<sup>2</sup> de 0.77 et une RMSE de 1.28 gC.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> nettement plus petite qu'en 2011 et en 2013. Des erreurs sur la NEE sont toutefois observées en mars 2018 et elles sont peut-être liées à la forte surestimation de la NEE au début de la phase de croissance.



**Figure 17:** Scatter plot entre la NEE observée sur le terrain et simulée par SAFY-CO<sub>2</sub> pour chaque année colza

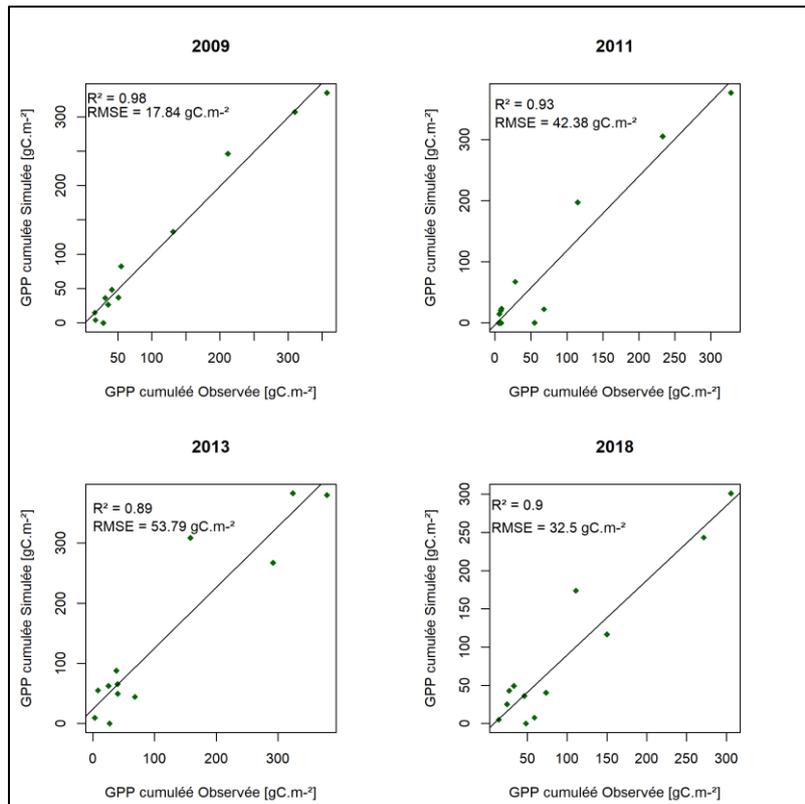


**Figure18** : Dynamiques temporelles des NEE mesurées et simulées par SAFY-CO<sub>2</sub>

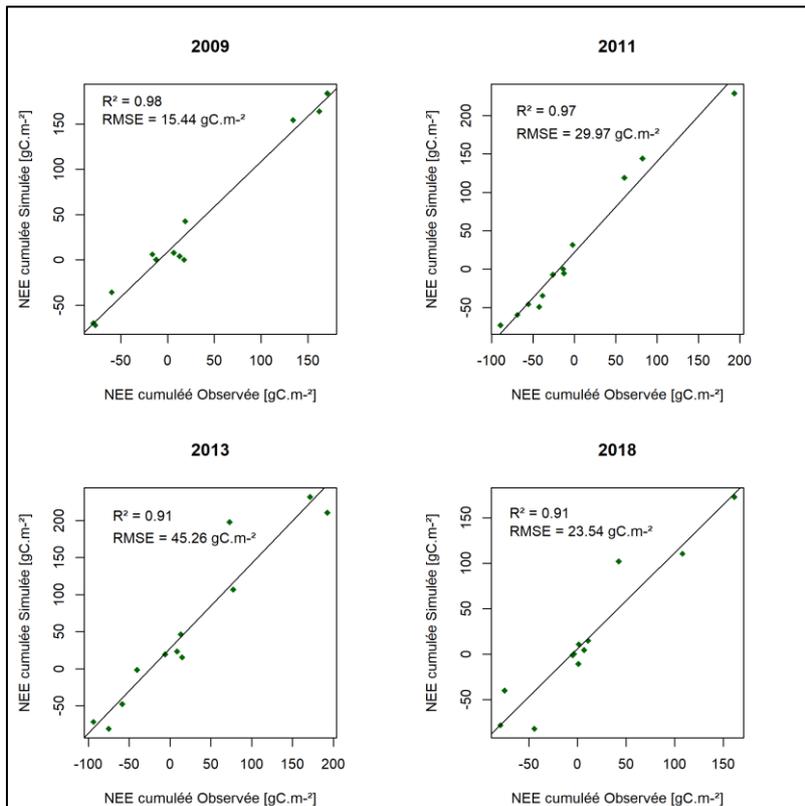
### Comparaison des performances de SAFY-CO<sub>2</sub> avec d'autres modèles

En guise de comparaison, nous avons confrontés les résultats de simulations des composantes du flux de CO<sub>2</sub> sur le colza obtenus par SAFY-CO<sub>2</sub> avec des simulations réalisées avec d'autres modèles dans le cas d'autres études : avec le modèle **SPA-Crop (Revill et al., 2019)** et avec le modèle **SCOPE (Pardo et al., 2018)**. Le modèle **SCOPE** reproduit avec fidélité les dynamiques de GPP et de NEE cumulées mensuellement avec un R<sup>2</sup> de 0.90 et 0.94 et des RMSE de 10.21 et 9.22 gC.m<sup>-2</sup> pour la GPP sur des valeurs comprises 0 et 140 gC.m<sup>-2</sup>. Pour la NEE le coefficient de détermination est entre 0.90 et 0.93 et des RMSE de 7.25 et 8.65 gC.m<sup>-2</sup> sur une intervalle de variations comprise entre 40 et -80 gC.m<sup>-2</sup>. SAFY-CO<sub>2</sub> présente de meilleures corrélations avec des cumuls mensuels et des erreurs (RMSE) relativement plus faibles que SCOPE au vu des gammes valeurs de GPP et de NEE cumulées pour chaque année d'étude (**Figure19 et 20**).

Le Modèle SPA-crop est un modèle physique de simulation du flux carbone à pas de temps journalier également. Les résultats obtenus avec SPA-Crop semblent moins bons que ceux obtenus avec SAFY-CO<sub>2</sub> sur l'estimation de la respiration du colza en terme de performances statistiques (R<sup>2</sup> entre 0.67 et 0.76 et RMSE entre 0.8 et 1 gC.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> pour SPA-crop (**Revill et al., 2019**) ; R<sup>2</sup> entre 0.58 et 0.82 et RMSE entre 1 et 1.1 gC.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> pour SAFY-CO<sub>2</sub>). En ce qui concerne la GPP et la NEE le modèle SAFY-CO<sub>2</sub> semble plus bon en corrélation que le modèle SPA-crop (0.85 en moyenne pour les 4 années pour la GPP pour SAFY-CO<sub>2</sub> contre 0.82 sur une moyenne de 2 années pour SPA-crop et 0.80 pour la NEE pour SAFY-CO<sub>2</sub> contre 0.71 pour SPA-crop). Les erreurs moyennes pour la GPP et la NEE semblent être plus faibles pour SPA-crop que pour SAFY-CO<sub>2</sub> (1.5 gC.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> contre 1.80 pour la GPP et 0.95 gC.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> contre 1.55 pour la NEE).



**Figure 19:** Cumuls mensuels des GPP mesurée et simulée pour chaque année colza avec SAFY-CO2.



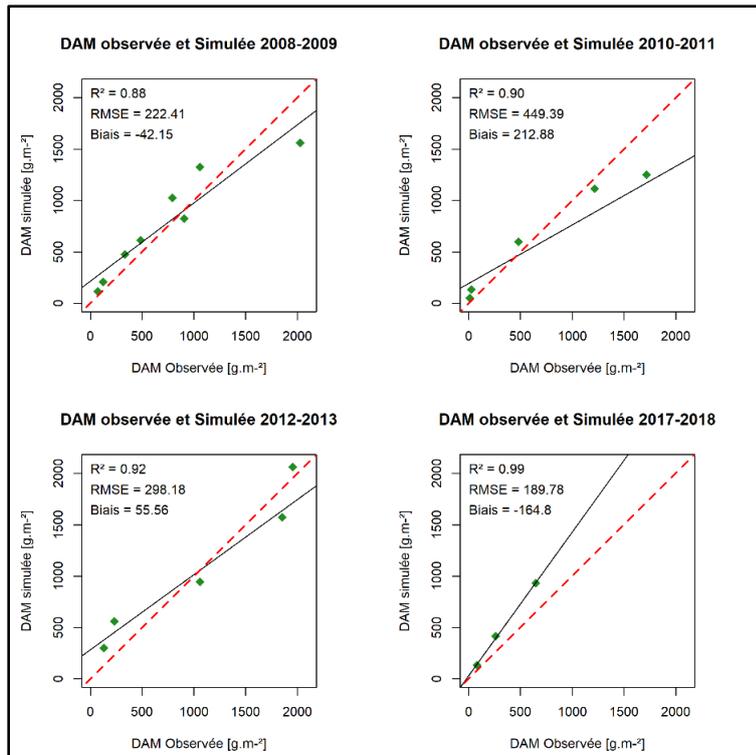
**Figure 20 :** Cumuls mensuels des NEE mesurée et simulée pour chaque année colza avec SAFY-CO2.

### 3.1.3 Biomasse finale et dynamique de la biomasse

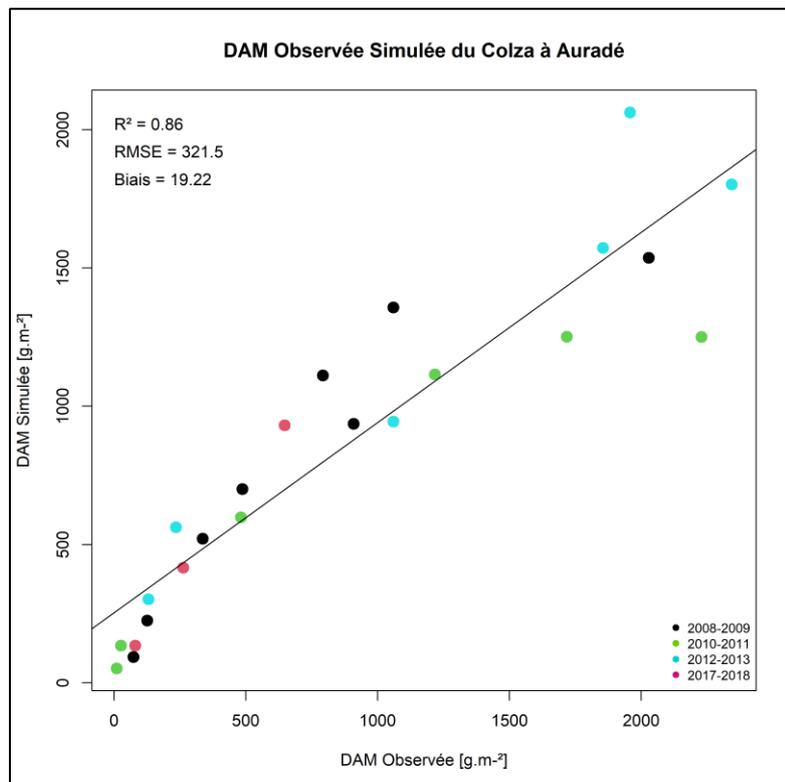
En comparant la biomasse obtenue par mesures destructives et la biomasse estimée par SAFY-CO<sub>2</sub>, de bonnes performances statistiques en sortent, du moins pour 3 années sur 4 (**Figure 21**). La DAM est estimée avec une bonne précision en 2009, 2013 et 2018 avec des R<sup>2</sup> de 0.88, 0.90, 0.92 respectivement et des RMSE respectives de 222 g.m<sup>-2</sup>, 298 g.m<sup>-2</sup>, 189g.m<sup>-2</sup>. La reproduction de la DAM est moins bonne en 2011 même si la corrélation reste forte (R<sup>2</sup> 0.90). C'est sur cette année que le modèle réalise la plus grande erreur sur la DAM (449 g.m<sup>-2</sup>). En effet, en 2011 les conditions climatiques extrêmes au printemps ont fait que le colza s'est moins développé que les autres années mais plus rapidement et sur une durée très courte. Nous observons donc un comportement atypique de la culture cette année-là que la paramétrisation du modèle peine à reproduire

La performance moyenne sur les quatre (4) années études reste toutefois relativement bonne avec un coefficient de détermination de 0.86 et une RMSE de 321 g.m<sup>-2</sup> (**Figure 22**). Ceci confirme l'assez bonne robustesse du modèle qui arrive tant bien que mal à reproduire la biomasse sur quatre (4) années climatiquement très contrastées. Un travail sur la paramétrisation reste toutefois à faire pour permettre au modèle de mieux s'adapter aux extrêmes climatiques.

Ces résultats sont un peu moins bons que ceux obtenus avec le modèle CSM-CROPGRO (**Deligios et al., 2013**) simulant la biomasse du colza avec des erreurs de l'ordre de 138 à 177g.m<sup>-2</sup>. Cependant, CSM-CROPGRO bénéficie d'informations sur les pratiques culturales dont nous nous affranchissons avec SAFY-CO<sub>2</sub>. Globalement les erreurs faites sur l'estimation de la biomasse sont dans les mêmes ordre de grandeurs que celles observées pour le blé d'hiver (RMSE 201g.m<sup>-2</sup>(**Pique et al., 2020a**)) et le maïs 252 g.m<sup>-2</sup> (**Claverie et al., 2012**) avec les modèles SAFY-CO<sub>2</sub> et SAFY, respectivement.



**Figure 21 :** Scatter plot entre la DAM obtenue par mesure destructive et celle simulée par SAFY-CO<sub>2</sub> pour chaque année de colza à Auradé.



**Figure 22 :** Performance moyenne concernant l'estimation de la biomasse sur les quatre (4) années colza à Auradé

## 3.2 Discussion

### 3.2.1 Les avantages de la méthode

L'approche mise en œuvre dans le cadre de cette étude combine un modèle agronomique avec des données de télédétection optique, acquises à hautes résolutions spatiale et temporelle, afin de simuler les composantes de flux de CO<sub>2</sub> et de la biomasse du colza. Le GAI satellite assimilé dans le modèle traduit les effets de stress biotique et abiotique de manière implicite comme dans les études précédentes (**Pique et al., 2020a**). L'avantage majeur de cette méthode est qu'elle nécessite très peu de données d'entrée et pas d'informations liées aux pratiques culturales, ce qui le rend facilement spatialisable à grande échelle avec un même jeu de paramètres. Malgré le peu d'informations concernant les parcelles et des années climatiques très contrastées, les performances de SAFY-CO<sub>2</sub> sur le colza sont proches des modèles agronomiques classiquement employés.

Aucun modèle n'est parfait et SAFY-CO<sub>2</sub> n'échappe pas à cette règle. Au vu des résultats, le modèle n'a pas rencontré de problèmes majeurs pour reproduire les dynamiques de flux, ceci pour toutes les années d'études, même si certaines années présentent parfois de légers biais (surestimations ou sous-estimations). Le GAI satellite arrive à calibrer le modèle de telle sorte qu'il reproduise bien les dynamiques des composantes de flux nets de CO<sub>2</sub>.

En ce qui concerne la biomasse, les performances du modèle sont variables selon les années. Pour l'année 2011 par exemple, le modèle estime bien les flux mais trouve des difficultés à bien reproduire la DAM. C'est une année atypique avec un démarrage tardif du colza, puis une croissance extrêmement rapide et une sénescence très précoce (**cf. Chapitre 2**) : le colza s'est mal adapté face aux conditions climatiques, et le modèle n'a sans doute pas une paramétrisation optimale et ou un formalisme adéquat pour reproduire ce type de conditions climatiques quand l'optimisation est faite sur le GAI. Aussi, les performances de l'année 2018 pour la DAM ne peuvent être évaluées pleinement puisqu'il manquait des données de validation en fin de cycle.

### 3.2.2 Les limites de la méthode

La première limite de cette méthode est l'utilisation des données satellites pour calibrer le modèle. En effet, le GAI est dérivé de capteurs optiques et les nuages constituent un frein pour la télédétection optique. Ils peuvent engendrer des erreurs quant au suivi de la dynamique de la végétation détectée le long du cycle cultural. Il peut arriver qu'il y ait des nuages à chaque passage du satellite sur le site sur une durée prolongée, et dans cette configuration nulle calibration ne pourrait être réalisée avec des données de télédétection.

La solution à ce problème pourrait être d'intégrer des données SAR dans l'approche (qui ne sont pas sensibles à la nébulosité) comme cela a déjà été fait par **Revill et al. (2013)**.

Aussi dans les exercices présentés, le modèle ne tenait pas compte des repousses post-récolte qui peuvent être significatives comme en 2011. Ceci a entraîné de forts biais quand on calcule la RMSE sur l'année culturale. L'activation de cette option permettrait d'améliorer les performances du modèle quand on évalue les erreurs sur l'année de culture, comme cela a été fait par **Pique et al. (2020a)**.

Le modèle a aussi des limites quant à la reproduction de la croissance végétative automnale. Les dynamiques de photosynthèses montrent des développements rapides du colza en 2008-2009 et en 2017-2018, puis un repos végétatif (**Figure 9**). Le modèle n'arrive pas bien à reproduire ces pousses automnales, ce qui a entraîné de fortes erreurs sur le GAI même si cela a eu peu d'impact sur les flux (GPP, NEE, Reco) et sur la DAM pour ces deux années.

## **Conclusion :**

A la lumière des différents résultats obtenus au cours de cette étude, la télédétection à hautes résolutions spatiale et temporelle combinée avec un modèle agronomique montre d'énormes potentialités pour estimer les composantes du flux net de CO<sub>2</sub> et la biomasse pour la culture du colza. Cette approche pilotée par l'imagerie satellitaire est avantageuse du fait qu'elle ne nécessite pas beaucoup de données de forçage et pratiquement pas d'informations sur les pratiques, ce qui la rend facile à spatialiser dans différentes contrées pédoclimatiques. Malgré le peu de données nécessaires en entrée du modèle, celui-ci arrive globalement à estimer avec peu d'erreurs les composantes du flux net de CO<sub>2</sub> et la biomasse du colza sur quatre (4) années climatiques très contrastées, même si pour une année climatique extrême comme 2011 la biomasse est moins bien estimée. Ceci confirme toutefois la capacité du modèle à reproduire avec fidélité les variables ciblées dans le cadre de cette étude.

Comme tout autre modèle SAFY-CO<sub>2</sub> présente des limites. La première est l'imagerie optique qui ne fonctionne qu'en condition de ciel clair. Une perte d'information concernant la dynamique du GAI sur plusieurs semaines peut engendrer des problèmes de calibrations. Pour pallier à cette limite, l'utilisation de données SAR serait un atout pour avoir un profil temporel de GAI plus complet en cas de présence de nuages.

Ce travail n'est pas exhaustif, il peut être amélioré sur plusieurs points (calibration, paramétrisation, validation spatialisée). Ce stage a permis de poser les bases offrant la possibilité à mes encadrants de pouvoir réaliser prochainement des simulations spatialisées de la production et des flux de CO<sub>2</sub> pour le colza. Une quantification des incertitudes devra aussi être faite pour faciliter la généralisation de cette approche à large échelle. Pour ce faire, l'application du modèle sur plus de cultures et dans différentes zones géographiques s'impose. Dans le cadre des nouvelles missions spatiales d'observations de la terre, plusieurs types de données seront disponibles et permettront d'améliorer cette méthode localement et à large échelle.

## Bibliographie et Webographie

Ago, E. E., 2016. Mesure des flux de CO<sub>2</sub> et séquestration de carbone dans les écosystèmes terrestres ouest-africains (synthèse bibliographique). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2016 20(1), 68-82.

<https://popups.uliege.be/17804507/index.php/index.php?id=16737&file=1&pid=12565>.

Baret, F., Hagolle, O., Geiger, B., Bicheron, P., Miras, B., Huc, M., Berthelot, B., Niño, F., Weiss, M., Samain, O., Roujean, J.L., Leroy, M., 2007. LAI, fAPAR and fCover CYCLOPES global products derived from VEGETATION. *Remote Sens. Environ.* 110, 275-286. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.02.018>.

Béziat, P., 2009. Effet des conditions environnementales et des pratiques culturales sur les flux de carbone et d'eau dans les agrosystèmes. Université Paul Sabatier, Toulouse III. [http://refhub.elsevier.com/S0016-7061\(19\)32199-8/h0090](http://refhub.elsevier.com/S0016-7061(19)32199-8/h0090)

Ceschia, E., 2013. Effets des conditions environnementales et des pratiques culturales sur les flux et bilans d'eau, de carbone et de gaz à effet de serre des agro-écosystèmes : stratégies d'analyses de l'échelle locale à régionale. Université Paul Sabatier, Toulouse III.

Claverie, M., et al., 2012. Maize and Sunflower Biomass Estimation in Southwest France Using High Spatial and Temporal Resolution Remote Sensing Data. *Remote Sensing of Environment*, 124, 844-57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.04.005>.

Deligios, Paola A., et al., 2013. Predicting Growth and Yield of Winter Rapeseed in a Mediterranean Environment: Model Adaptation at a Field Scale . *Field Crops Research*, 144, 100-12. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.01.017>.

Lanchashire et al., 2008. *A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds*. *Annals of Applied Biology*, 119, 561-601. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1991.tb04895.x>.

Nuria, P., et al., 2018. SCOPE Model Applied for Rapeseed in Spain. *Science of The Total Environment*, 627, 417-26. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.247>.

Peter, S., et al., 2010. Measurements Necessary for Assessing the Net Ecosystem Carbon Budget of Croplands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 139, no 3, 302-15. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.04.004>.

Pique, G., et al., 2020. Estimation of daily CO<sub>2</sub> fluxes and of the components of the carbon budget for winter wheat by the assimilation of Sentinel 2-like remote sensing data into a crop model. *Geoderma*, 376, 114428. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114428>.

Pique, G., et al., 2020. Combining High-Resolution Remote Sensing Products with a Crop Model to Estimate Carbon and Water Budget Components: Application to Sunflower. *Remote Sens.*, 12, 2967. <https://doi:10.3390/rs12182967>

Pique, G.; Wijmert, T.; Fieuzal, R.; Ceschia, E., 2021. Estimation of Crop Production and CO<sub>2</sub> Fluxes Using Remote Sensing: Application to a Winter Wheat/Sunflower Rotation. *Environ. Sci. Proc.* 4, 15. <https://doi.org/10.3390/ecas2020-08141>

Revill, A., et al., 2019. Estimating Cropland Carbon Fluxes : A Process-Based Model Evaluation at a Swiss Crop-Rotation Site. *Field Crops Research*, 234, 95-106. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.02.006>.

Arrhenius, S., 1896. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 41:251, 237-276, DOI: [10.1080/14786449608620846](https://doi.org/10.1080/14786449608620846)

Veloso, A., et al., 2013. Retrieving crops Green Area Index from high temporal and spatial resolution remote sensing data. SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. 6425-6432. <http://marte2.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte2/2013/05.28.23.23.25/doc/p0391.pdf>

Wang, Quan., et al., 2005. On the Relationship of NDVI with Leaf Area Index in a Deciduous Forest Site. *Remote Sens. of Environ.* 94, no 2, 244-55, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.10.006>.

Yao, H., et al. 2009. Agro-C: A Biogeophysical Model for Simulating the Carbon Budget of Agroecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, no 1, 106-29.  
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.07.013>.

<http://www.fao.org/faostat/fr/#data/QCL/visualize> Consulté le 13/05/2021

<https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/> Consulté le 13/05/2021

<https://www.oecd.org/fr/agriculture/> Consulté le 18/05/2021

<https://www.terresinovia.fr/-/les-stades-reperes-du-colza> Consulté le 20/06/2021

<https://4p1000.org/fr> Consulté le 20/06/2021

## Listes des Tables

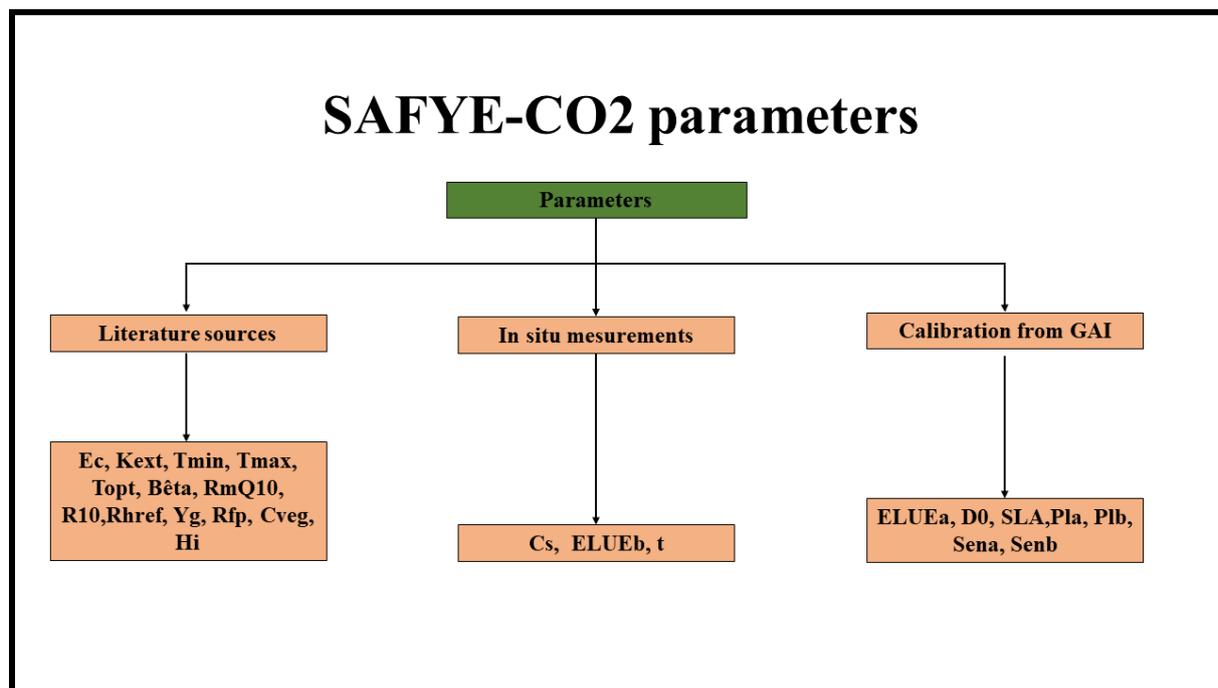
<b>Tableau1</b>	<b>Données biomasse</b>
<b>Tableau2</b>	<b>Données Satellite</b>
<b>Tableau3</b>	<b>Performances flux</b>

## Listes des Figures

<b>Figure1</b>	<b>Objectif et étape du stage</b>
<b>Figure2</b>	<b>Concentration CO<sub>2</sub> Station Mauna Loa</b>
<b>Figure3</b>	<b>Stades phénologiques du colza</b>
<b>Figure4</b>	<b>Production du colza à l'échelle mondiale</b>
<b>Figure5</b>	<b>Production du colza par département en France</b>
<b>Figure6</b>	<b>Surface cultivée en colza en France</b>
<b>Figure7</b>	<b>Localisation du site d'étude</b>
<b>Figure8</b>	<b>Diagrammes ombrothermique Auradé</b>
<b>Figure9</b>	<b>Dynamique GPP Auradé</b>
<b>Figure10</b>	<b>Fonctionnement du modèle SAFY-CO<sub>2</sub></b>
<b>Figure11</b>	<b>Scatter plot GAI</b>
<b>Figure 12</b>	<b>Dynamique Temporelle GAI</b>
<b>Figure13</b>	<b>Scatter plot GPP</b>
<b>Figure14</b>	<b>Dynamique Temporelle GPP</b>
<b>Figure15</b>	<b>Scatter plot Reco</b>
<b>Figure16</b>	<b>Dynamique Temporelle Reco</b>
<b>Figure17</b>	<b>Scatter plot NEE</b>
<b>Figure18</b>	<b>Dynamique Temporelle NEE</b>
<b>Figure19</b>	<b>Scatter cumul mensuel GPP</b>
<b>Figure20</b>	<b>Scatter cumul mensuel NEE</b>
<b>Figure21</b>	<b>Scatter DAM</b>
<b>Figure 22</b>	<b>Performance moyenne DAM sur 4 années</b>

## Annexe

### Annexe 1 : Description des paramètres



#### Les différentes catégories de paramètres du modèles SAFYE-CO<sub>2</sub>

##### Les paramètres pour estimer GPP

- **Efficience climatique (Ec)** : c'est la proportion du rayonnement global entrant absorbable par la photosynthèse (C. Varlet-Grancher et al, 1993)
- **Température minimale** : Elle correspond aux conditions thermiques minimales pour que la plante puisse se développer
- **Température maximale** : Elle correspond aux conditions thermiques maximales pour que la plante puisse se développer
- **Température optimale** : Elle correspond aux conditions thermiques optimales favorisant le développement de la plante.
- **Corrective factor (Cs)**: c'est un coefficient de correction qui est calculé à partir coefficient multiplicatif sR10. Le sR10 est égale 1 entre la levée et le début de la sénescence et il est estimé à partir du GAI entre la phase de sénescence et la récolte. Le Cs permet de corriger les artéfacts entre la sénescence observée et celle détectée par le satellite étant donné qu'elle commence du bas vers le haut de la plante. Cet effet phénologique surestime le GAI détecté par les capteurs satellitaires.
- **Effective light-use efficiency parameter a (ELEUa)** : ce paramètre estime l'efficience de la conversion de l'énergie absorbée par les plantes par photosynthèse à fixer le CO<sub>2</sub>.

Elle prend en compte la fraction du rayonnement diffus sur l'efficacité photosynthétique et elle est obtenue à partir de la calibration du modèle à partir des variables météorologiques.

- **Effective light-use efficiency parameter b (ELUEb)** : ce paramètre est dérivé des mesures in situ

### **Les paramètres pour estimer Ra**

- **Maintenance respiration parameter Q10** : La respiration de maintenance **R<sub>m</sub>** assure la distribution de l'énergie sur toutes les parties de la plante. Le Q10 correspond à un facteur d'accroissement de cette respiration de maintenance pour une augmentation de 10°C (exemple Si Q10 = 2, la respiration double pour un accroissement de 10°C). Sa valeur n'est pas universelle, elles changent en fonction du type d'espèce étudiée.
- **Maintenance respiration parameter R 10** : Elle correspond à la respiration de maintenance généralement exprimée en moles de CO<sub>2</sub> respirées par masse de tissus à une température de référence de l'ordre de 10 degrés (**Béziat, 2009**).
- **Growth respiration conversion efficiency parameter (Yg)**: c'est un paramètre physiologique qui estime la quantité de CO<sub>2</sub> respirée par unité de nouvelle biomasse produite.
- **Root fraction parameters** : c'est un paramètre qui indique la fraction de biomasse en dehors du volume racinaire.
- **Carbon content coefficient (Cveg)** : Il représente le contenu en carbone des plantes sa valeur diffère selon le type d'espèces étudiées.
- **Day of plant emergence D0**: c'est un paramètre qui s'obtient à partir de la calibration sur la base du GAI observé par satellite. Il représente la phase d'émergence de la végétation après le semis et de la repousse de la végétation après la récolte.

### **Les paramètres estimant la production de biomasse, le rendement et la sénescence des plantes**

- **Specific Leaf Area (SLA)**: la surface foliaire spécifique exprime le rapport entre la surface foliaire et le poids sec de feuille. Elle est déterminée à partir du modèle à l'aide de la calibration du GAI.
- **Partition-to-leaf function parameter (Pl<sub>a</sub>, Pl<sub>b</sub>)**: ce sont des fonctions empiriques de partition des feuilles se basant sur les températures journalières. Elles sont obtenues à partir de la calibration du modèle et ses valeurs peuvent être diverses en fonction du type de plante étudiée.

- **Sum of temperature for senescence ( $Sen_a$ ):** la somme de température au début de la sénescence correspond au cumul de températures moyennes journalières au-dessus d'un certain seuil depuis l'émergence des plantes.
- **Rate of senescence ( $Sen_b$ ):** ce paramètre estime la vitesse de sénescence de plante et elle est mesurée en degré jour.

#### **Les paramètres d'estimation de la respiration hétérotrophique**

- **Heterotrophic respiration parameter ( $R_{href}$ ,  $Q_{10}$ ):** la respiration hétérotrophe correspond à celle des microorganismes dans le sol participant à la décomposition de la biomasse organique.  $R_{href}$  est la référence respiratoire à 0 °C. Le  $Q_{10}$  le facteur d'augmentation de la respiration de référence pour une augmentation de 10 degrés de la température du sol.
- **Conversion factor of  $T_a$  into  $T_s$ :** ce paramètre du modèle estime la température de surface à partir de la température de l'air.

**Annexe 2 : Paramétrisation du modèle SAFY-CO<sub>2</sub> (Catégorie de Paramètres SAFY-CO<sub>2</sub>)**

<i>Paramètres</i>	<i>Notation</i>	<i>unités</i>	<i>values</i>	<i>sources</i>
<i>Les paramètres fixes</i>				
<i>Climate efficiency</i>	εC		0.48	<i>Varlet Grancher</i>
<i>Minimum Temperature</i>	Tmax	°C	35	<i>Virgil .,1997; Yao huang et al., 2009</i>
<i>Maximum Temperature</i>	Tmin	°C	0	<i>Virgil., 1997</i>
<i>Optimum Temperature</i>	Topt	°C	25	<i>Virgil .,1997; Yao huang et al., 2009</i>
<i>Extinction coefficient</i>	Kext		0.75	<i>Gabrielle., 1996</i>
<i>Q10</i>			2	<i>Yao Huang., 2009</i>
<i>R10</i>		gC-m <sup>2</sup> -Dm	0.0027	
<i>Root-to-shoot ratio</i>	RtS	%	20	
<i>Heterothopic respiration</i>	Rhref	gC.m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup>	0.34	<i>Suleau et al., 2011</i>
<i>Les paramètres mesurés in-situ</i>				
<i>Corrective factor</i>	Cs		1.07	<i>ICOS sites</i>
<i>Effective Light Use Efficiency for diffusion</i>	ELUEb		1.34	<i>Pique et al 2020a</i>
<i>Les paramètres calibrés à partir du modèle</i>				
<i>Effective Light Use Efficiency</i>	ELUEa	gC.MJ <sup>-1</sup>	[0.1-1.7]	<i>Calibration</i>
<i>Day of emergence</i>	D0	jour	[15-40]	<i>Calibration</i>
<i>Partition-to-leaf a</i>	Prt_L <sub>b</sub>		[0.0007-0.05]	<i>Calibration</i>
<i>Partition-to-leaf b</i>	Prt_L <sub>a</sub>		[0.0002-0.02]	<i>Calibration</i>
<i>Specific Leaf Area</i>	SLA	m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup>	[0.0001-0.02]	<i>Calibration</i>
<i>Sum of temperature for senescence</i>	SEN <sub>a</sub>	°C	[800-1700]	<i>Calibration</i>
<i>Rate of Senescence</i>	SEN <sub>b</sub>	°C jour	[2000-20000]	<i>Calibration</i>

Annexe 3 : Relation exponentielle NDVI LAI (Veloso et al., 2013)

